Sécheresse et agriculture

Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau

Expertise scientifique collective

Rapport d'expertise réalisé par l'INRA
à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche

Octobre 2006

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

INRA

Sécheresse et agriculture

Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau

Une Expertise scientifique collective réalisée par l'INRA
à la demande du Ministère de l'agriculture et de la pêche (MAP)

Octobre 2006

Pour citer le rapport :

Amigues J.P., P. Debaeke, B. Itier, G. Lemaire, B. Seguin, F. Tardieu, A. Thomas (éditeurs), 2006. *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau.* Expertise scientifique collective, Rapport, INRA (France), 380 pages + annexes

Ce rapport a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou l'INRA.
La liste des auteurs et contributeurs de l'expertise figure en Annexe.

Responsable de la publication :
Bernard Itier, Président du Centre INRA de Montpellier
itier@ensam.inra.fr

Secrétariat d'édition :
Unité Expertise scientifique collective, INRA

Institut National de la Recherche Agronomique
147 rue de l'Université - 75338 Paris cedex 07
Tél : + 33(0)1 42 75 90 00 – Fax : + 33(0)1 47 05 99 66

Sommaire

Introduction 7

1. Sécheresse et agriculture : état des lieux et enjeux 10

1.1. Sécheresses, sensibilité des productions agricoles au manque d'eau et impacts de l'agriculture sur les ressources en eau 11

1.1.1. Sécheresse, climat et hydrologie 12

1.1.1.1. Le cycle de l'eau
1.1.1.2. Le bilan hydrique et le bilan d'énergie de surface
1.1.1.3. Le bilan hydrologique
1.1.1.4. La ressource en eau et l'agriculture : définitions de la sécheresse
1.1.1.5. Effet de l'agriculture sur la ressource en eau et le climat en France
1.1.1.6. La ressource en eau en France

Références bibliographiques
Annexes

1.1.2. Perception de la sécheresse par la plante. Conséquences sur la productivité et sur la qualité des produits récoltés 49

1.1.2.1. Définitions de la sécheresse pour la plante
1.1.2.2. Conséquences de la sécheresse sur le fonctionnement des plantes
1.1.2.3. Expression des gènes
1.1.2.4. Conséquences de périodes de déficit hydrique sur la qualité des produits récoltés
1.1.2.5. Conséquences en termes de stratégies de tolérance à la sécheresse et de tolérances relatives de différentes espèces au déficit hydrique

Références bibliographiques
Annexe

1.1.3. Sensibilité à la sécheresse des systèmes de culture (grandes cultures, vigne et arboriculture fruitière) 68

1.1.3.1. La sécheresse agricole dans le contexte français
1.1.3.2. Les impacts annuels et pluriannuels de la sécheresse
1.1.3.3. Réaction des agriculteurs face à la sécheresse
1.1.3.4. Le conseil en irrigation

Références bibliographiques
Annexe

1.1.4. Sensibilité à la sécheresse des systèmes fourragers et de l'élevage des herbivores 88

1.1.4.1. Introduction
1.1.4.2. La variabilité de la production des prairies en fonction du climat. Outils d'analyse
1.1.4.3. L'ajustement à la variabilité du climat fait partie inhérente des systèmes fourragers et des systèmes d'élevage des ruminants
1.1.4.4. Les dégâts de la sécheresse sur les prairies naturelles
1.1.4.5. La sécheresse chez les herbivores
1.1.4.6. Adaptation régionale des systèmes d'élevage d'herbivores aux conditions de sécheresse

Références bibliographiques

1.1.5. Impacts des modes d'occupation des sols par l'agriculture sur la recharge des aquifères et la gestion des ressources en eau 108

1.1.5.1. Problématique territoriale de la gestion des ressources en eau
1.1.5.2. Des tentatives de simulation de l'Infiltration Efficace
1.1.5.3. L'utilisation des systèmes de fonctionnement de culture
1.1.5.4. Conclusion

Références bibliographiques

1.2. Usages agricoles et ressource en eau 127

1.2.1. Eau et usages agricoles en France 130

1.2.1.1. Etat des lieux de l'usage agricole de l'eau en France
1.2.1.2. Diversité régionale des problèmes de sécheresse, de pénurie d'eau et de gestion quantitative de la ressource
1.2.1.3. La petite hydraulique agricole : les retenues collinaires
1.2.1.4. Impacts des sécheresses passées
1.2.1.5. Economie de l'irrigation

1.2.2. Le droit de l'eau 146

1.2.2.1. L'eau objet de protection
1.2.2.2 L'eau objet de conciliation
1.2.2.3 L'eau objet d'appropriation

1.2.3. Les dispositifs et les acteurs de l'eau 157

1.2.3.1. Les acteurs de l'eau : le rôle de l'Etat
1.2.3.2. Les acteurs locaux

1.2.4. Territoires et acteurs 161

1.2.4.1. Les dynamiques de l'irrigation
1.2.4.2. Les territoires hydrauliques. Qui irrigue, comment et où ?
1.2.4.3. L'eau et ses usages dans les dynamiques territoriales. De l'eau support à l'eau facteur de développement

1.2.5. Gestion collective localisée 173

1.2.5.1. Evolution de la gestion de la sécheresse dans l'action publique
1.2.5.2. Une situation de dérégulation croissante de la gestion quantitative de l'eau
1.2.5.3. Les voies concrètes de régulation actuellement observables visant à gérer la pénurie en eau et à améliorer la gestion quantitative de l'eau

Références bibliographiques
Annexe

1.3. Evolutions climatiques et économiques : enjeux et questions 208

1.3.1. Le changement climatique 209

1.3.1.1. Le contexte de l'effet de serre et de son renforcement anthropique
1.3.1.2. Le changement climatique : les prédictions pour le futur
1.3.1.3. Le changement climatique : les impacts sur la production végétale
1.3.1.4. Le changement climatique : les évolutions récentes à l'échelle globale
1.3.1.5. Les impacts observés sur les écosystèmes terrestres
1.3.1.6. Réchauffement climatique et ressources en eau
1.3.1.7. Conséquences pour l'expertise

Références bibliographiques

1.3.2. Enjeux économiques et politiques 225

1.3.2.1. Les conséquences de la réforme de la PAC
1.3.2.2. Les enjeux de la politique de l'eau

Références bibliographiques

2. Adaptations de l'agriculture au risque de sécheresse 241

2.1. Amélioration génétique de la tolérance des cultures à la sécheresse 242

2.1.1. Le progrès génétique déjà obtenu 243

2.1.1.1. Stratégies génétiques utilisées : sélection classique, sélection assistée par marqueurs, transgenèse
2.1.1.2. La sélection classique

2.1.1.3. La sélection ciblée
2.1.1.4. Les transferts de gènes

2.1.2. Voies possibles pour l'amélioration de la tolérance au déficit hydrique 249

2.1.2.1. Cadre d'analyse
2.1.2.2. Les stratégies "conservatrices" : esquive et évitement
2.1.2.3. L'augmentation de l'efficience de l'eau
2.1.2.4. Les stratégies de maintien de la croissance

2.1.3. Conclusion 253

Références bibliographiques

2.2. Adaptations agronomiques au risque de sécheresse 258

2.2.1. Systèmes de grande culture 259

2.2.1.1. Bases pour le raisonnement des itinéraires techniques en conditions d'eau limitante
2.2.1.2. Cas des systèmes pas ou peu irrigués
2.2.1.3. Cas des systèmes fortement irrigués
2.2.1.4. Conclusion : Quelles solutions pour les systèmes de grande culture ?

Références bibliographiques

2.2.2. Cultures pérennes 307

2.2.2.1. Réduire la sensibilité des systèmes de culture à des sécheresses excessives
2.2.2.2. Evaluer l'opportunité d'introduire l'irrigation
2.2.2.3. Gérer plus efficacement les systèmes irrigués

Références bibliographiques

2.2.3. Systèmes fourragers et élevage 312

2.2.3.1. Le maïs ensilage, une ressource fourragère essentielle… mais parfois remise en cause
2.2.3.2. Le sorgho grain ensilé, une alternative possible au maïs en région sèche avec des atouts environnementaux
2.2.3.3. Une stratégie fourragère pour valoriser au mieux les ressources naturelles en eau : pluies et réserves du sol

Références bibliographiques

2.3. Adaptations socio-économiques au risque de sécheresse 323

2.3.1. Adaptation socio-économique à l'échelle de l'exploitation 324

2.3.1.1. Le manque d'eau : la nécessaire analyse (micro-)économique
2.3.1.2. De l'importance du timing de l'irrigation
2.3.1.3. Evaluation économique du risque
2.3.1.4. Irrigation et risque de production : analyse empirique des stratégies
2.3.1.5. La valeur de l'information

2.3.2. Assurances contre la sécheresse 336

2.3.2.1. Les mesures de couverture privées contre le risque de sécheresse
2.3.2.2. Expériences d'assurances sécheresse
2.3.2.3. Les limites des modèles d'assurance classiques
2.3.2.4. Les autres mesures de couverture contre le risque de sécheresse
2.3.2.5. Commentaires et esquisses de conclusions sur les assurances sécheresse

2.3.3. Adaptation collective à la sécheresse 342

2.3.3.1. Problématique américaine des marchés pour services écosystémiques
2.3.3.2. Les principes
2.3.3.3. Trois études de cas
2.3.3.4. Les enjeux du choix des instruments
2.3.3.5. Application à un nouveau cas australien
2.3.3.6. Critiques contre ces compensations et leurs conséquences gênantes
2.3.3.7. Des échanges de volumes d'eau en Californie
2.3.3.8. Le Plan pour l'Eau de la Californie

2.3.3.9. Quelques questions relatives à la gestion collective dans le cas français
2.3.3.10. Conclusion

2.3.4. Les outils économiques dans le cadre de la politique de l'eau 359

2.3.4.1. Accroître les disponibilités
2.3.4.2. Régulation de la demande en eau agricole : restrictions ou tarification ?
2.3.4.3. Solutions de second rang
2.3.4.4. Les marchés de droits
2.3.4.5. Conclusions

Références bibliographiques
Annexe

Conclusions 371

Annexes

L'utilisation de l'eau dans une agriculture durable : le cas de l'Unité Hydrogéologique de la Mancha Oriental (Espagne)

Liste des experts

Voir aussi deux études réalisées en 2006 pour le MAP, citées dans l'expertise

1. Sécheresse et agriculture : état des lieux et enjeux

1.1. Sécheresses, sensibilité des productions agricoles au manque d'eau et impacts de l'agriculture sur les ressources en eau

1.1.1. Sécheresse, climat et hydrologie

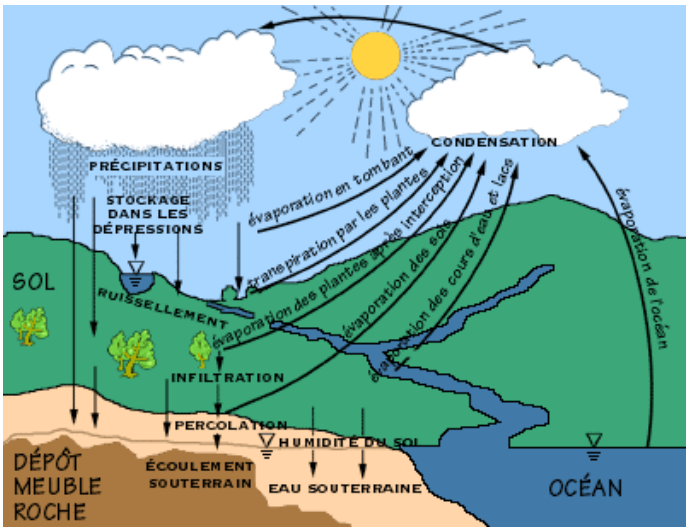
Bernard Seguin (INRA Avignon)

Historiquement, l'eau a toujours été un facteur essentiel pour le développement de l'agriculture, et elle est devenue un enjeu géopolitique majeur dans le contexte du XXIe siècle. Cette question fait l'objet d'une documentation abondante, que nous laisserons de côté pour nous concentrer sur le territoire métropolitain. Même dans ce cadre géographique restreint, la compétition entre les différents usages de l'eau s'est faîte progressivement plus sévère, et la légitimité de la demande de l'agriculture est plus souvent questionnée que par le passé. Il faut dire que les surfaces irriguées (qui représentent actuellement les ¾ des surfaces équipées pour l'irrigation) ont notablement progressé : 1,8 millions d'ha en 2003 (Agreste 2005) contre 1,6 en 2000 (Gleyses et Rieu, 2004), 1,1 en 1988 et 0,5 en 1970 (Terrible, 1993).

La répétition des épisodes de sécheresse, en particulier après 1976, est elle-même en grande partie à l'origine de l'extension des surfaces irriguées, l'irrigation apparaissant comme la seule parade pour régulariser et stabiliser la production. Il est symptomatique de noter maintenant que la sécheresse de 1976 avait, à l'époque, été identifiée comme "un événement qui ne se reproduira sans doute pas, du moins avec la même gravité, avant 100 ou 200 ans" (Hallaire, 1977), et que, du coup, l'irrigation devait être considérée "comme un atout supplémentaire, réservé à la limite, au passage de quelques caps difficiles". Si la première affirmation a été grandement démentie, la deuxième reprend son sens dans un contexte différent où la sécheresse ne peut plus être considérée comme un accident climatique exceptionnel (cet aspect sera discuté dans la partie du chapitre 1.3. portant sur le changement climatique).

1.1.1.1. Le cycle de l'eau

Avant d'aborder l'analyse des données d'entrée qui permettent de caractériser la sécheresse au niveau de la France métropolitaine, il apparaît nécessaire de rappeler les bases sur lesquelles s'appuie son évaluation.



L'eau de notre planète (environ 1 385 millions de km^3) est répartie dans cinq réservoirs interconnectés : les océans, les glaces permanentes, les eaux douces terrestres et la vapeur d'eau atmosphérique.

Quant à l'eau contenue dans les cellules vivantes, elle correspond à moins de 0,0001% de l'ensemble.

Figure 1. Le cycle de l'eau (d'après le site www.oieau.fr)

Ces cinq réservoirs d'eau de la planète subissent des transferts incessants selon un cycle bien connu dont la phase initiale est l'évaporation des eaux de surface des océans et des continents. Chaque jour, plus de 1 000 milliards de tonnes d'eau passent dans l'atmosphère, qu'elles quitteront un peu plus tard

sous forme de précipitations. Une partie de l'eau retombée subit à nouveau les phénomènes d'évapotranspiration (évaporation à la surface des sols et des organes végétaux, et transpiration des plantes). Le reste est drainé vers les nappes ou ruisselle vers les cours d'eau, et finalement les océans.

Dans le cadre de ce cycle de l'eau, la production agricole est d'abord déterminée par l'eau sur laquelle les cultures sont susceptibles de s'alimenter (dans le réservoir superficiel constitué par le sol) par l'absorption racinaire pour élaborer de la biomasse végétale par le processus de la photosynthèse (comme cela sera détaillé dans la section 1.1.2). Elle va elle-même ensuite conditionner la suite du circuit de l'eau tombée sous forme de pluie, soit par le drainage en profondeur dans le sol, soit par ruissellement, dont une partie va alimenter les ressources en eau sur lesquelles pourra éventuellement être prélevée l'eau d'irrigation lorsque le réservoir du sol est insuffisamment alimenté. Nous allons aborder successivement ces deux phases du cycle de l'eau, que l'on peut quantifier schématiquement par deux types de bilan de l'eau : le bilan hydrique d'une part, le bilan hydrologique d'autre part.

1.1.1.2. Le bilan hydrique et le bilan d'énergie de surface

1.1.1.2.1. Le bilan hydrique *(d'après Itier et al.,1996)*

Dans son principe, le bilan hydrique est une simple application du principe de conservation de la masse qui peut être formulé ici de la façon suivante : la somme des apports d'eau moins la somme des pertes en eau d'un volume de sol pendant une période donnée est égale à la variation de la quantité d'eau stockée dans ce même volume durant cette même période. L'ensemble des termes composant le bilan sont présentés figure 2.

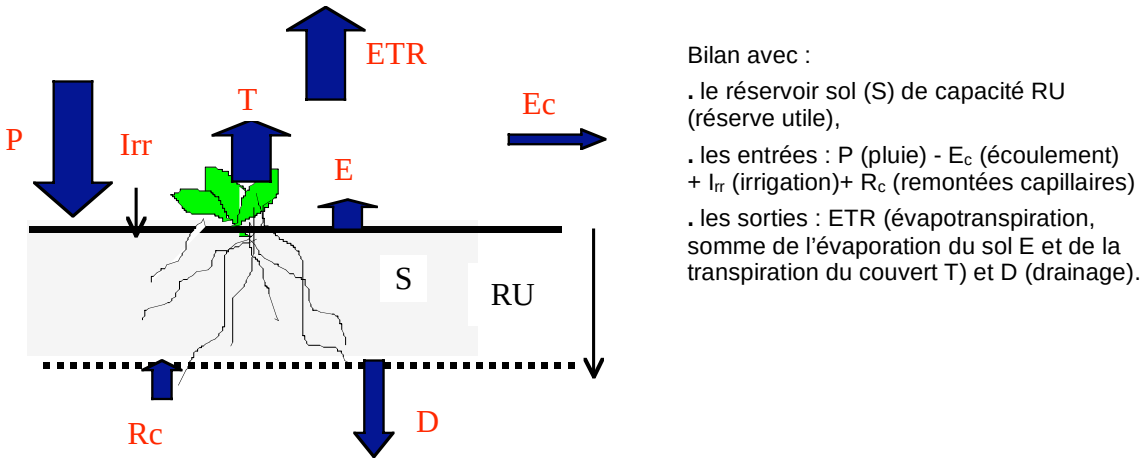


Figure 2. Schéma du bilan hydrique à l'échelle d'un couvert végétal

Au niveau de la partie supérieure du système, les apports sont essentiellement la pluie (P) et l'irrigation (I) diminuées (ou augmentées suivant les cas) du ruissellement Ec, tandis que les pertes se réduisent à l'évapotranspiration réelle (ETR, somme de la transpiration des plantes et de l'évaporation du sol). A la limite inférieure, les apports éventuels peuvent être ceux dus à des remontées capillaires (Rc, en particulier s'il existe une nappe peu profonde), tandis que les pertes se font par drainage profond (D). Dans ce bilan, on a négligé les termes de transferts latéraux dans le sol (dans une pente par exemple) pour ne considérer que des transferts verticaux. Le volume de sol sur lequel est fait le bilan est défini par la profondeur du système racinaire. L'équation de bilan s'écrit :

$$\Delta S = P + I - ETR - D + Rc \pm Ec$$

où ΔS est la variation du stock d'eau dans le volume de sol pendant la période considérée.

En pratique, on utilise généralement une équation simplifiée dans laquelle les termes d'écoulement latéral et de remontées capillaires ont été négligés :

$$\Delta S = P + I - ETR - D$$

Pour l'écoulement latéral, il s'agit évidemment d'une approximation qui n'est justifiée qu'en terrain plat. Dans le cas contraire, le ruissellement constitue un terme significatif pour le bilan hydrologique, mais nous considérerons qu'il ne fait pas partie du contexte de notre travail. Pour les remontées capillaires, s'il est possible de les négliger dans le cas général, c'est moins vraisemblablement le cas en situation de forte sécheresse : en 1976, Daudet et al. (1978) ont ainsi pu évaluer leur contribution (couches profondes en dessous de 170 cm) à la moitié des 300 mm prélevés par le blé d'hiver sur le site de la Minière, dans les Yvelines.

L'ensemble des processus qui déterminent, pour un apport d'eau $P+I$ donné, les termes ΔS, ETR et D, est détaillé en Annexe 1.

1.1.1.2.2. Le bilan d'énergie, déterminant de l'évapotranspiration dans le bilan hydrique

Dans l'équation du bilan hydrique, le terme ETR est régulé par l'eau disponible dans le sol (qui représente en quelque sorte l'offre du système sol-plante-atmosphère). Mais, lorsque celle-ci n'est pas limitante, il est plafonné par un autre facteur climatique (qui conduit à une notion de valeur potentielle), à savoir l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau, puisque celle-ci correspond à un changement d'état mettant en jeu la chaleur latente de vaporisation L (de l'ordre de 600 calories pour un gramme d'eau). Cette limite maximale 'potentielle', qui représente la demande exercée par le climat, est fixée à chaque instant par un autre bilan : le bilan d'énergie de surface (voir figure 3).

Ce bilan d'énergie fait intervenir, en premier lieu, l'énergie radiative disponible pour une surface au sol, qui correspond au rayonnement net $R_n = (1- \quad) R_g - (R_a - R_s)$, tenant compte non seulement du rayonnement solaire absorbé $(1- \quad) R_g$ par une surface d'albedo recevant un rayonnement solaire global R_g, mais aussi des rayonnements de grande longueur d'onde reçus par la surface en provenance de l'atmosphère R_a et émis par la surface R_s. A chaque instant, cette énergie est convertie en flux de chaleur échangés par la surface avec l'atmosphère sous forme latente ($L \times ETR$) ou sensible par convection (H), ainsi qu'avec le sol sous-jacent par conduction (G).

Le bilan d'énergie instantané s'écrit donc (avec des flux en W/m^2) : $R_n = L \times ETR + H + G$.

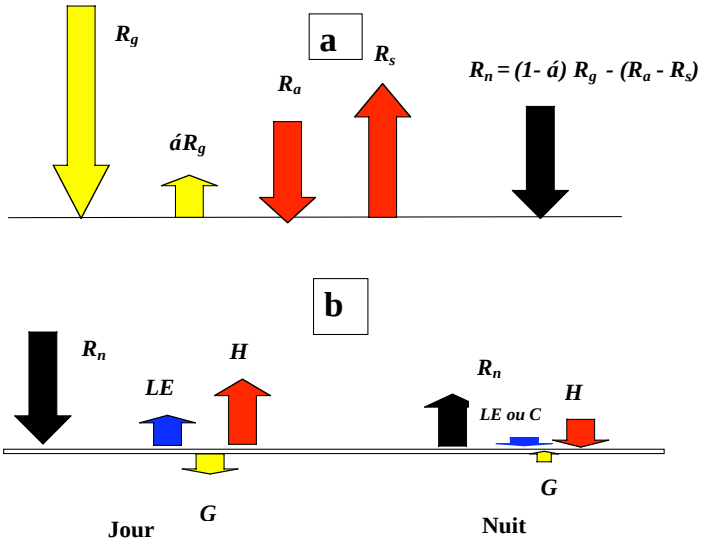


Figure 3. Représentation schématique des termes du bilan d'énergie de surface
(a/ en haut : le bilan radiatif ; b/ en bas : le bilan d'énergie en conditions de jour à gauche et de nuit à droite)

1.1.1.3. Le bilan hydrologique

Si nous focalisons maintenant notre attention sur la phase ultérieure du cycle de l'eau comme indiqué (figure 4), cette vision privilégie le déterminisme, au final, des grandeurs qui intéressent l'hydrologie, à savoir la quantité d'eau qui s'infiltre vers les nappes par drainage et ruisselle vers les cours d'eau par l'écoulement superficiel.

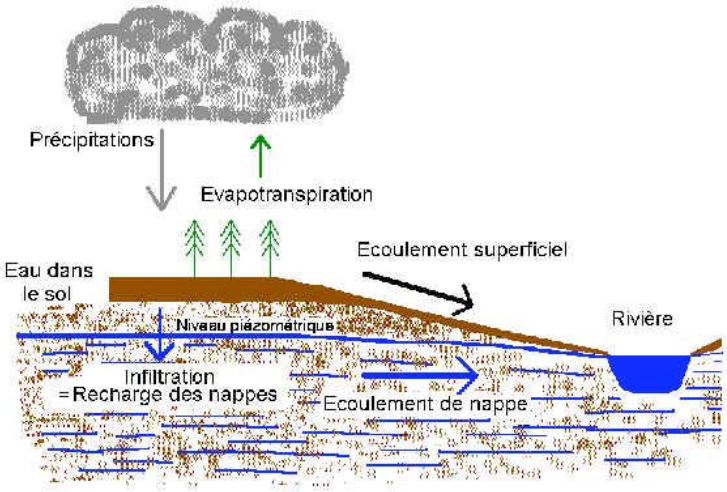


Figure 4. Schématisation du cycle de l'eau dans le bulletin hydrologique du RNDE, disponible sur le site du MEDD www.ecologie.gouv.fr (d'après www.oieau.fr et www.inra.fr/Intranet/Projets/emergence/eau/fiche-eau.htm)

> *Il est intéressant de noter que cette vision conduit à la notion de pluie efficace pour les hydrologues (pluie moins évapotranspiration, voir le glossaire), qui est radicalement différente de celle de pluie efficace pour un agronome considérant le bilan hydrique (pluie parvenant au sol pour alimenter le réservoir, donc pluie moins interception par le feuillage et moins ruissellement).*

L'eau ainsi écoulée alimente les ressources en eau, dites renouvelables. Elle se répartit, en fonction de la perméabilité du sol, en trois flux secondaires : le ruissellement, qui alimente les rivières et les fleuves, le drainage par infiltration superficielle qui recharge les nappes aquifères, et le drainage souterrain profond qui fournit les nappes les plus profondes.

Le constant retour du cycle de l'eau laisse à penser que l'eau est une ressource renouvelable par excellence. Cependant à l'échelle humaine, cette notion peut être illusoire lorsque l'on sait que certains stocks sont constitués d'une eau qui se déplace lentement et sur de grandes distances. Si pour l'essentiel, les ressources sont renouvelables, dans certains cas, elles constituent des réservoirs non renouvelables à l'échelle humaine.

Parmi les réservoirs d'eau douce, il faut citer : les grands lacs et les glaciers très localisés et les nappes d'eau souterraine ou aquifères. A ce sujet, il faut distinguer deux sortes d'aquifères :

- les nappes libres : elles sont surmontées de terrains perméables dont l'air occupe les pores ou les fissures. Les niveaux d'eau souterraine qu'elles contiennent peuvent varier librement en fonction de leur débit. Elles sont à régénération naturelle et sont sous forme de flux. Ce sont les ressources renouvelables ;
- les nappes captives : elles sont recouvertes de terrains imperméables et l'eau s'y trouve captive "sous pression", ce sont des stocks qui ne se reconstituent pas à l'échelle du pas de temps humain, et c'est par rapport à leur lenteur de renouvellement que ces ressources sont dites non renouvelables.

	Équivalent en profondeur (m*)	Temps de séjour
Océans et mer	2500	environ 4000 ans
Lacs et réservoirs	0,25	environ 10 ans
Marais	0,007	1 à 10 ans
Canaux fluviaux	0,003	environ 2 semaines
Humidité du sol	0,13	2 semaines - 1 an
Eau souterraine	120	2 semaines - 10 000 ans
Calottes glaciaires et glaciers	60	10 à 1000 ans
Eau atmosphérique	0,025	environ 10 jours
Eau biosphérique	0,0101	environ 1 semaine

* Calculé comme si l'emmagasinement était uniformément réparti sur toute la surface de la terre.

Tableau 1. Estimation de la profondeur et du temps de séjour des réserves en eau de la planète

Qu'est ce qu'une nappe ? Les roches qui constituent le sous-sol présentent un ensemble de "vides" où l'eau s'accumule. Ces "vides" sont tout petits, de la taille du millimètre. Ce sont les espaces entre les grains de sable ou de gravier pour les roches faites de sédiments, ou les trous minuscules qui existent dans les roches de craie. Ce sont aussi des fissures très fines dans les roches granitiques provoquées par les mouvements de la croûte terrestre.

Source : "L'eau", Ghislain de Marsily. 1997, Dominos Flammarion

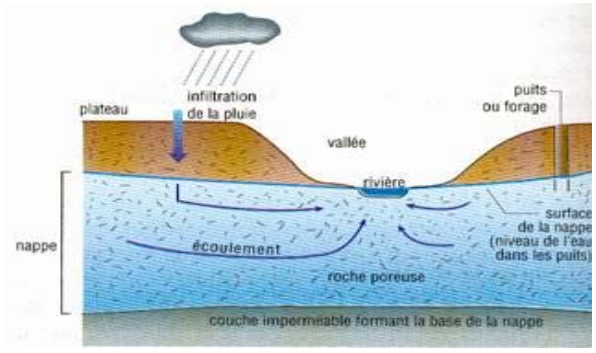


Figure 5.

Ces rappels mettent en évidence que l'eau disponible pour l'agriculture provient à la fois du remplissage du réservoir superficiel du sol explorable par les racines et de la ressource complémentaire éventuellement disponible pour l'irrigation (A titre d'exemple, le volume d'eau stocké dans les sols d'un bassin versant en Tunisie a pu être estimé à un million de m^3, environ 7 fois la capacité de stockage du lac collinaire construit pour permettre l'irrigation des cultures ; Mekki, 2003).

1.1.1.4. La ressource en eau et l'agriculture : définitions de la sécheresse

1.1.1.4.1. Sécheresse agricole et sécheresse hydrologique

La sécheresse est définie avant tout comme un déficit hydrique marqué, dont l'origine se trouve essentiellement dans la **faiblesse des précipitations** sur une période prolongée par rapport à la moyenne des apports observés sur cette période. Ce manque de pluie a une incidence directe sur la végétation cultivée : on parle alors de **sécheresse agricole ou édaphique** (liée à la réserve en eau du sol). Il réduit l'alimentation des différents compartiments du bassin versant (surface, sol, sous-sol…) : on parle de **sécheresse hydrologique** pour un déficit d'écoulement dans les cours d'eau et de **sécheresse phréatique** pour un déficit dans les nappes. La gravité de ce manque de pluie est fonction à la fois de l'ampleur du déficit et de la longueur de la période de déficit. Les indicateurs peuvent être multiples, avec en premier lieu des déficits pluviométriques, mais également des débits faibles dans les cours d'eau, des niveaux bas des nappes phréatiques, des situations prolongées de stress hydrique de la végétation, ces différents indicateurs étant généralement liés.

Le déficit hydrique peut résulter en premier lieu de conditions physiques que l'on ne peut corriger : défaut structurel de stockage en eau du sol (profondeur, structure, texture, pierrosité…), défaut de pluviométrie en interculture ou en période de végétation associée à une forte demande évaporative (rayonnement et températures élevés). La contrainte hydrique est souvent associée à des contraintes thermiques (hautes températures). L'incapacité de relayer suffisamment le défaut de ressource édaphique et pluviométrique par une irrigation, tant pour des raisons de disponibilité totale que de

période d'apport, introduit la notion d'irrigation déficitaire ('deficit irrigation') ; on parle plutôt d'irrigation d'appoint ('supplementary irrigation') pour caractériser un programme d'irrigation mettant en jeu un nombre limité d'applications en vue de compléter les ressources sol + pluie (Debaeke, 2003). L'irrigation est qualifiée d'appoint si elle permet de stabiliser la quantité et la qualité produite, alors même qu'une production non irriguée resterait faisable et rentable (céréales à paille, sorgho…). On ne peut employer tout à fait ce terme pour l'irrigation du maïs-grain dans la plupart des contextes pédoclimatiques où cette culture est irriguée et pour certains systèmes à base de cultures fruitières et légumières, qui ne pourraient exister durablement sans irrigation.

Un deuxième trait concerne le **caractère aléatoire ou prévisible** de la sécheresse. Dans de nombreuses régions sèches, la période d'arrêt ou de reprise des pluies est cyclique (c'est le cas en région mpéditerranéenne), avec une certaine régularité en dépit d'une variation sur les quantités de pluie annuelles (la sécheresse est plus ou moins marquée). Dans les régions de l'Ouest Atlantique, la variabilité est à l'évidence plus forte et les possibilités d'anticipation plus réduites : on distingue *a posteriori* des années sèches ou pas avec des fréquences d'1 à 2 années sur 5. Dans certaines régions du globe (Australie, par exemple), une prévision saisonnière du climat (consécutive à la manifestation d'un effet El Niño) est possible, offrant des marges de manoeuvre supplémentaires aux agriculteurs pour s'adapter au risque sécheresse (Meinke et Stone, 2005).

La variabilité inter-annuelle (quantité, distribution) qui caractérise souvent les situations soumises à la sécheresse conduit à une gamme de scénarios possibles bien que la sécheresse de fin de cycle survienne pratiquement partout où l'eau est limitée de façon chronique (surtout pour les cultures à cycle long). Elle peut également se manifester lors d'interdictions d'irrigation estivales. On doit donc distinguer des sécheresses 'structurelles', prévisibles (liées au sol, au climat, à l'accès à la ressource pour l'irrigation, aux systèmes de culture pratiqués) qui affectent une partie du territoire et plutôt les cultures de printemps et d'été, et des sécheresses 'exceptionnelles' qui concernent toutes les cultures et la majorité du territoire national.

> *La sécheresse peut donc concerner l'agriculture directement par un déficit pluviométrique en cours de saison de végétation (en gros, printemps et été) ou par une reconstitution déficiente des réserves hydrographiques suite à un déficit pluviométrique d'automne ou d'hiver. On peut qualifier la première situation de sécheresse agricole ou édaphique et la deuxième de sécheresse hydrologique (le cumul ou plutôt l'enchaînement des deux est d'ailleurs possible, comme en 1976 ou en 2005 pour ne citer que les années qui ont concerné une grande partie du territoire).*

1.1.1.4.2. Brève analyse historique

Il est possible d'avoir un premier aperçu de la fréquence de ces deux types depuis 1976 à partir du tableau 2, s'appuyant sur le descriptif des années 1976 à 1989 présenté par Dorize (1990) et celui de Beleaga (1992) pour les années 1976 à 1992, ainsi que les tableaux synoptiques de Terrible et Schérer (1993) et l'analyse de Schérer (1993) pour la même période. Nous avons complété ces sources pour les années ultérieures. Les sécheresses de type agricole sont les plus fréquentes, et les sécheresses hydrologiques se poursuivent le plus souvent (sauf en 1992) au cours de la saison de végétation. On peut d'ailleurs rapprocher cette observation, tout en signalant son caractère anecdotique, de la remarque tout aussi anecdotique de Carlier (1976) : il semble, notamment, qu'une légère corrélation existe entre, d'une part, un hiver et un printemps secs, et d'autre part, l'été suivant également sec.

Type	1976	1979	1985	1986	1989	1990	1991	1992	1996	2003	2004	2005
hydrologique								X				
agricole		X médit.	X Centre et Sud	X Centre et Sud		X Ouest et Sud	X Nord			X 2/3 du territoire		
combinée	X Nord				X Ouest				X Nord et Ouest		X Sud	X 2/3 du territoire

Tableau 2. Catégories des principales sécheresses depuis 1976

Cette distinction entre sécheresse agronomique et hydrologique porte essentiellement sur la répartition temporelle du déficit pluviométrique au cours de l'année. C'est sans doute celle qui est la plus signifiante pour le domaine de l'expertise, mais il peut être utile de rappeler brièvement que le terme de sécheresse peut avoir différentes significations.

1.1.1.4.3. Différentes définitions de la sécheresse

Nous écarterons celle qui caractérise dans le langage commun un climat dans son cadre géographique (climat sec/climat humide), en considérant d'abord la moyenne ou la normale pluviométrique, puis en la relativisant par rapport à d'autres facteurs du climat. Il s'agit alors plutôt d'aridité, même si certains indices permettant des zonages géographiques (du type de Martonne, 1926, ou du coefficient pluviothermique d'Emberger, 1930) conduisent à estimer l'état de sécheresse d'un lieu.

La sécheresse est donc plutôt considérée ici comme un événement, forcément en premier lieu à base climatique et donc à situer dans le cadre de la variabilité climatique, mais dont les impacts diffèrent suivant le secteur considéré. La sécheresse climatique s'évalue directement à partir des données pluviométriques, par comparaison avec les normales ou les moyennes (en général trentenaires) sur la période de déficit considérée. A la limite, dans les pays arides, si la norme est celle d'une faible pluviométrie, la sécheresse n'est pas identifiée comme telle, car revenant tous les ans ou presque. C'est donc l'écart à la normale qui sert généralement à détecter les épisodes et à les suivre au cours de la saison, éventuellement à les comparer (comme entre 2005 et 1976, voir carte sur le site du MEDD).

Comme nous l'avons vu, il est souhaitable de séparer ensuite sécheresse hydrologique et sécheresse agricole, en considérant la répartition temporelle automne-hiver/printemps-été. Pour cette deuxième période, en en restant aux seuls facteurs climatiques, la sécheresse agricole peut être mieux caractérisée par le déficit P-ETP. Une fois cette première caractérisation faite, il est nécessaire de prendre en compte la répartition temporelle (et éventuellement l'intensité pour les épisodes orageux) qui conditionne les effets du stockage dans le réservoir sol. Il faut alors considérer les éléments de sortie du calcul du bilan hydrique du type ETR/ETP à l'échelle du territoire ou les indices de stress hydrique lorsqu'on peut mettre en œuvre les modèles de culture. On peut alors parler de sécheresse édaphique dans le premier cas, et de sécheresse écophysiologique dans le second. Celle-ci peut alors incorporer un dernier niveau, qui intègre les différents facteurs limitants qui peuvent être associés à une sécheresse, par exemple un stress azoté ou un accident physiologique : mais il s'agit là plus d'une évaluation des impacts que d'une définition.

1.1.1.4.4. La sécheresse est-elle plus fréquente maintenant ?

La question se pose évidemment à l'heure actuelle de savoir si la multiplication apparente des épisodes de sécheresse depuis 1976 peut être considérée comme significative dans l'optique du réchauffement avéré au niveau du territoire. Nous avons vu dans l'introduction que les tendances de la pluviométrie annuelle donnaient une indication encore peu marquée dans ce sens. Mais il s'agit là d'une appréciation de nature différente portant sur la caractérisation des événements extrêmes et non plus des seules valeurs annuelles. Si les travaux préliminaires effectués par Météo-France dans le cadre du projet IMFREX (accessibles sur le site : http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex) montrent une tendance à une légère augmentation de la durée des épisodes sans pluie, c'est encore une indication insuffisante pour porter un jugement avéré. Compte tenu des différentes définitions présentées plus haut, il serait nécessaire de disposer d'études rétrospectives sur de longues séries homogénéisées portant sur les différentes composantes du bilan hydrique.

Des informations de ce type sont disponibles pour l'Ouest de la France dans la synthèse de Dubreuil (1997) qui met en évidence, pour les années postérieures à 1945, les épisodes de 1959, 1976, 1989 et 1990, ainsi que 1947 et 1949 à un degré moindre, mais qui ont concerné une grande partie de la région, alors que les épisodes de 1955, 1961, 1969, et 1985 étaient plus localisés spatialement. En l'absence d'un travail équivalent sur l'ensemble du territoire, il est seulement possible de noter, à partir des sources d'informations disponibles dans la bibliographie, que des sécheresses ont été observées avant 1976 : en se limitant au XXe siècle, en 1906, 1911, 1921 très marquée et déjà

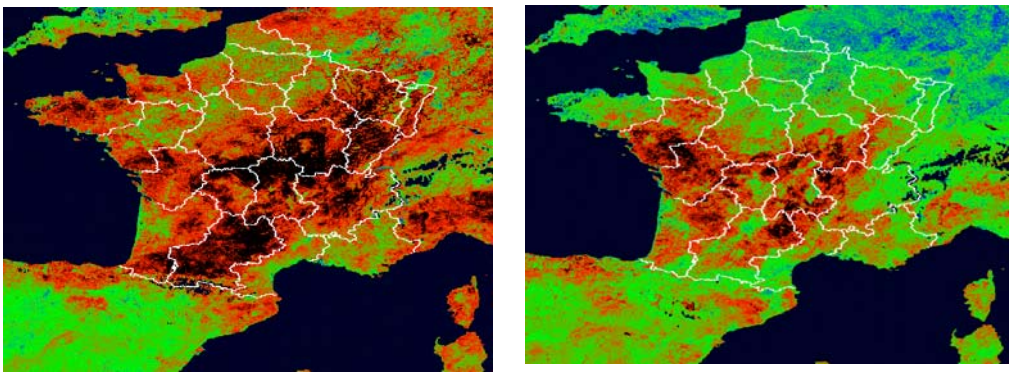
qualifiée de sécheresse du siècle (278 mm seulement sur l'année à Paris), puis de 1932 à 1934 (Geslin et Servy, 1935), 1938 (Demolon et Geslin, 1938), de 1942 à 1948 (Sanson et Pardé, 1950), 1949 (Geslin et Hallaire, 1949), 1953, 1957, 1962 et 1964 (Avila, 2005 pour la région de l'Adour).

Si l'on s'en réfère au seul critère du nombre d'articles publiés, il est clair que 1976 a été particulièrement marquant, tant sur le plan de l'analyse climatologique (Brochet, 1976 ; Broche, 1977 ; Namias,1978) ou hydrologique (Lecarpentier, 1977) que de ses conséquences sur la production agricole (INRA, 1977 ; Baculat et al, 1976 ; Hallaire, 1977 ; Henrion et Pecquet, 1977 ; Katerji et al, 1984 sur le bilan hydrique d'une culture de blé d'hiver à La Minière dans les Yvelines ; Robic et al., 1982 pour les éleveurs d'un canton de la Nièvre ; Byé et Pernet, 1976 pour une réflexion sur la place de l'agriculture dans l'économie) et forestière (Aussenac, 1978 ; Harranger, 1978). Il est difficile, dans cette dominante nette d'analyses, de faire la part de ce qui revient au seul aspect climatique d'un côté (même si la sécheresse était considérée comme de valeur centennale à l'époque, et concernait une grande partie du territoire, en particulier le nord) ou agronomique (avec une persistance sur l'ensemble de la saison de croissance végétale), et à un aspect plus socio-économique (redécouverte de l'impact possible des aléas climatiques sur une agriculture en pleine croissance et bénéficiant du développement technologique qui permettait de la croire à l'abri de telles surprises). En ce sens, on peut noter que les sécheresses de l'automne 1978 (Bellocq, 1979) et de septembre 1985 (Larivière, 1985) ont eu un écho beaucoup plus faible, lié à un impact beaucoup plus limité dans le temps et l'espace.

Par contre, les 4 années de 1988 à 1992 ont provoqué un net regain d'inquiétude sur ces impacts (voir Leroux et al.,1992 sur la causes météorologiques ; Choisnel et Barbini, 1992 pour le bilan hydrique ; Dorize, 1990 pour l'analyse globale des impacts ; Terrible, 1992 et Terrible, 1993, ainsi qu'un article Anonyme, 1990 sur les impacts sur l'agriculture et les consommations d'eau pour l'ensemble du territoire , Cavalié et Longueval, 1993, Renoux, 1993 et Fort, 1993 sur le même sujet, mais dans les cas particuliers respectifs de Midi-Pyrénées, de l'Auvergne et de Poitou-Charentes).

Il peut être intéressant de constater que, dans le cadre d'une étude à l'échelle globale sur les risques de désastres naturels, effectuée par l'université de Columbia pour la Banque mondiale (voir la carte en Annexe 2.), la France du sud apparaît nettement au niveau des risques de sécheresse (définis par la fréquence d'au moins 3 mois consécutifs avec une pluviométrie inférieure à 50% de la valeur normale sur la période de 21 ans 1980-2000).

Pour compléter ce survol historique, il faut bien sûr évoquer les épisodes récents de 2003, 2004 et 2005, encore très présents dans nos mémoires. L'analyse a beaucoup évolué par rapport aux épisodes précédents : plus de suivis en temps quasi-réel sur des sites web, et les prévisions sur le rendement des cultures et prairies sur les sites du SCEES (http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/) pour la France ou du CCR Ispra au niveau européen (http://mars.jrc.it/stats/bulletin), données satellitaires du capteur Végétation (figure 6).



21 août

Figure 6. Anomalies de l'indice de végétation (à la date du 21 août) pour les années 2003 (à gauche) et 2005 (à droite) par rapport à la moyenne de 2002 et 2004, à partir du capteur VEGETATION (traitement O.Hagolle , CESBIO Toulouse et CNES/CTIS)

Ces suivis sont complétés par des analyses agroclimatiques en fin de cycle pour certaines régions (Berthoumieu, 2003 et 2005 pour des départements du sud-ouest ; Ramel, 2003 pour la région PACA), et de nature plus agronomique avec les simulations à partir du modèle STICS (www.avignon.inra.fr/veille_agroclimatique). Les analyses climatologiques existent pour décrire la situation en termes de météorologie (Brochet, 1977 ; Namias, 1978 pour la sécheresse de 1976 ; Bellocq, 1979 pour celle de l'automne 1978 ; Leroux et al., 1992 pour les hivers secs de 1989 à 1992 ; Tardy et Probst, 1992 pour une analyse à l'échelle globale sur cent ans) et en rechercher les causes au niveau d'anomalies de l'état hydrique (Planton et Spagnoli, 2003), mais elles se sont surtout concentrées sur l'analyse du caractère exceptionnel de la canicule de 2003 (Luterbacher et al., 2004 ; Schär et al., 2004 ; Beniston, 2004 ; Stott et al., 2004 ; Chuine et al., 2004) ou l'évaluation des conséquences sur le bilan de CO_2 au niveau du continent européen (Ciais et al., 2005 ; Baldocchi, 2005). Au niveau de la synthèse ultérieure, c'est surtout un volumineux rapport du Sénat (2004) qui fait autorité, complété par quelques articles sur le bilan agroclimatique (Seguin et al., 2004) ou les conséquences économiques (Annequin, 2004). Par ailleurs, le débat semble s'être aussi déplacé vers les médias, avec l'orientation progressive de la discussion sur la place de l'irrigation (en particulier du maïs) au cours de l'été 2005.

Il n'est pas possible, à l'heure actuelle, de porter un jugement qualifié scientifiquement sur une aggravation du risque 'sécheresse' dans le passé récent (les dernières 50 années), pas plus que sur le lien entre les épisodes marqués récents (en particulier 2003 et 2005) avec le réchauffement climatique observé par ailleurs. Ceci étant dit, il faut noter objectivement une fréquence élevée d'épisodes de sécheresse significatifs, avec des caractéristiques temporelles et spatiales variées, depuis 1976. On peut noter que cette tendance n'est pas, au minimum, en opposition avec les prédictions issues des modèles climatiques pour le siècle à venir (voir le chapitre 1.3). Il paraît donc souhaitable d'intégrer une probabilité élevée de retour de tels épisodes dans le futur proche, plutôt que de penser que ces épisodes sont de nature exceptionnelle et ne se reproduiront pas.

1.1.1.5. Effet de l'agriculture sur la ressource en eau et le climat en France

Les rappels précédents indiquent que l'agriculture influe sur le cycle de l'eau, en influençant les pertes par évaporation (quand le sol est nu) ou par évapotranspiration en présence de culture. Il en résulte un double effet, en lien direct avec les notions de base du bilan hydrique et du bilan d'énergie qui ont été présentées plus haut.

Le premier porte sur l'eau disponible pour la recharge des nappes par infiltration (que l'on peut dénommer drainage).

Nota : l'agriculture joue également, par le taux de couverture végétale et les états de surface, sur le ruissellement, mais cette composante a été écartée du champ de l'étude en se limitant aux conditions de bilan hydrique pendant la période de végétation active sur sol plat, qui représente l'essentiel de la situation sur le territoire.

Le second porte sur le climat, par le biais de l'influence sur l'évapotranspiration en tant que flux de chaleur latente dans le bilan d'énergie de surface

1.1.1.5.1. Effet sur la ressource en eau

Dans ce contexte, des évaluations quantitatives des données d'entrée sont fournies par Météo-France (www.meteo.fr) ou reprises sous une forme plus élaborée par le RNDE (bulletin hydrologique sur le site du MEDD, déjà indiqué plus haut). Elles concernent non seulement la pluviométrie, mais également l'état d'humidité des sols et les pluies efficaces suivant leur définition hydrologique, à partir du calcul couplé d'un bilan d'énergie et d'un bilan hydrique au niveau des mailles considérées. Plusieurs versions de ce modèle couplé ont été utilisées par Météo-France, depuis le modèle simple à un réservoir (Choisnel, 1977), étendu à la version avec deux réservoirs (Choisnel, 1985), jusqu'à la version plus complexe actuelle qui conjugue les modèles ISBA pour les échanges d'énergie de surface, MODCOU pour l'hydrologie et SAFRAN pour la spatialisation des données climatiques. Ces

modèles utilisent une valeur-standard de RU (ou éventuellement une cartographie des grandes classes de RU) et supposent l'occupation du sol par un couvert de gazon de référence. Ces données sont évidemment de grande utilité pour un dimensionnement général de la ressource en eau, mais insuffisantes pour évaluer l'influence effective de l'agriculture. D'abord parce que les grandeurs intermédiaires signifiantes telles que l'évapotranspiration et la lame d'eau drainée ne sont pas disponibles en routine. Ensuite parce que le modèle utilisé ne prend pas en compte explicitement la variation spatiale des caractéristiques de RU des sols, et par ailleurs l'occupation du sol par les cultures.

Des informations quantitatives sont cependant disponibles à partir d'une étude effectuée récemment pour le MAP par Météo-France et l'INRA (Ruget et al., 2005). Le cadre général de cette étude est donné en Annexe 3., ainsi que les résultats portant sur les composantes du bilan hydrique (Ruget et al., 2006). Nous ne présentons ci-dessous que les principales conclusions à en retenir, en précisant qu'il s'agit là de données calculées pour une couverture supposée de l'ensemble du territoire par une végétation de prairie naturelle. Par ailleurs, les simulations réalisées par Brisson et al. (2006) permettent d'évaluer les modulations de ces composantes par différents systèmes de culture pour des hypothèses variées d'occupation du sol, sur un échantillon de sites géographiques et de RU du sol, par différents systèmes de culture (mais sans la spatialisation complète faisant l'objet de l'étude pour le MAP).

Les moyennes inter-annuelles pour l'ensemble de la France sont présentées dans les cartes ci-dessous. **Pour les variables climatiques d'entrée, la valeur moyenne des précipitations est de l'ordre de 1000 mm/an (932 mm)**, avec une très forte variabilité entre mailles (de 248 à 3388 mm annuels), alors que la valeur moyenne de l'ETM est de 773 mm, avec des variations allant de 449 à 1419mm (les valeurs vont croissant du nord-ouest au sud-est, de la Manche à la Méditerranée. **Pour les valeurs calculées, il en résulte une valeur moyenne de l'ETR de 567 mm/an**, qui varie en total annuel par maille de 176 à 1038 mm. Les valeurs élevées sont observées dans le Sud-Ouest et, dans une moindre mesure, sur les massifs montagneux arrosés (Ouest du Massif Central, Sud du Jura, Nord des Alpes). Les valeurs faibles se trouvent dans le Sud-est, l'Est du Massif Central surtout et dans une grande zone s'étendant de l'embouchure de la Loire à la montagne de Reims.

Au niveau du drainage, la valeur moyenne est de 374 mm/an, avec des valeurs extrêmes annuelles qui s'étalent de 0 à 2836 mm. Les valeurs élevées sont observées dans les régions suivantes : Vosges, Jura, Nord des Alpes et Cévennes, puis dans une moindre mesure ouest du Massif Central et des Pyrénées. Pour les valeurs faibles, on trouve : bassin parisien, bassin de la Garonne, Alsace, vallées de la Loire et de l'Allier, basse vallée du Rhône.

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
pluie	1015.92	1078.02	901.34	853.72	883.8	878.43	1001.12	1132.49	926.17	1017.85	782.89	714.5
	286.33	278.73	282.46	317.76	251.34	238.02	262.63	274.55	268.1	267	204.4	191.24
ETP	701.73	745.86	764.54	727.81	797.32	768.94	763	773.59	771.68	780.07	897.08	787.15
	129.18	139.98	138.51	125.21	127.77	148.95	128.45	142.19	145.5	137.91	125.48	124.32
ETR	567.87	575.23	545.63	519.06	591.09	542.16	589.78	621.91	593.75	593.16	512.24	555.23
	77.26	69	74.14	84.51	79.59	66.43	65.59	76.42	68.92	70.54	60.13	62.28
drainage	461.03	507.37	370.09	341.39	299.87	340.98	421.3	510.6	355.63	417.38	283.23	180.59
	280.3	283.36	272.51	285.73	231.87	218.84	255.54	276.64	235.31	255.24	185.08	166.23

Tableau 2. Moyennes et écarts-types annuels des composantes du bilan hydrique sur la période 1993-2004

Les années sèches (essentiellement 1996, 2003 et 2004) s'identifient bien par les valeurs les plus faibles de pluviométrie annuelle (respectivement 853, 782 et 714 mm). Si les valeurs d'ETR (519, 512 et 555 mm) sont également les plus faibles, elles s'écartent assez peu de la valeur moyenne, et représentent un pourcentage par rapport à la pluie plus élevé que les années moyennes, suivant la répartition temporelle des épisodes pluvieux (61, 65 et 78%). Quant au drainage, il s'affaiblit en conséquence considérablement (341, 283 et 180 mm), mais les valeurs les plus basses sont observées plutôt l'année suivante (ainsi 300 mm en 1997 et 180mm en 2004, cette année cumulant la sécheresse intrinsèque et l'arrière-effet de 2003 pour aboutir à une valeur représentant seulement 25% de la pluie reçue).

Dans l'hypothèse d'une culture uniforme de prairie sur l'ensemble du territoire, il apparaît donc globalement, pour un apport pluviométrique d'environ 930 mm, une perte par évapotranspiration en moyenne de l'ordre de 560 mm (510 à 520 en année sèche) et une restitution aux nappes de l'ordre de 370 m (180 à 300 en année sèche). Ces valeurs représentent en moyenne respectivement 60% et 40% de la pluie reçue, ces pourcentages pouvant s'élever à presque 80% les années sèches dans le cas de l'évapotranspiration et, du coup, tomber à 30% pour le drainage (ou même 25% en 2004).

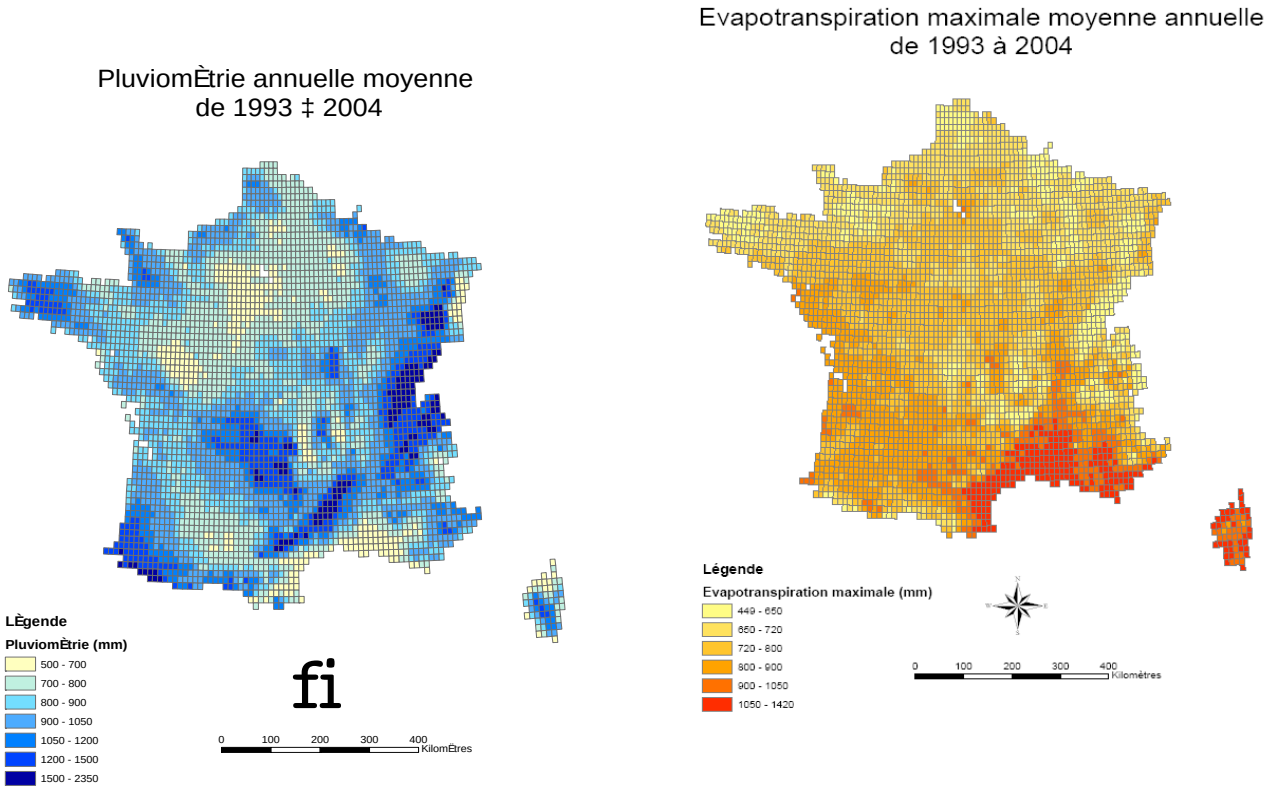
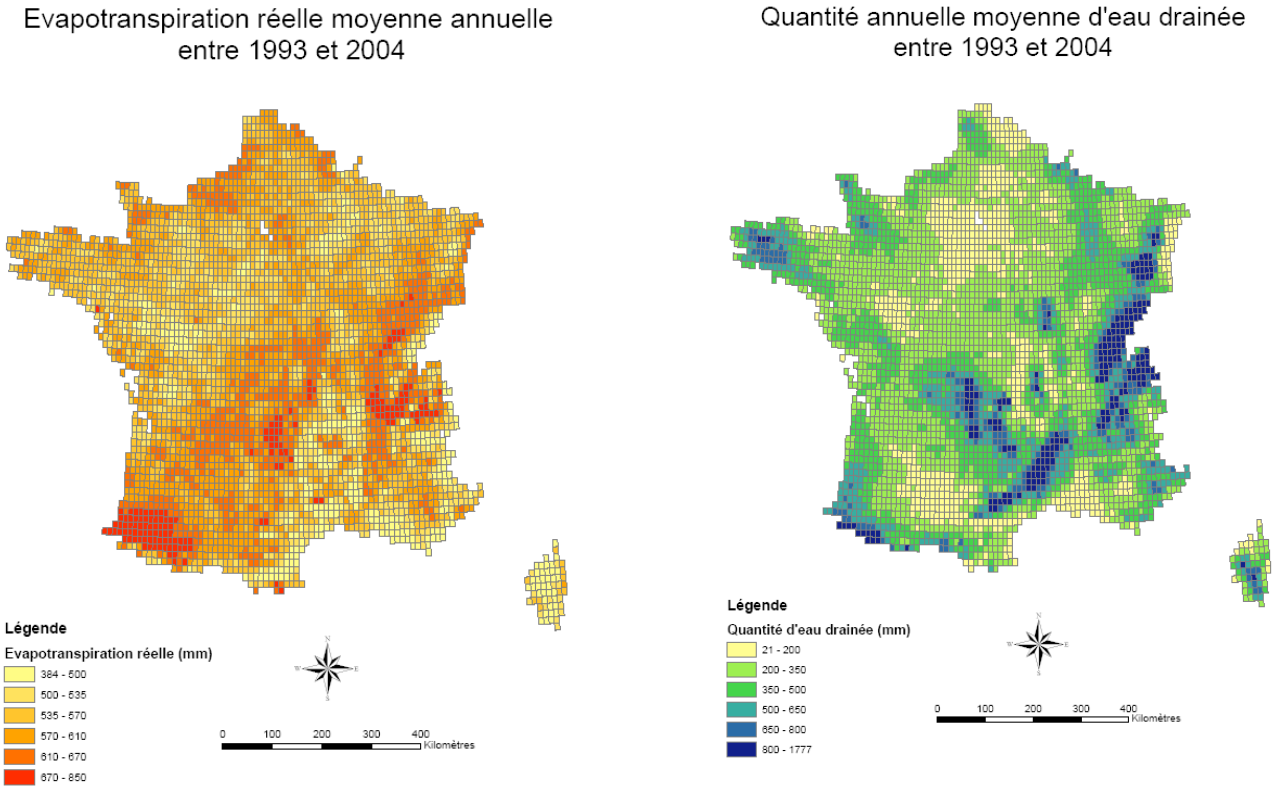


Figure 7.



1.1.1.5.2. Effet de l'alimentation en eau des couverts cultivés sur le climat

C'est ici qu'intervient le couplage entre le bilan hydrique et le bilan d'énergie, dont nous rappelons l'équation générale explicitée en 1.1.1.2 : $R_n = L \times ETR + H + G$.

Le flux par conduction *G* est généralement faible, sauf dans le cas de conditions très sèches et sur sol nu, et le bilan d'énergie conduit, en première approximation, à une répartition de l'énergie radiative R_n entre les échanges sous forme latente $L \times ETR$ et sensible *H.* Celle-ci dépend de la disponibilité de l'eau dans le sol, et c'est là qu'intervient le couplage avec le bilan hydrique (Choisnel, 1977). Lorsqu'elle n'est pas limitante, l'essentiel de l'énergie est convertie sous forme latente, l'ETR se situant au niveau de l'ETP (ou de l'ETM pour une culture donnée). Lorsqu'apparaît une restriction, l'ETR est plus réduite, et le terme H augmente en proportion.

Dans le premier cas (dans des conditions humides ou après irrigation), il y a peu ou pas d'énergie disponible pour échauffer la surface : la température de celle-ci est voisine de la température de la masse d'air. Dans le deuxième (conditions sèches), la surface n'est plus refroidie par l'évaporation : elle peut alors s'échauffer notablement par rapport à la température de l'air, de l'ordre de quelques °C pour un couvert végétal et jusqu'à 20-25°C pour un sol nu très sec (ce qui conduit à ce que ce soit la température de couvert, celle effectivement ressentie par les organes végétaux, qui soit à prendre en considération dans les modèles de culture, voir à ce sujet l'Annexe 1.).

A l'échelle d'une parcelle agricole, cet effet se traduit par un abaissement de la température de l'air à 2 m au- dessus de cette parcelle de l'ordre de 2 à 3°C, comme cela a pu être mesuré pour une culture de blé dans la Crau (Steinmetz et al., 1989).

Au niveau des interactions agriculture-climat, la surface interagit de même avec l'atmosphère en modulant les formes d'échange de chaleur, et par suite en influençant les conditions de température et d'humidité dans la couche-limite au voisinage de la surface. Il en résulte le lien étroit bien établi entre sécheresse et températures élevées, la sécheresse conduisant à une augmentation de température par suite de la diminution du flux de chaleur latente correspondant à l'évaporation (voir à ce sujet l'analyse des conséquences des sécheresses de 1986 à 1990 à partir des données satellitaires permettant la mesure de la température de surface tels que Meteosat (Seguin et al., 1991) ou NOAA (Courault et al., 1994). Ce lien entre sécheresse persistante et températures élevées a d'ailleurs été bien observé dans les épisodes de 1976 et 2003, en particulier, et il a été démontré par les modèles de climat pour ce dernier épisode (Planton et Spagnoli, 2003).

Les effets résultant de l'irrigation sur le climat ont fait l'objet d'études climatologiques qui cherchent à les évaluer sur les mesures météorologiques de réseau, dans des situations où l'irrigation est pratiquée à une échelle suffisamment large pour qu'on puisse penser qu'elles ont modifié le climat de la région. C'est le cas aux USA, avec la situation des Grandes plaines : Barnston et Schikedanz (1984) avaient conclu à une augmentation des pluies d'été, mais Moore et Rojstaczer (2001) n'ont pas détecté une telle tendance sur la période 1950-1997, à l'exception du Texas entre 1950 et 1982, ce qui les amène à envisager l'existence d'un seuil dans le développement de l'irrigation atteint avant 1950. Il ne paraît pas vraisemblable qu'un tel effet, encore discuté, soit significatif au niveau de la France. C'est donc essentiellement sur l'effet d'abaissement de la température que l'influence de l'irrigation peut jouer dans notre analyse. Dans ce contexte, les études de Barnston et Schikedanz (1984) ont conclu à un abaissement de la température maximale de l'ordre de 2°C pour les jours chauds et secs et de 1°C pour les jours couverts et humides au Texas, et celle de Changnon et al. (2003) à un abaissement de la température du point de rosée de l'ordre de 3°C dans le deuxième cas sur les données de Chicago. Des travaux utilisant des modèles climatiques à grande échelle (Boucher et al., 2004) évaluent l'abaissement de température de l'air à 0,8°C sur les grandes zones irriguées du globe.

Dans le contexte français, où le paysage est plutôt constitué de mosaïques de parcelles portant des cultures variées et dont seulement certaines sont irriguées, l'évaluation est plus délicate. L'apport des données satellitaires, en lien avec des modèles basés sur le bilan d'énergie en surface, a permis une première estimation dans le cas particulier de la Crau (Seguin et al., 1982) où une large surface de prairies bien irriguées (Crau humide, avec un pourcentage moyen de l'ordre de 50% sur 240 km^2) présente un contraste très marqué en été avec une surface sèche également de larges dimensions (Crau

sèche, environ 180 km^2). Ce cas d'école a permis d'établir que la différence de température de l'air de jour en été est de 1 à 4°C, avec une valeur moyenne de 2,5°C, résultant d'une différence de température de surface pouvant atteindre 20 à 25°C dans les cas extrêmes en situation estivale sèche et sans vent. Bien que cette situation soit particulière (grandes surfaces quasiment homogènes avec contraste maximal dans les conditions méditerranéennes d'été), cet ordre de grandeur, proche de ce qui est prédit pour la fin du siècle par suite du réchauffement climatique, traduit bien le rôle de régulateur thermique que joue un couvert transpirant en été. Plus largement, le contraste Crau sèche/Crau irriguée amène également à apprécier schématiquement l'effet global de l'irrigation sur le paysage en conditions sèches estivales.

Quel qu'en soit l'intérêt, cette situation reste cependant relativement exceptionnelle dans le paysage français, où la mosaïque de parcelles est la règle. Elle ne peut donner qu'un ordre de grandeur (3à 4°C, rappelons-le) de la valeur maximale du refroidissement de l'air à l'échelle du paysage régional causé par la transpiration du couvert végétal. Des satellites tels qu'ASTER (données avec une résolution de 90 m, voir figure 8 pour un site dans le Sud-ouest proche de Toulouse), rendent maintenant accessibles les informations spatialisées nécessaires à cette échelle du paysage.

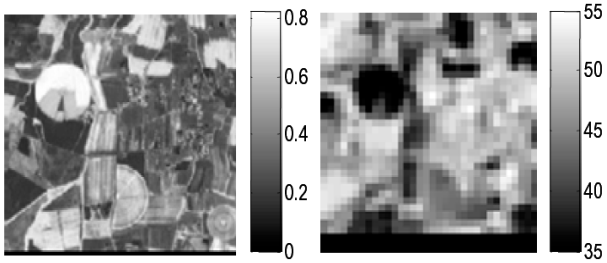


Figure 8. Cartographie en NDVI (à gauche) et Ts (à droite) sur le domaine de Lamothe (3 km x 3 km) avec les données du satellite ASTER le 10/08/2003 (d'après Courault et al., 2006)

L'évaluation des flux à partir de ces données (figure 9) permet de voir (partie droite de la figure), que pour une journée d'été (10/08/2003), la température de l'air au-dessus du maïs irrigué passe de 33°C pour une irrigation de l'ordre de 200 mm à 37°C pour une irrigation de 100 mm, alors qu'en comparaison, le soja se situe dans la gamme 35-36°C et le tournesol 36-38°C.

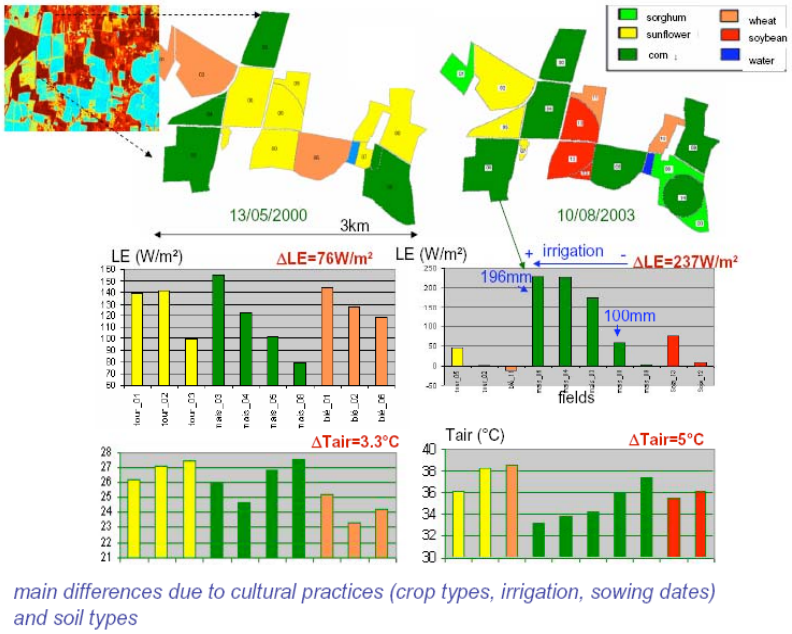


Figure 9. Evaluation, pour deux journées, des variations spatiales du flux de chaleur latente LE et de la température de l'air au-dessus de différentes cultures du domaine de Lamothe (d'après Courault et al., 2006)

La combinaison de ces données avec des modèles numériques de climat à méso-échelle tels que Meso-NH permet d'évaluer, sur le site des Alpilles (Figure 10), que l'irrigation du blé (qui ne représente que 18% de la surface) serait susceptible d'abaisser la température de l'air au-dessus de cette culture de 1,2°C, mais aussi au-dessus des autres cultures de 0,5°C, le tout se traduisant, au niveau de la petite région (30 km x 30 km) par un refroidissement moyen de 0,7°C (Courault et al., 2005).

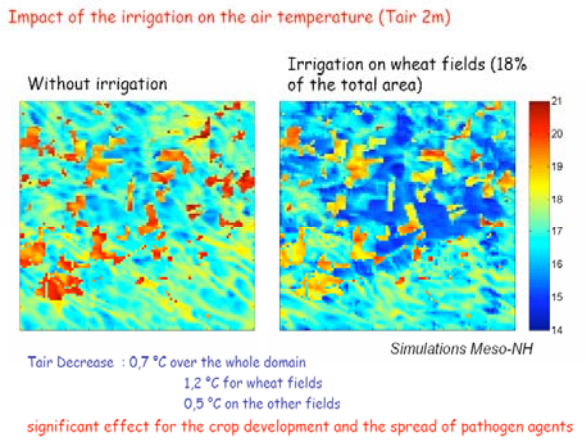


Figure 10. Evaluation de l'effet spatialisé sur la température de l'air (journée du 18 avril 1997) d'un scénario d'irrigation des parcelles de blé sur le site Alpilles, à partir de simulations utilisant le modèle Meso-NH (d'après Courault et al., 2005)

> *L'ensemble de ces travaux converge vers la mise en évidence d'un effet significatif de l'irrigation à l'échelle du couvert, de la parcelle, mais aussi de la petite région, susceptible de jouer sur une gamme de 1 à 3°C. Il est bien évident qu'il n'est pas question de prendre en considération ce seul argument de refroidissement pour opter pour l'irrigation, mais il apparaît nécessaire de le mentionner pour que l'éventail des effets induits soit complet.*

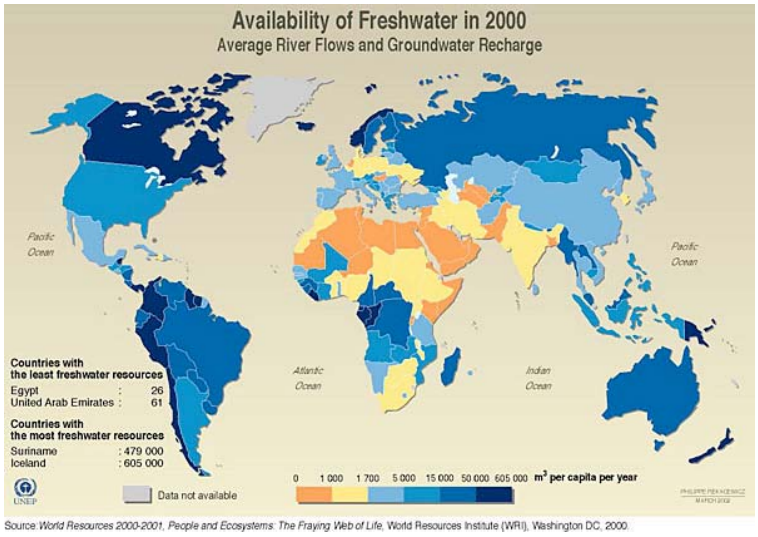
1.1.1.6. La ressource en eau en France

L'eau est devenue une denrée rare et une ressource stratégique en de nombreux endroits du globe (Ramonet, 2002). La France est considérée comme un pays à la ressource en eau confortable (Encart 1) : le volume des ressources en eau souterraines potentiellement disponibles (abstraction faite des eaux trop profondes ou trop chargées en sels minéraux) est estimé par le BRGM (Pointet, 2000) à environ 2000 milliards de m^3. Ce stock se renouvelle à raison de 100 milliards de m^3 par an qui rejoignent les nappes, alors que 70 s'écoulent vers les rivières par suite du ruissellement superficiel. A noter que l'ensemble de ces deux termes (soit 170) correspond au drainage tel que nous l'avons évalué plus haut à partir du seul bilan hydrique sur terrain plat. Le reste (270) correspond au retour vers l'atmosphère par l'évapotranspiration.

L'ensemble des prélèvements est évalué à 42,5 km^3 par Rieu (1999) pour les ressources renouvelables, dont 7 km^3 dans les nappes, alors que De Villèle (1999) fait état respectivement de 23 et 7 km^3. Pointet (2000) évalue, quant à lui, les prélèvements sur les nappes actuellement à 8 km^3.
Bien que la France puisse donc être considérée comme un pays à la ressource en eau confortable, celle-ci est inégalement répartie sur le territoire. Comme l'ont montré les épisodes de sécheresse récents, elle n'est pas à l'abri de problèmes de gestion car les usages de l'eau sont de plus en plus nombreux, et souvent concurrents. On peut retenir les catégories suivantes d'après Coulomb (2003) :
- l'eau pour l'homme : besoins domestiques (alimentation en eau potable), des industries et des services ;
- l'eau pour l'alimentation : besoins agricoles (principalement, irrigation) ;
- l'eau pour la nature : besoin des écosystèmes (soutien d'étiage, salubrité des cours d'eau).

Encart 1:
Les ressources en eau

La France est un pays à la ressource en eau confortable

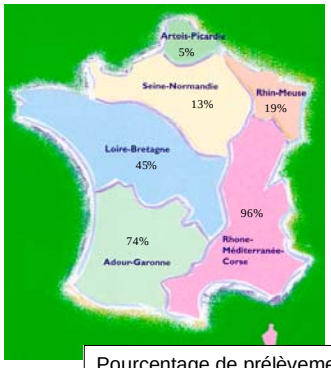


mais diversement répartie en quantité

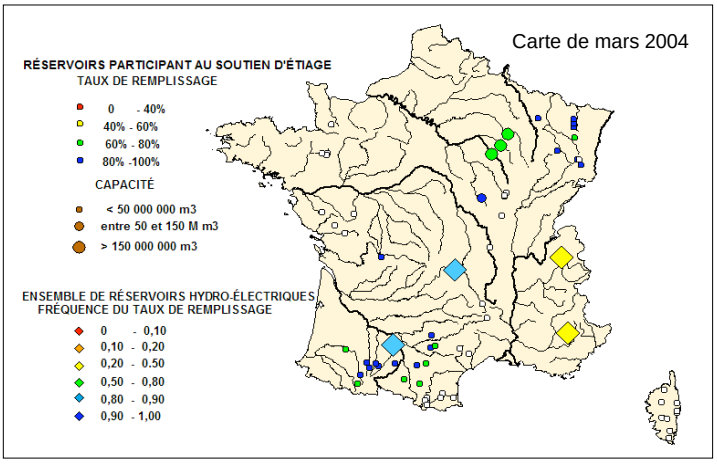
Carte des principales zones présentant de fréquentes situations de déséquilibre entre la demande et la ressource en eau.

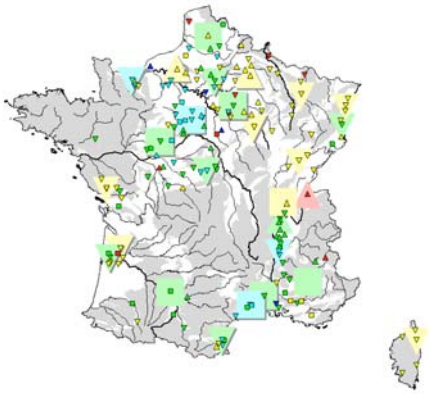
et selon les types de ressource

Eaux souterraines (nappes) et superficielles (rivières, lacs) se répartissent de manière hétérogène sur le territoire français



Pourcentage de prélèvements agricoles d'origine superficielle par bassin hydrographique





Localisation des principales nappes (grands carrés et triangles).
Les couleurs et les formes correspondent respectivement à l'état de remplissage en mars 2004 en rapport à la normale (bleu = très supérieur, rouge = très inférieur) et à l'évolution récente (en baisse, stable ou en hausse).

Le prélèvement pour l'agriculture est globalement de l'ordre de 4,9 km^3 (toujours d'après Rieu, 1999), soit seulement 11,5%, valeur notablement plus faible qu'en Italie, Espagne, Portugal, etc. (Katerji et al., 2002). Cependant, si l'on considère la consommation nette, comme elle ne restitue au milieu

qu'une partie de l'eau prélevée, sa part de consommation (2,4 km^3) s'élève à 30% (Terrible, 1993 ; Rieu, 1999). De plus, celle-ci atteint son maximum en été, et peut représenter 80 à 90% dans le sud de la France, qui plus est en période d'étiage (Hurand et Tardieu, 1998). Si les besoins en eau pour l'eau potable, la salubrité et le soutien d'étiage des rivières sont plus faibles, ils n'en sont pas moins prioritaires, et les années où la ressource en eau vient à manquer le gestionnaire doit arbitrer entre les différents usages. En cas de pénurie avérée, le décideur politique doit répartir les aides à sa disposition entre les différents usagers, en fonction des dommages subis. Il en résulte des conflits d'usage qui seront examinés de manière détaillée dans le chapitre 1.2.

La ressource en eau apparaît encore comme largement suffisante en valeur annuelle sur l'ensemble du territoire, mais elle est inégalement répartie sur l'ensemble du territoire. Globalement, l'agriculture n'en prélève qu'un faible pourcentage (de l'ordre de 12%). Par contre, du fait qu'elle restitue moins que les autres activités, cette valeur s'élève à 30% en consommation nette. De plus, sa demande se concentre en période estivale, et elle peut monter à 80-90% en période d'étiage, ce qui explique qu'elle soit de plus en plus l'objet de conflits d'usage avec les autres activités.

Rappel des points essentiels

L'analyse du cycle de l'eau sur les surfaces continentales peut conduire à deux visions du devenir de l'eau de pluie :
- celle de l'agronomie, régulée par le bilan hydrique du sol : l'eau arrive à la surface du sol sous le couvert, après l'interception éventuelle d'une faible partie en chemin le long de la plante. Elle alimente ainsi le réservoir superficiel exploré par le système racinaire des plantes. Celles-ci répondent à la demande en eau imposée par le climat (évapotranspiration potentielle ou de référence) en fonction de l'offre qu'elles peuvent puiser dans ce réservoir. Si celle-ci est suffisante, la transpiration s'effectue avec une régulation minimale par les stomates, ce qui correspond à l'évapotranspiration maximale, et la photosynthèse (et donc la production de biomasse) est également à son niveau maximal. Mais si, par contre, l'alimentation hydrique est défaillante, les stomates se ferment pour abaisser le niveau de l'évapotranspiration réelle, ce qui du même coup entraîne une réduction de la production photosynthétique ;
- celle de l'hydrologie, qui est au contraire centrée sur l'eau qui alimente les réservoirs où il est possible d'effectuer les prélèvements pour les divers usages. Cette eau provient du drainage en profondeur (ou percolation) de l'eau du réservoir superficiel vers les nappes sous-jacentes et du ruissellement de l'eau qui ne peut pas s'infiltrer.

La sécheresse, causée au départ par un manque d'eau résultant bien sûr d'une pluviométrie insuffisante, se traduit en agriculture par un réservoir superficiel insuffisamment rempli qui ne permet pas une alimentation hydrique optimale. Le niveau du stress qui en résulte est généralement raisonné par l'agriculteur, soit au niveau du choix des productions, soit des itinéraires techniques, pour être tolérable en situation normale. Dans le cas contraire, l'irrigation peut permettre d'apporter le complément d'eau nécessaire, à condition que l'équipement et les ressources le permettent.

La sécheresse est donc à considérer, non pas dans l'absolu de la valeur de la pluviométrie (qui conduit plutôt à la notion d'aridité), mais dans le rapport à ce qui est la norme de celle-ci. La caractérisation de ses effets sur les cultures (sécheresse de type agricole) doit donc faire intervenir la variabilité des facteurs climatiques en entrée du bilan hydrique (pluie, mais également ETP) sur une durée suffisamment longue pour tenir compte du stockage dans le réservoir-sol, dont les caractéristiques jouent également pour moduler l'intensité des effets. Si l'on doit avoir recours à l'irrigation, c'est le niveau des ressources en eau qui va conditionner les possibilités de pallier la sécheresse agricole. C'est alors essentiellement la pluviométrie des périodes d'automne au printemps qui doit être évaluée par rapport à la normale, car elle doit permettre la recharge des nappes et l'écoulement vers les réserves d'eau. Il s'agit alors de la sécheresse hydrologique.

La sensibilité à la sécheresse dépend fortement du degré d'adaptation, qui est généralement lié à la fréquence de l'événement (par définition, les événements extrêmes sont redoutables, car se produisant peu fréquemment). Historiquement, on peut noter une fréquence non nulle, mais finalement sans mesure particulière d'adaptation (sauf dans certaines régions régulièrement exposées, et de plus disposant de ressources en eau suffisantes comme la Provence) jusqu'à l'année 1976, qui a eu un impact considérable par son ampleur spatiale et sa durée, mais aussi parce qu'elle frappait sur une agriculture en pleine expansion technologique. Le développement de l'irrigation est apparu, d'abord dans le Sud-ouest, puis en remontant progressivement vers le Nord, comme le remède efficace pour protéger une agriculture hautement productive. La multiplication ultérieure des épisodes de sécheresse après 1976 (10 sur les 20 dernières années) justifie a posteriori ce développement de l'irrigation sur le seul critère de la production. Mais, à l'inverse, le volume de la ressource fortement affecté par ces épisodes à répétition, ainsi que la montée en puissance des autres usages de l'eau, remettent en cause le bien-fondé de l'irrigation, plus spécialement en période d'étiage estival.

Quelles que soient les mesures à préconiser pour atténuer la tension sur cet usage de l'eau pour l'irrigation, il est important de souligner que, si l'agriculture dépend de l'eau, à l'inverse, la ressource en eau dépend de l'agriculture. Environ 40% de la pluie reçue est restituée à la nappe sous un couvert de prairie qui couvrirait la France entière. Par ailleurs, une plante qui transpire refroidit sensiblement (2 à 3°C) l'air ambiant au dessus d'elle, et un couvert végétal bien alimenté en eau a le même effet au niveau d'un paysage ou d'une petite région. S'il est important de réviser les bases conduisant à adopter les pratiques d'irrigation, il faut se rappeler en même temps qu'un territoire sans eau, particulièrement en été, est à la fois physiquement plus difficile à supporter et esthétiquement moins apprécié qu'un paysage agricole vert et frais. Cet aspect est difficile à quantifier, et il ne sera pas repris plus loin. Il a donc paru nécessaire de le souligner ici, compte tenu du poids croissant du tourisme en milieu rural et de la valeur esthétique du paysage en général.

Références bibliographiques

Agreste (2005). Graphagri, l'agriculture, la forêt et les industries agroalimentaires, SCEES, 168 p

Annequin J.M. (2004). L'agriculture en 2003 en Europe et en France : les grands pays agricoles affectés par la sécheresse, *INSEE Première*, 974, 1-4

Anonyme (1990). Les leçons de la sécheresse 89, *Sécheresse*, 1, 70-71

Aussenac G. (1978). La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers, *Revue Forestière Française*, 2, 103-114

Avila F. (2005). Mémoires du temps en Vic-Bilh (sud-ouest de la France) : paysans et aléas climatiques 1960-2005, congrès de l'AIC, Gênes (Italie), 7-11/09/2005, 181-184

Baculat B., Pinguet A., Samie C. (1976). Note préliminaire sur la sécheresse et ses conséquences agronomiques au cours de la campagne agricole 1975-1976, *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture, Paris, 48*, 879-884

Baldocchi D. (2005). The carbon cycle under stress, *Nature*, 437, 483-484

Barnston A.G., Schikedanz P.T. (1984). The effect of irrigation on warm season precipitation in the southern great plains, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 865-888

Berthoumieu J.F. (2003). Canicule et sécheresse sévères 2003. Eléments climatologiques en Lot-et- Garonne (1) et en Tarn-et-Garonne (2), notes de l'ACMG Agen, septembre 2003, 10 p

Berthoumieu J.F. (2005). Sécheresse sévère 2005. Eléments climatologiques en Lot-et- Garonne, note de l'ACMG Agen, août 2005, 8 p

Besleaga N. (1990). La sécheresse en France : 1976-1990, note Météo-France, 49 p

Besleaga N. (1992). Les sécheresses en France, document interne no 4, Météo-France, 29 p

Bellocq A. (1979). La sécheresse de l'automne 1978 en France. Aspect pluviométrique, *La Météorologie*, 16, 229-256

Beniston M. (2004). The 2003 heat wave in Europe: a shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations, *Geophysical Research Letters*, 31, doi: 10.1029/2003GL018857

Boucher O., Myhre G., Myhre A. (2004). Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate, *Climate Dynamic,* 22, 597-603

Brisson N., Huard F., Graux A.I., Lebas C., Debaeke P., Lemaire G., Itier B. (2006). "Evaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique", rapport d'étude pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 31 p.

Brochet P. (1977). Aspects climatologiques de la sécheresse de 1976. *Bulletin technique d'Information*, 324-325, 599-614

Brochet P. (1977). Aspects climatiques de la sécheresse de 1976. *La Météorologie*, 7, 81-103

Byé P., Pernet F. (1976). La sécheresse de 1976. Réflexions sur la position de l'agriculture dans l'économie. Note interne, INRA-IREP, Grenoble, 129 p.

Carlier M. (1976). Commentaires sur la présentation de MM.Baculat , Pinguet et Samie, *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture, Paris, 48*, 884-885

Cavalié J., Longueval C. (1993). La sécheresse dans la région Midi-Pyrénées, *Chambres d'Agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 28-31

Changnon D., Sandstrom M., Schaffer C.(2003). Relating changes in agricultural practices to increasing dew points in extreme Chicago heat waves, *Climate Research*, 24, 243-254

Choisnel E. (1977). Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol, *La Météorologie*, 11, 103-159

Choisnel E. (1985). Un modèle agrométéorologique opérationnel de bilan hydrique utilisant des données climatiques. In : *Les besoins en eau des cultures*, INRA Paris, 115-132

Choisnel E., Barbini F. (1992). Suivi de la sécheresse en France : le cas des années 1989-1990. 16ème Conférence régionale européenne de la CIID, 21-27/06/1992, Budapest (Hongrie), 9p

Chuine I., Yiou P., Viovy N., Seguin B., Daux V., Le Roy Ladurie E. (2004) Back to the Middle Ages ? Grape harvest dates and temperature variations in France since 1370. *Nature, 432, 289-290.*

Ciais P. et al. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 437,529-533

Coulomb R. (2003). Introduction. In: *Le partage des usages de l'eau. Actes de la Conférence – Débat du 13 juin 2003 à l'Agence de l'Eau Adour-Garonne*. 88 p.

Courault D., Clastre P., Guinot J.P., Seguin B. (1994). Analyse des sécheresses 1988 à 1990 en France à partir de l'analyse combinée de données satellitaires et d'un modèle agrométéorologique. *Agronomie*, 14, 41-56

Courault D., Seguin B., Olioso A. (2006). Review about estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modelling approach. *Irrigation and Drainage Systems*, 19 (sous presse)

Courault D., Jacob F., Benoit V., Weiss M., Marloie O., Hanocq J.F., Fillol E., Olioso A., Dedieu G., Gouaux P., Gay M., French A. (2006). Influence of agricultural practices on micrometeorological spatial variability at local and regional scales, *International Journal of Remote Sensing*, soumis

Daudet F.A., Valancogne C., Iaho N., Katerji N. (1978). Bilan hydrique d'une culture de blé d'hiver pendant la sécheresse exceptionnelle de 1976. Importance des remontées capillaires. *Bulletin du G.F.H.N*., 2, 75-79

Debaeke P. (2003). Irrigation,supplemental. In : *Encyclopedia of water science*, B.A.Stewart & T.Howell (eds), Marcel Dekker inc., New-York, 537-539

Demolon A., Geslin H. (1938). Le printemps de 1938 et l'approvisionnement en eau des récoltes. *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture, Paris,* 21,702-709

De Martonne E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique : l'indice d'aridité, *La Météorologie*, 10/1926, 449-459

De Villèle O. (1999). L'irrigation. In : *Un point sur l'eau . I : milieu naturel et maîtrise*, INRA éditions, Paris, 159-169

Dorize L. (1990). Economie et climat en France, de 1976 à 1989, *Sécheresse*, 1,17-29

Dubreuil V. (1997). La sécheresse dans la France de l'ouest : une contrainte climatique trop souvent oubliée, *Sécheresse*, 8, 47-55

Emberger L. (1930). La végétation de la région méditerranéenne ; essai d'une classification des groupements végétaux, *Revue Générale de Botanique*, 42,705-721

Fort J.L. (1993). Evolution des exploitations agricoles et irrigation en Poitou-Charentes, *Chambres d'Agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 34-36

Geslin H., Servy J. (1935). Note sur un indice caractérisant la sécheresse du point de vue agronomique. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 200,416-418

Geslin H., Hallaire M. (1949). Quelques observations sur la sécheresse en 1949. *Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture, Paris,*17,684-689

Gleyses G., Rieu T. (2004). *L'irrigation en France. Etat des lieux 2000 et évolution*. CEMAGREF éditions, 60 p

Hallaire M. (1977). La sécheresse de 1976 et la production végétale, *Bulletin Technique d'Information*, 324-325, 651-657

Harranger J. (1978). Les conséquences de la sécheresse de 1976 sur la végétation de nombreux arbres en 1977, *Phytoma*, 04/1978, 25-26

Henrion C., Pecquet B. (1977). Sécheresse du printemps et de l'été 1976 (Film des évènements), *Bulletin Technique d'Information*, n° 324-325, 595-597

Hurand P., Tardieu H. (1998). Gestion de la demande en eau dans un contexte de ressource limitée. In : *Traité d'irrigation*, 882-900

Itier B., Brisson N., Doussan C., Tournebize R. (1996). Bilan hydrique en agrométéorologie. In : *Actes de l'Ecole-Chercheur INRA en Bioclimatologie - Tome II*. INRA, Paris, 383-397

INRA (1977). La sécheresse de 1976, note interne, 15 p.

Katerji N., Daudet F., Valancogne C. (1984). Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures. Détermination et importance. *Agronomie*, 4(8),779-787

Katerji N., Bruckler L., Debaeke P. (2002). L'eau, l'agriculture et l'environnement. Analyse introductive à une réflexion sur la contribution de la recherche agronomique, *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 46, 39-50

Larivière G. (1985). La sécheresse en France en septembre 1985, *La Météorologie*, 10, 54

Lecarpentier C. (1977). Essai provisoire de caractérisation de la sécheresse de 1976 par l'établissement de bilans hydriques et leur confrontation avec les résultats d'études fréquentielles antérieures. *Bulletin Technique d'Information*, 324-325, 615-626

Leroux M., Aubert S., Comby J., Mollica V., Passerat de la Chapelle P., Reynaud J. (1992). Déficit pluviométrique hivernal sur la France : autopsie des agglutination,s anticycloniques des hivers de 1988 à 1992, *Sécheresse*, 3, 103-113

Luterbacher J., Dietrich D., Xoplaki E., Grosjean M., Wanner H. (2004). European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500, *Science*, 303, 1499-1503

Meinke H., Stone R. (2005). Seasonal and inter-annual climate forecasting. The new tool for increasing preparedness to climate variability and change in agricultural planning and operations, *Climatic Change*, 70, 221-253

Mekki I. (2003). Analyse et modélisation de la variabilité des flux hydriques à l'échelle d'un bassin versant cultivé alimentant un lac collinaire du domaine semi-aride méditerranéen (Oued Kamech, Cap-Bon, Tunisie). Thèse de doctorat, Sciences de l'eau, Université Montpellier II, 177 p.

Moore N., Rojstaczer S. (2001). Irrigation-induced rainfall and the great plains, *Journal of Applied Meteorology*, 40, 1297-1309

Namias J. (1978). Recent drought in California and Western Europe, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 16(3), 435-458

Planton S., Spagnoli B.(2003). Quand la simulation numérique reproduit et explique le réchauffement des nuits d'été, *La Météorologie*, 42,4-5

Pointet T. (2000). Qu'est-ce qu'une nappe aquifère? *Science et Vie, hors série 'Menaces sur l'eau'*, no 211,20-25

Ramel J.P. (2003). Canicule et sécheresse 2003 dans le département des Bouches-du-Rhône (1) et du Vaucluse (2), notes internes , CIRAME Carpentras, septembre 2003, 11p

Ramonet I., 2002. Une ressource stratégique. In: *La ruée vers l'eau. Le Monde diplomatique, Manière de voir*, 65, 6-7.

Renoux J.L. (1993). Trois années de sécheresse consécutives en Auvergne, *Chambres d'Agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 32-33

Rieu M. (1999). L'eau agricole en France : état des lieux et perspectives, *Bulletin du CGGREF*, 53, 63-84

Robic M.C., Plet F., Rey V., Mathieu M. (1982). Accident climatique et fonctionnement de la société agricole. La sécheresse de 1976 chez les éleveurs de la Nièvre, *l'Espace Géographique*, 2, 111-123

Ruget F., Le Bas C., Souverain F., Cloppet E., Morvan X., Arrouays D., Guérif M. (2005). Indice de productivité :IPP. Produit-pilote. Note interne, INRA CSE Avignon, 20p.

Ruget F., Cloppet E., Guérif M., Le Bas C., Morvan X., Souverain F. (2006). Les composantes du bilan hydrique sur la France, en sortie des simulations effectuées pour l'étude sur les indices de productivité de prairie (IPP) réalisée conjointement par l'INRA et Météo-France pour le compte du MAP. Note interne, INRA CSE Avignon, 9 p.

Sanson J., Pardé M. (1950). La sécheresse des années 1942-1949 en France. *Revue de Géographie Alpine*, 369-403

Schär C., Vidale P.L., Lüthl D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A., Appenzeller C.(2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves, *Nature*, 427, 332-336

Scherer J.C. (1993). Caractérisation des sécheresses depuis 1976, *Chambres d'Agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 16

Sénat (2004). n°195, annexe au procès-verbal de la séance du 3 février 2004, 399p, disponible sur le site http://www.senat.fr/rap/r03-195/r03-195.html

Seguin B., Baelz S., Monget J.M., Petit V. (1982). Utilisation de la thermographie IR pour l'estimation de l'évaporation régionale. 1. Mise au point méthodologique sur le site de la Crau, *Agronomie*, 2, 7-16

Seguin B., Lagouarde J.P., Savane M. (1991).The assessment of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infrared data, *Remote Sensing of the Environment,*35,141-148

Seguin B., Baculat B., Baret F., Brisson N., Huard F., Ruget F. (2004). An overview of the consequences of the 2003 summer for agriculture in France. 8th European Society of Agronomy congress. Copenhague (Danemark), 11-15 july 2004. Proc. ed. by ESA,335-336

Steinmetz S., Lagouarde J.P., Delecolle R., Guerif M., Seguin B. (1989). Evapotranspiration and water stress using thermal infrared measurements. A general review and a case study on winter durum wheat in southern France. Symposium on Physiology-breeding of winter cereals for stressed mediterranean environments, ICARDA-INRA, 3-6 juillet 1989, Montpellier. C.R. ed par l'INRA, 89-114

Stott P.A., Stone D.A., Allen M.R. (2004). Human contribution to the European heatwave of 2003, *Nature*, 432, 610-613

Tardy Y., Probst J.L. (1992). Sécheresses, crises climatiques et oscillations télé-connectées du climat depuis cent ans, *Sécheresse*, 3, 25-36

Terrible J.N. (1992). Quatre années de sécheresse, *Chambres d'Agriculture*, 799, 1-4

Terrible J.N. (1993). Approche de la sécheresse, *Chambres d'Agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 3-6

Terrible J.N., Scherer J.C. (1993).Tableau synoptique des sécheresses, *Chambres d'Agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 13-15

Trouvat J.L. (1997). Concepts de base de la gestion quantitative de la ressource en eau. *In: Lacroix F. (Ed). Irrigation, outil de qualité et de régularité de la production agricole pour les marchés et les industries d'aval. La gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin versant: l'exemple du Sud-Ouest,* [AFEID-AGPM], 15-10-1997. Antony, AFEID, 121-136

Annexe 1. Le bilan hydrique : estimation des termes

(d'après Itier et al., 1996)

1. La réserve en eau du sol

Dans l'analogie réservoir du sol, on est amené à considérer la taille maximale de ce réservoir (figure 1). Si cette taille est définie par rapport aux possibilités de prélèvement d'eau par les plantes, deux valeurs d'humidité, caractéristiques du sol, sont nécessaires : la capacité au champ et le point de flétrissement permanent.

- **La capacité au champ** (θ_{cc}) représente la valeur de l'humidité au-dessous de laquelle les forces de capillarité deviennent prépondérantes. L'eau est alors retenue dans le sol par capillarité et ne s'écoule plus par gravité. Lorsque le sol atteint la capacité au champ, il contient la plus grande quantité d'eau possible avant que celle-ci ne s'écoule rapidement en profondeur. De façon pratique, on considère en général que θ_{cc} correspond à un potentiel hydrique de -0,33 bar.
- **Le point de flétrissement permanent** (θ_{fp}) représente la valeur d'humidité du sol à partir de laquelle les forces de capillarité et d'adsorption qui lient l'eau au sol sont telles que les plantes ne peuvent l'extraire pour leurs besoins de transpiration et de croissance. La plante se flétrit alors. On admet en général que θ_{fp} correspond à un potentiel hydrique de -16 bars, mais cette valeur dépend en fait du type de plante et des transferts sol-plante.

On peut ainsi définir la **réserve utile du sol** (RU) qui est la quantité d'eau potentielle totale dans le sol à laquelle la plante peut accéder (Zr est ici la profondeur d'enracinement) :

$$RU = (\theta_{cc} - \theta_{fp}) \cdot Z_r$$

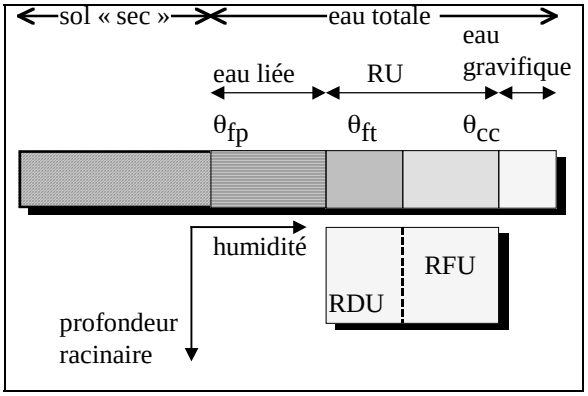


Figure 1. Valeurs de l'humidité définissant la réserve utile (RU) ainsi que la réserve facilement utilisable (RFU) et difficilement utilisable (RDU).
L'eau gravifique est l'eau pouvant circuler sous l'action de la gravité.

On s'est rendu compte, au travers d'enquêtes, que les agriculteurs avaient souvent une idée très vague des profondeurs d'enracinement de leurs cultures, ce terme jouant un rôle important dans la définition de la RU. Pour faciliter l'estimation de cette profondeur, on peut trouver dans la littérature des valeurs représentatives telles que celles présentées figure 2.

On décompose habituellement cette réserve utile en une somme d'une réserve facilement utilisable (RFU) et une réserve difficilement utilisable (RDU) par la plante (cf. figure 1), la valeur de l'humidité séparant ces deux domaines étant le point de flétrissement temporaire (la détermination de cette valeur sera abordée plus loin à propos de l'estimation de l'ETR).

La réserve utile dépend de la texture et de la structure du sol, les sols limoneux présentant en général la plus grande réserve utile (tableau 1 et figure3.a). On peut affiner cette définition de réserve utile en discrétisant le volume de sol prospecté par les racines et en tenant compte du fait que la densité racinaire diminue avec la profondeur (figure 3.b).

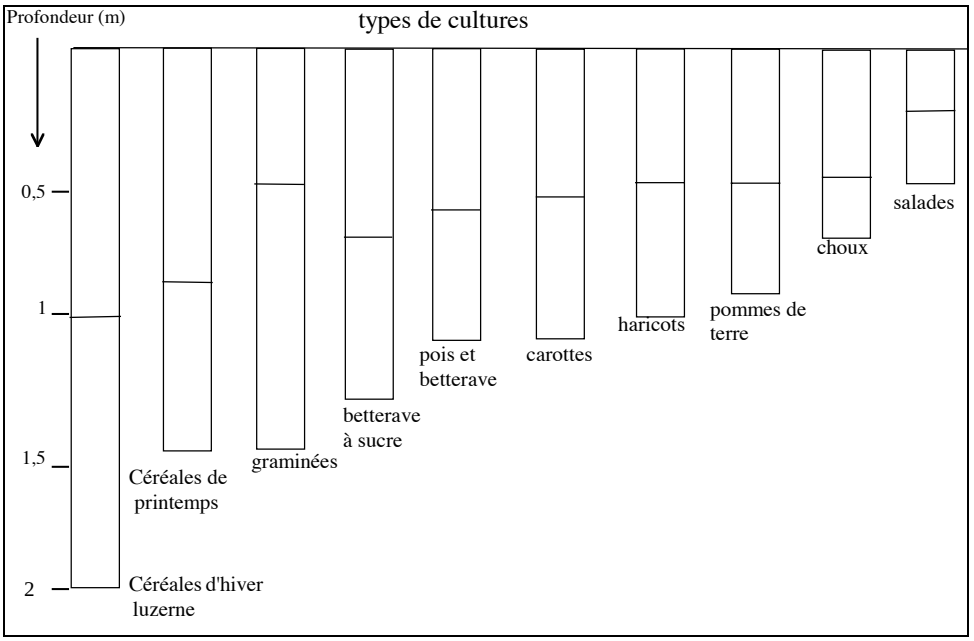


Figure 2. Profondeurs typiques d'enracinement de quelques cultures.
Les profondeurs minimum et maximum sont indiquées (d'après B.S.I., 1989)

Tableau 1. Réserve utile "moyenne" de divers types de sols (d'après B.S.I., 1989)

Type de sol	Réserve Utile par unité de profondeur (mm/cm)
Sableux	0.8
Sablo limoneux	1.2
Limono sableux	1.7
Limono argilo sableux	1.7
Argilo sableux	1.7
Limono argileux	1.8
Limon fin argileux	1.8
argileux	1.8
argilo limoneux	1.8
limon fin sableux	1.9
Limon fin	2.2
tourbeux	3.2

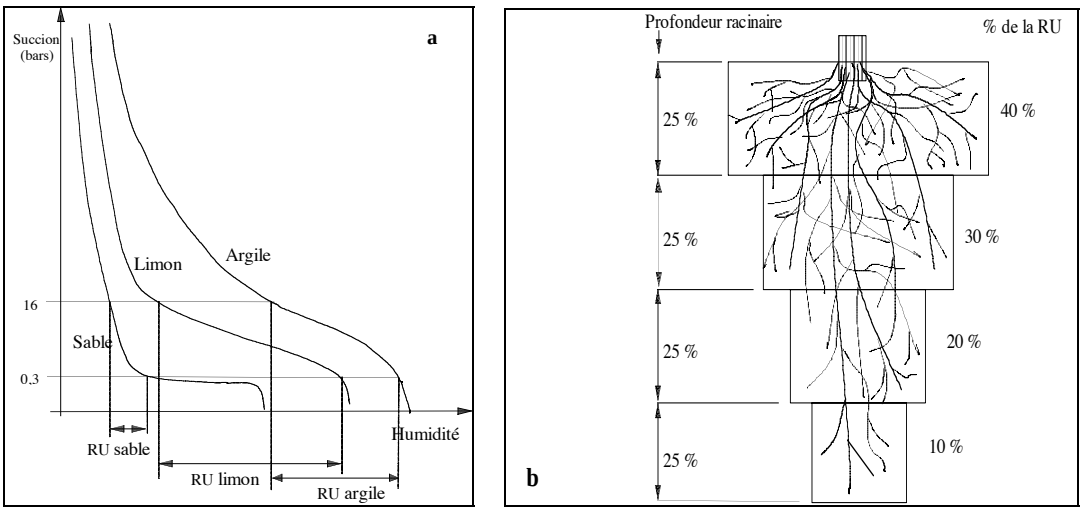


Figure 3. -a) évolution des valeurs caractéristiques d'humidité (capacité au champ et point de flétrissement permanent) en fonction du type de sol. - b) discrétisation de la Réserve Utile en fonction de la profondeur en tenant compte de la décroissance de la densité racinaire avec la profondeur.

2. L'évapotranspiration

2.1. Définitions

- ETref : Evapotranspiration de Référence, qui correspondait anciennement à l'évapotranspiration mesurée d'un couvert de gazon ras, bien irrigué (évapotranspiration potentielle). Actuellement, elle correspond plutôt à un calcul provenant d'une formule considérant différents paramètres climatiques pour estimer la demande évaporative de l'atmosphère.
- ETM : Evapotranspiration Maximale, elle correspond à l'évapotranspiration maximum du couvert considéré bien irrigué.
- ETR : correspond à l'évapotranspiration réelle de la culture. Elle est fonction du stade phénologique et de l'état hydrique du sol. Elle reste inférieure ou égale à ETM.

L'estimation d'ETR peut se faire par mesure directe (lysimètres, méthode des corrélations turbulentes, flux de sève) ou indirecte (méthodes du rapport de Bowen, aérodynamique). Cependant, ces méthodes de mesure posent des problèmes de représentativité et/ou des difficultés techniques les rendant difficiles d'accès aux agriculteurs. C'est pourquoi on utilise généralement en agrométéorologie des *estimations d'ETR calculées*. Ces calculs sont effectués sur une base offre/demande : les données climatiques permettent de définir la demande évaporative de l'atmosphère, tandis que les connaissances agronomiques concernant le comportement des cultures à différents stades et l'estimation de la disponibilité de l'eau dans le sol définissent l'offre.

La démarche de calcul de ETR à partir de ETref est la suivante :

$$ETM = \underline{kc} \cdot ETref$$

$$\downarrow$$

$$ETR = \underline{ks} \cdot ETM$$

$$avec : kc = \underline{kcb} + \underline{ke}$$

- **kc** est le coefficient cultural ; Wright (1982) a proposé de le décomposer en un terme dépendant de la plante (kcb) et un terme dépendant du sol (ke).
- **kcb** est le coefficient cultural de base, indiquant les possibilités de transpiration maximale de la culture envisagée suivant son stade phénologique et l'approfondissement des racines. Il existe des valeurs de kcb établies pour diverses cultures (tableau 2) ainsi qu'une courbe généralisée de kcb donnant son évolution tout au long de la croissance de cette culture (figure 4). Normalement, le terme kcb ne dépasse pas une valeur de l'ordre de 1,2. Si c'est le cas, il est probable que les expérimentations menées pour déterminer kcb ont été faites sur une surface trop petite posant des problèmes d'advection locale. De plus, il est nécessaire d'utiliser le coefficient cultural avec l'équation donnant Etref à partir de laquelle ils ont été déterminés.
- **ke** est un coefficient tenant compte de l'évaporation du sol nu (fonction de la couverture par la végétation), le plus souvent exprimé par (Wright, 1982) :

$$ke = (1 - kcb)(1 - \sqrt{\frac{t}{td}})\, fw$$

  où t est le temps écoulé après la fin de la pluie ou de l'irrigation, td est un temps caractéristique du type de sol pour l'évaporation (5 jours pour un sol limoneux) et fw est la fraction de sol mouillé. Ce paramètre fw dépend essentiellement du mode d'irrigation, il peut valoir 1 en irrigation par aspersion.
- **ks** est le coefficient de sécheresse ou de stress. Deux types de modèles sont principalement utilisés pour le représenter (figure5). Le premier correspond à la formule de Jensen *et al.* (1970), très utilisée aux USA :

$$ks = \frac{Log(ASW + 1)}{Log(101)}$$

où ASW est le pourcentage d'eau disponible restante. Bien que très simple, cette formule ne tient pas compte des différences entre cultures, sols et climats. Pour pallier ces manques, et sur la base d'observations expérimentales, le deuxième type de modèle proposé pour ks a la forme d'une fonction à seuil. En deçà d'une fraction p consommée de la réserve utile du sol ETR = ETM. Au-delà, ks (équivalent à ETR/ETM) décroît linéairement jusqu'à s'annuler. La valeur du seuil p dépend de la capacité physiologique de la plante à absorber l'eau du sol à des potentiels hydriques plus ou moins faibles, mais aussi de l'intensité de la demande évaporative (qui influe, entre autres, sur la résistance au transfert de l'eau dans le sol). Le tableau 3 présente un certain nombre de valeurs de (1-p) classées suivant ces deux facteurs. On notera que la valeur de l'humidité au seuil p correspond au point de flétrissement temporaire définissant la RFU et la RDU.

Tableau 2. Coefficients culturaux de base (kcb) déterminés pour quelques cultures
(d'après Doorenbos et al., 1978)

Plante	coefficient initial	coefficient en plein développement	coefficient moyen sur la période de culture
Haricot	0,4 - 0,5	0,95 - 1,1	0,85 - 0,9
Chou	0,4 - 0,5	0,95 - 1,1	0,7 - 0,8
Coton	0,4 - 0,5	1,05 - 1,2	0,8 -0,9
Maïs	0,3 - 0,5	1 - 1,15	0,8 - 0,95
Pois	0,4 - 0,5	1,05 - 1,2	0,8 - 0,95
Pomme de terre	0,4 -0,5	1,05 - 1,2	0,75 - 0,9
Oignon	0,4 - 0,6	0,95 - 1,1	0,8 - 0,9
Riz - pluvial - inondé	0,5 1,1	1,1 - 1,2 1,1 - 1,2	 1,05 - 1,2
Sorgho	0,3 - 0,4	1 - 1,15	0,75 - 0,85
Betterave	0,4 - 0,5	1,05 - 1,2	0,8 - 0,9
Canne à sucre	0,4 - 0,5	1 - 1,2	0,85 - 1,05
Tournesol	0,3 - 0,4	1,05 - 1,2	0,75 - 0,85
Tabac	0,3 - 0,4	1 - 1,2	0,85 - 0,95
Tomate	0,4 - 0,5	1,05 - 1,25	0,75 - 0,9
Luzerne	0,3 - 0,4	1,1	0,85 - 1,05
Banane	0,4 - 0,6	1 - 1,1	0,7 - 0,8

Premier chiffre : Valeur sous forte humidité (Hrmin>70 %) et vent faible (U<5 m/s).
Deuxième chiffre : faible humidité (Hrmin<20 %) et vent fort (>5 m/s).

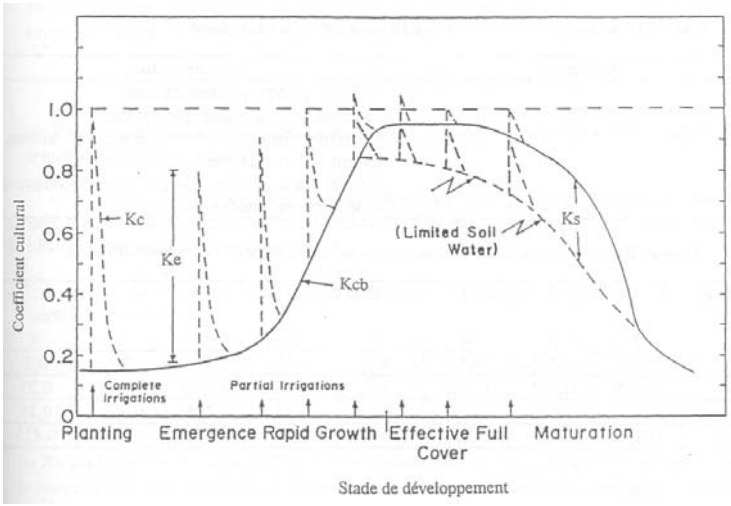


Figure 4. Courbe du coefficient cultural de base généralisé (kcb) montrant le coefficient d'évaporation du sol (ke) et le coefficient de stress (ks).

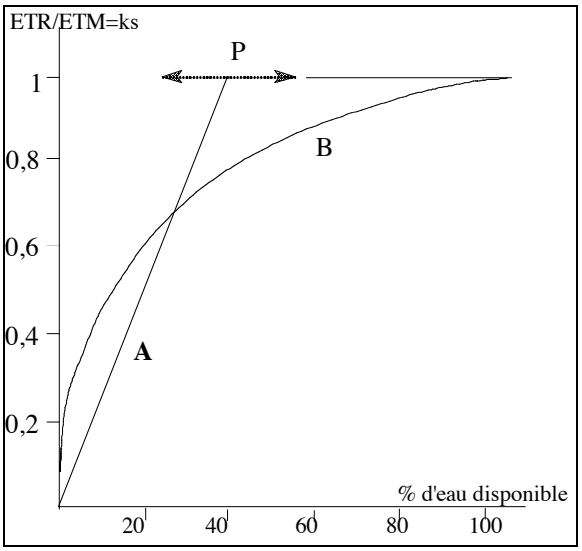


Figure 5. Evolution du coefficient de stress ks en fonction du pourcentage d'eau disponible suivant la formule (courbe B) de Jensen (1970) ou suivant une courbe à seuil (courbe A).
Le coefficient p qui définit la limite entre RFU et RDU varie de 30 à 60% quand ETref augmente.

Tableau 3.a. Catégories de cultures classées selon l'aptitude à la sécheresse

Groupe n°	Type de culture
1	oignon, poivre, pomme de terre
2	banane, choux, vigne, pois, tomate
3	luzerne, haricot, citron, arachide, ananas, tournesol, melon, blé
4	coton, maïs, olivier, sorgho, soja, betterave à sucre, canne à sucre, tabac

Tableau 3.b. Valeurs de RFU/RU = 1-p classées suivant les catégories de cultures et l'ETM

Groupe n°	ETM (mm/j)							
	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,5	0,425	0,35	0,3	0,25	0,225	0,2	0,2
2	0,675	0,575	0,475	0,4	0,35	0,325	0,275	0,25
3	0,8	0,7	0,6	0,5	0,45	0,425	0,375	0,35
4	0,875	0,8	0,7	0,6	0,55	0,5	0,45	0,425

2.2. Estimation d'ETref

Par rapport aux données météo disponibles, de nombreuses formulations ont été développées depuis les années 40. Tout d'abord basées sur des formulations empiriques (à partir du rayonnement ou de la température), ces estimations se sont fondées ensuite sur des approches plus "physiques". On ne fera pas ici un inventaire de l'ensemble de ces formules pour présenter seulement les plus connues.

• Parmi les formules empiriques, on distinguera les méthodes fondées sur le rayonnement et celles fondées sur la température (dans la suite de ce paragraphe a et b représentent des coefficients de calages suivant le site et F des fonctions liées à la durée du jour) :

- *Méthodes utilisant le rayonnement* : la plus connue est celle de Jensen (1974), utilisée sur des intervalles de temps de 10 jours :

$$ETref = a(T - b)Rs$$

où T est la température moyenne et Rs le rayonnement solaire. Turc (1961) reprend le même type de formulation en y incluant l'humidité de l'air.

- *Méthodes utilisant la température* : elles permettent d'utiliser uniquement la température qui est la donnée météo la plus facile à obtenir. Les plus utilisées étaient celles de Thornthwaite (1948) et de Blaney et Criddle (1950) :

$$ETref = \frac{aT^b}{F} \qquad \text{(Thornthwaite, 1948)}$$

$$ETref = (a + bT)F \qquad \text{(Blaney \& Criddle, 1950)}$$

Plus récemment, Hargreaves (1974) a proposé une formule qui permet de tenir compte du rayonnement par la différence entre Tmin et Tmax :

$$ETref = a(T + b)\sqrt{T_{\max} - T_{\min}}$$

où a est proportionnel au rayonnement solaire. Ces formulations sont utilisées sur un pas de temps décadaire ou mensuel.

• Les formulations ayant une base physique sont celles de Penman et Penman-Monteith, fondées sur le bilan de masse et d'énergie du couvert (cf. Actes de l'Ecole Chercheur en Bioclimatologie, tome 1).

- L'*équation de Penman* combine des termes "d'énergie disponible" et un terme "aérodynamique" :

$$L \cdot ETref = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a Cp \dfrac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma}$$

où Rn est le rayonnement net, G le flux de chaleur du sol, γ la constante psychrométrique, Δ la pente de la courbe de pression de vapeur saturante à la température ambiante, ρ_a la densité de l'air, Cp la capacité calorifique massique de l'air, e_s-e_a le déficit de saturation et r_a la résistance aérodynamique.
Dans le cadre d'une application agrométéorologique, les paramètres climatiques ne peuvent être que des moyennes journalières. Il a ainsi été nécessaire d'accepter un certain empirisme dans les formules opérationnelles comme la très répandue "FAO 24 corrected Penman method" :

$$ETref = a(T + b)\sqrt{T_{\max} - T_{\min}}$$

où U est la vitesse moyenne du vent, a et b des coefficients calibrés, C est un coefficient correcteur tenant compte des effets non linéaires.
Différentes formulations du terme aérodynamique ont mené à diverses formes de l'équation de Penman. Une étape supplémentaire dans l'empirisme a consisté à obtenir les termes "énergétique" et "aérodynamique" par des mesures simples. C'est le cas, par exemple, de la formule de Brochet et Gerbier (1972) qui estime le premier terme à partir de la fraction d'ensoleillement et le second à partir de l'évaporation observée grâce à un évaporimètre Piche placé sous abri.
L'équation de Penman (ou ses dérivées) a longtemps servi d'équation de référence pour le calcul de l'ETref et de nombreux coefficients culturaux ont été établis avec cette dernière. Cependant, la tendance actuelle est de remplacer le calcul standard d'ETref avec l'équation de Penman par l'équation de Penman-Monteith, ce qui ne va pas sans poser quelques problèmes.

- L'*équation de Penman-Monteith* : elle est semblable à celle de Penman mais en ajoutant une résistance supplémentaire au transfert de l'eau vapeur qui représente la résistance du couvert (r_c) :

$$L \cdot ETref = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a Cp \dfrac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma}$$

On retrouve l'équation de Penman quand r_c est nul. De même que précédemment, un certain nombre de fonctions de vent ont été introduites dans cette formulation amenant à des versions modifiées de l'équation de Penman-Monteith qui nécessitent un calage. De plus, Allen et al. (1994) ont proposé que le terme de résistance stomatique soit fixé à 70 $s.m^{-1}$ et que l'équation de P.M. ainsi modifiée remplace la FAO 24. Cette valeur fixe de r_c présente deux inconvénients : a) tout d'abord, elle

supprime l'argument fondé sur l'introduction des régulations biologiques à l'interface et donc le passage de l'équation de Penman à Penman-Monteith ; b) ensuite, cela conduit à des possibilités de calcul de valeurs supérieures à l'énergie disponible (Rn-G) par forte aridité.

On notera que, quelle que soit la formule utilisée (Penman ou Penman-Monteith), la base de temps dans une application agrométéorologique est de l'ordre de la semaine.

2.3. Le bilan hydrique dans les modèles de culture

Contrairement à une vision statique de la culture présentée ci-dessus, nous allons considérer ici l'ensemble du cycle cultural. Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager le cas d'une culture peu couvrante en début de culture (et donc un effet prépondérant du sol sur l'évapotranspiration) et l'éventualité d'apports en eau faibles par rapport à la demande. Dans cette vision dynamique, les principaux points à prendre en compte dans l'évaluation du bilan hydrique sont :

- l'augmentation de la taille du réservoir sol (RU) au cours du temps du fait de la croissance racinaire qui permet de prospecter des volumes de sol de plus en plus importants ;
- l'estimation des besoins en eau en début de culture. En effet, le coefficient cultural (kc) va fortement varier suivant une situation de sol sec ou humide en surface, soulignant l'importance de la fréquence des apports d'eau (figure 6). La décomposition de kc en kcb et ke permet de prendre en compte cet effet.

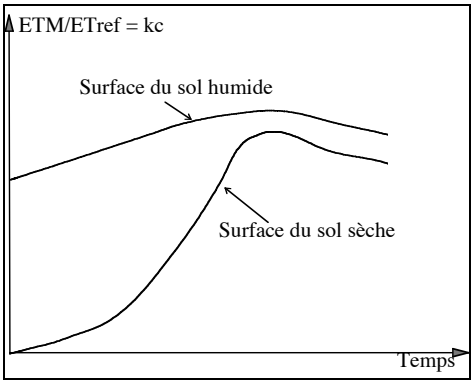


Figure 6. Variation du coefficient cultural au cours du temps (en début de culture) en cas de sol humide ou sec en surface

- le seuil RDU/RU (coefficient p, voir figure 7) va varier dans le temps en raison de l'augmentation de la profondeur d'enracinement, puis se stabilise à partir d'une certaine profondeur. Comme nous l'avons vu, il varie également avec la demande climatique et le type de plante (tableau 3 et figure 8).

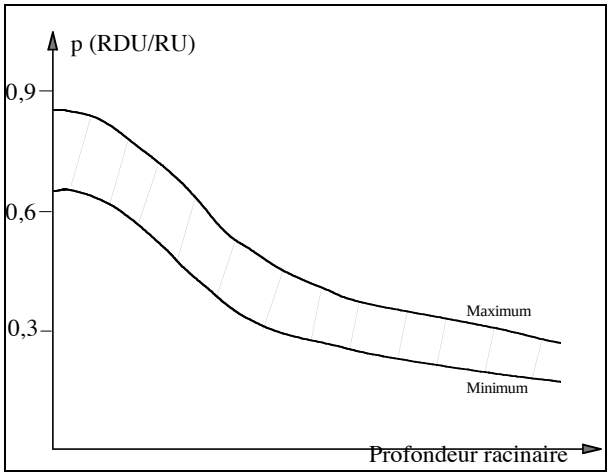


Figure 7. Variation du seuil p (ou RDU/RU) en fonction de la profondeur d'enracinement. Les courbes maximum et minimum dépendent de la demande climatique et du type de plante (régulation stomatique).

Bibliographie de l'Annexe 1.

Allen R.G., Smith M., Perrier A., Pereira L.S. (1994). An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43(2), 1-34.

B.S.I. Standards. (1988). Draft code of practice for the planning design and installation of irrigation schemes in the UK. Part 2. Irrigation water requirements. B.S.I. Standards, Technical committee AGE/30, Irrigation and drainage equipment, n° 88/73803 DC.

Brisson N., Seguin B., Bertuzzi P. (1992). Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 59, 267-287.

Doorenbos J., Kassam A. H., Bentvelder C., Uittenboogaard G. (1978). *Yield response to water.* FAO irrigation and drainage paper, 33, FAO, Rome, 144 p.

Franquin P., Forest F. (1977). Des programmes d'évaluation et analyses fréquentielles des termes du bilan hydrique. *Agronomie Tropicale*, 32(1), 1-22.

Hargreaves G.H.(1974). Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Transactions of the ASAE*, 17, 701-704.

Hillel D. (1974). *L'eau et le sol : principes et processus physiques*. Editions Vander, Louvain.

Itier B. (1994). Measurement and estimation of evapotranspiration. NATO Workshop : "Sustainability of irrigated agriculture", Vimeiro, 1994

Itier B., Flura D., Belabbes K., Kosuth P., Rana G., Figueiredo L. (1992). Relations between relative evapotranspiration and predawn leaf water potential in soybean grown in several locations. *Irrigation Science*, 13, 109-114.

Itier B., Maraux F., Ruelle P., Deumier J.M. (1995). Applicability and limitations of irrigation scheduling methods and techniques. ICID - FAO Workshop on "Irrigation Schedulding from theory to practice", Rome, 1-16.

Jensen M.E., Robb D.C.N., Franzoy C.E. (1970). Scheduling irrigations using climate-crop-soil data. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*, 96, 25-28.

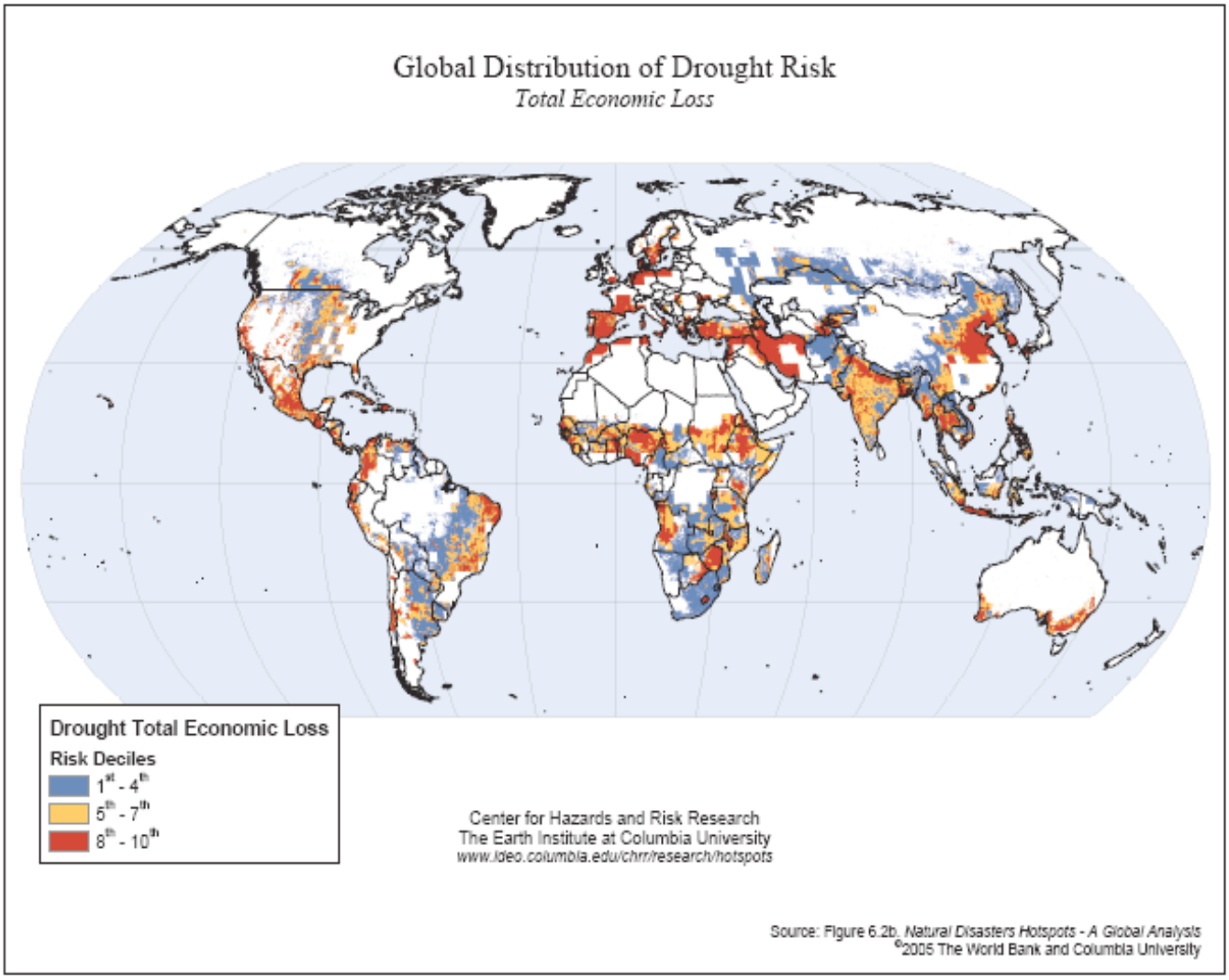
Jensen M.E. (ed.) (1974). Consumptive use of water and irrigation water reqirements. Rep. Tech., Comittee on Irrigation Water Requirements, Irrigation and Drainage Division ASCE, 227 p.

Musy A., Soutter B. (1991). *Physique du sol*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 331 p.

Wright J.L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*, 108, 57-74.

Annexe 2. Risques de pertes économiques liés à la sécheresse

(d'après le site< www.ldeo.columbia.edu>)



Exemple de caractérisation des risques liés à la sécheresse présenté dans un rapport récent de l'université Columbia de New York pour la Banque mondiale. Le critère climatologique retenu est la fréquence (sur la période 1980-2000) d'épisodes avec 3 mois consécutifs de pluviométrie inférieure à 50% de la normale. Selon ce critère, le sud de la France figure parmi les zones du globe à risques de dommages élevés.

Annexe 3. Les composantes du bilan hydrique sur la France : les sorties des simulations effectuées pour l'étude sur les indices de productivité de prairie (IPP) réalisée conjointement par l'INRA et Météo-France pour le compte du MAP

(d'après Ruget et al., 2006)

Dans le cadre de la refonte de la PAC à partir de 2007 et du dossier sur les "Indemnités compensatoires de handicaps naturels", le MAP souhaite disposer d'un outil permettant de délimiter de manière objective les zones défavorisées en raison de la "faible productivité des sols et de conditions climatiques difficiles". L'estimation de potentialités de production est réalisée à partir du modèle de culture STICS-prairie, qui présente la qualité d'intégrer les effets combinés du climat et du sol sur le fonctionnement de la culture. La culture prise comme référence est la prairie naturelle, représentée dans le modèle par les caractéristiques d'une graminée moyenne. La prairie fournit en effet un indicateur robuste, étant donné qu'elle est potentiellement productive pendant l'ensemble de l'année et sur l'ensemble du territoire. La variabilité du climat est prise en compte grâce à l'utilisation d'une grille météorologique de plus de 4 000 points sur la France. Les sols sont caractérisés à partir des informations de la carte des sols de France au millionième, construite par Infosol (INRA Orléans), grâce à l'utilisation de règles de pédotransfert. Cette base de données permet au modèle STICS, qui fonctionne au pas de temps journalier, de mettre en évidence des variations de production au niveau spatial et temporel sur la période d'étude 1993-2004.

Le produit pilote

Le domaine d'espace considéré dans cette étude est l'ensemble du territoire français continental. L'exclusion des zones montagneuses ou d'autres zones à conditions physiques défavorables (sols salins…) sera faite a posteriori par le MAP. Les résultats de cette étude sont des indices spatialisés de productivité de la prairie (IPP), et des indicateurs de variabilité de ces indices. Ils sont élaborés en deux temps : la fourniture d'un produit pilote – décrit ci-dessous -, puis, après évaluation de ce produit et améliorations, la fourniture du produit final. L'INRA CSE Avignon, responsable du modèle, a fourni à Météo-France le modèle et les fichiers caractérisant la plante, les techniques et les conditions initiales. L'INRA Infosol Orléans a fourni à Météo-France le fichier caractérisant l'ensemble des sols de France, ainsi que leurs proportions dans chacune des mailles, définies au préalable par Météo-France. Météo-France utilise ses propres données météorologiques pour réaliser les exécutions du modèle, à partir des configurations de simulation fournies par l'INRA Infosol Orléans. Les principaux paramètres de la plante réestimés spécifiquement pour la prairie concernent les fonctions suivantes : la mise en place d'indice foliaire (durées des phases, seuils de températures et vitesse de mise en place), l'efficience de conversion du rayonnement, la sénescence, la consommation d'eau (évapotranspiration maximale par rapport à l'ETP climatique) et les besoins en azote (paramètres des courbes de dilution). Le fichier-plante fourni caractérise une prairie standard moyenne à émission de feuilles permanente. L'émission de feuilles permanente permet de reproduire le fait que le couvert est composé d'espèces multiples, et que l'émission de feuilles n'est jamais terminée. Ce jeu de paramètres a été construit sur 91 situations réparties en France et sur plusieurs années, avec ou sans irrigation et fertilisation, à différentes saisons, et validé sur 177 situations ; il fait l'objet d'un article accepté à *Fourrages* (parution en 2006).

Les données climatiques utilisées sont des données quotidiennes en point de grille (grille carrée en degrés de 0,125°, soit environ 12 km). Elle est composée de 4 145 points sur la France métropolitaine et la Corse. La méthode d'interpolation retenue est la pondération par l'inverse du carré de la distance des 5 stations les plus proches. Les données sol sont issues de la Base de données Géographique des Sols de France à l'échelle du 1/1 000 000. Aucun des paramètres nécessaires à STICS n'est disponible directement dans la Base de données des Sols de France à 1/1 000 000 ; il est donc nécessaire d'utiliser des règles de pédotransfert.

Les variables de sortie sont la production cumulée, présentée sous forme d'indice (IPP, de 0 à 10), c'est-à-dire rapportée à la valeur maximale des moyennes interannuelles de toutes les mailles

(maximum de la production moyenne de toutes les mailles), la date de fin de cumul, la minéralisation, les indices de stress hydrique et azoté, et le taux de remplissage de la RU. Ces variables renseignent sur les niveaux de stress calculés et expliquent les niveaux de production estimés par le modèle. Les résultats seront présentés sous quatre formes principales :

- les histogrammes : ils présentent la fréquence des valeurs des variables de sortie des simulations individuelles, par année ;

- les cartes de valeurs des variables : les cartes présentées contiennent les moyennes interannuelles des variables intégrées par maille, c'est-à-dire après pondération sur les différents sols ;

- les cartes de variabilité : elles présentent les écarts-types et les coefficients de variations des indices de production. Les écarts-types et coefficients de variations sont calculés pour deux types de variation : la variation entre années des variables intégrées à la maille, ce qui renseigne sur la variabilité due au climat (moyennes pondérées entre sols) et la variation entre sols des variables issues des simulations moyennées sur l'ensemble des années, ce qui renseigne sur la variabilité liée à l'hétérogénéité des sols de la maille (moyennes inter-annuelles) ;

- les régressions : les outils statistiques utilisés sont des régressions multiples, soit simples, soit "stepwise", c'est-à-dire avec introduction progressive des variables selon la part de variance qu'elles expliquent. Les variables explicatives sont soit des variables d'entrée, caractéristiques du milieu (climat, sol), soit des variables intermédiaires calculées par le modèle, indépendantes du couvert, comme la minéralisation, ou explicitant le fonctionnement du couvert, comme les niveaux de stress hydrique et azoté, le taux de remplissage de la réserve hydrique du sol.

La cohérence et la pertinence des résultats sont analysées en deux temps, par le contrôle du nombre de simulations bien exécutées et grâce aux histogrammes de fréquence des variables intermédiaires et de la variable de sortie.

Les composantes du bilan hydrique en sortie des simulations

Les moyennes inter-annuelles pour l'ensemble de la France sont présentées dans les cartes ci-dessous.

Pour les variables climatiques d'entrée, la valeur moyenne des précipitations est de l'ordre de 1000 mm/an (932 mm), avec une très forte variabilité entre mailles (de 248 à 3388 mm annuels), alors que la valeur moyenne de l'ETP est de 773 mm, avec des variations allant de 449 à 1419 mm : les valeurs vont croissant du nord-ouest au sud-est, de la Manche à la Méditerranée.

Pour les valeurs calculées, il en résulte une valeur moyenne de l'ETR de 567 mm/an, qui varie en total annuel par maille de 176 à 1038 mm. Les valeurs élevées sont observées dans le Sud-Ouest et, dans une moindre mesure, sur les massifs montagneux arrosés (Ouest du Massif Central, Sud du Jura, Nord des Alpes). Les valeurs faibles se trouvent dans le Sud-Est, l'Est du Massif Central surtout et dans une grande zone s'étendant de l'embouchure de la Loire à la montagne de Reims.

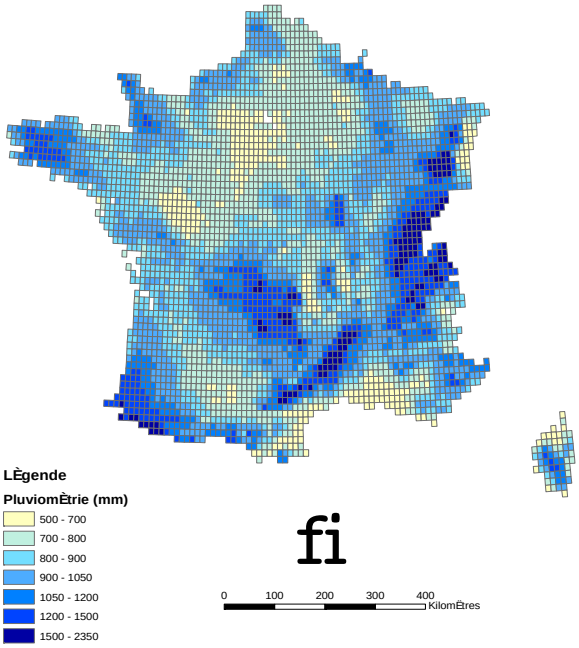
Au niveau du drainage, la valeur moyenne est de 374 mm/an, avec des valeurs extrêmes annuelles qui s'étalent de 0 à 2 836 mm. Les valeurs élevées sont observées dans les régions suivantes : Vosges, Jura, Nord des Alpes et Cévennes, puis dans une moindre mesure Ouest du Massif Central et des Pyrénées. Pour les valeurs faibles, on trouve : Bassin Parisien, bassin de la Garonne, Alsace, vallées de la Loire et de l'Allier, basse vallée du Rhône.

Au niveau des écarts-types, traduisant la variabilité inter-annuelle :

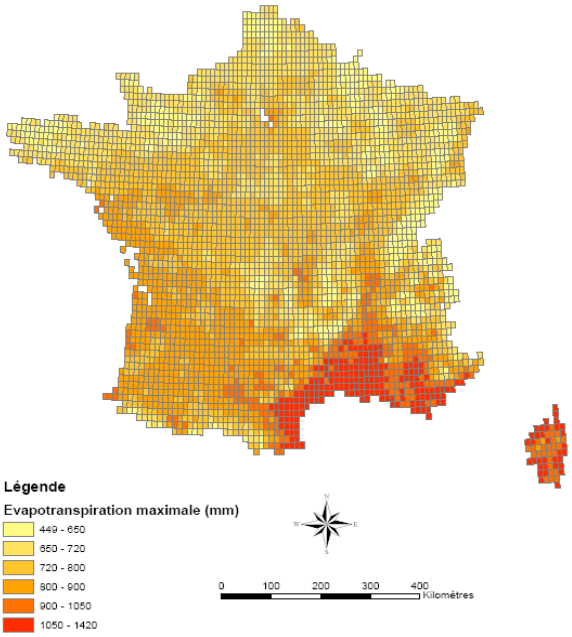
- pour la pluie, on note une variabilité forte dans les zones les plus arrosées (Cévennes, Jura, Nord des Alpes), moins fortement marquée en Bretagne et dans l'extrême Sud-Est. Elle est assez faible dans toute la zone centrale : des pays de Loire à l'Aquitaine et à la Bourgogne, y compris dans des régions bien arrosées comme le versant Ouest du Massif Central. Pour l'ETP, elle est forte sur la frange Est de la France et dans le bassin de la Garonne. Elle est variable d'une maille à l'autre et assez faible ailleurs.

- pour l'ETR, la variabilité est assez forte de la Loire à l'Alsace (grand Bassin Parisien), et plus dispersée ailleurs (pas de continuité entre mailles), sans doute à cause d'une forte influence du sol.

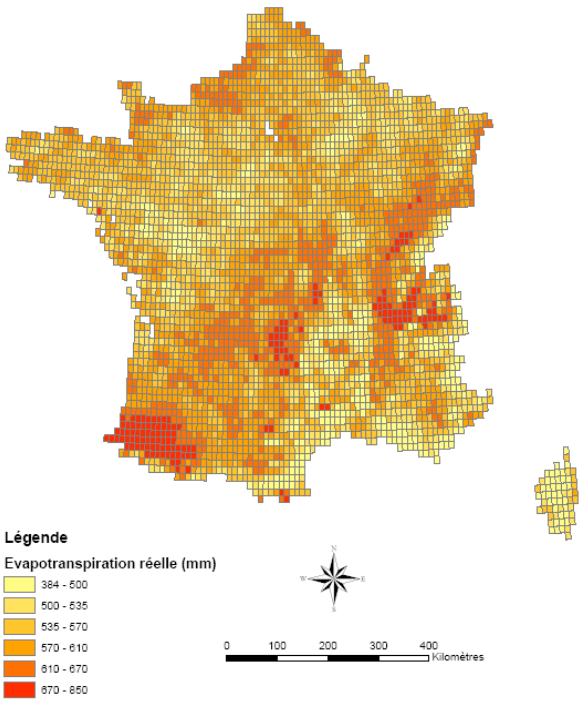
PluviomÈtrie annuelle moyenne
de 1993 ‡ 2004



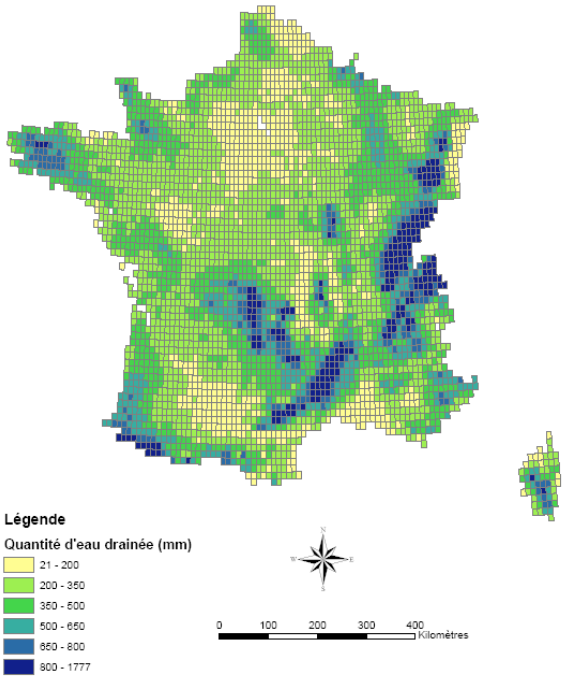
Evapotranspiration maximale moyenne annuelle
de 1993 à 2004



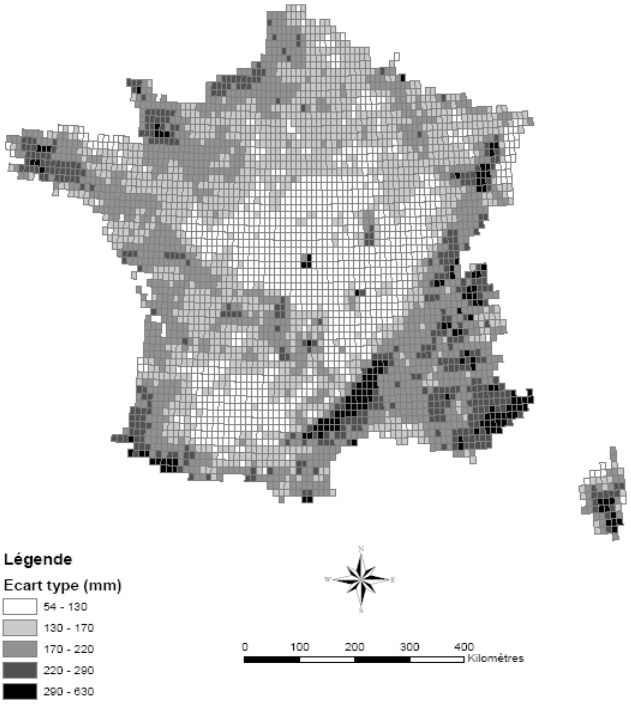
Evapotranspiration réelle moyenne annuelle
entre 1993 et 2004



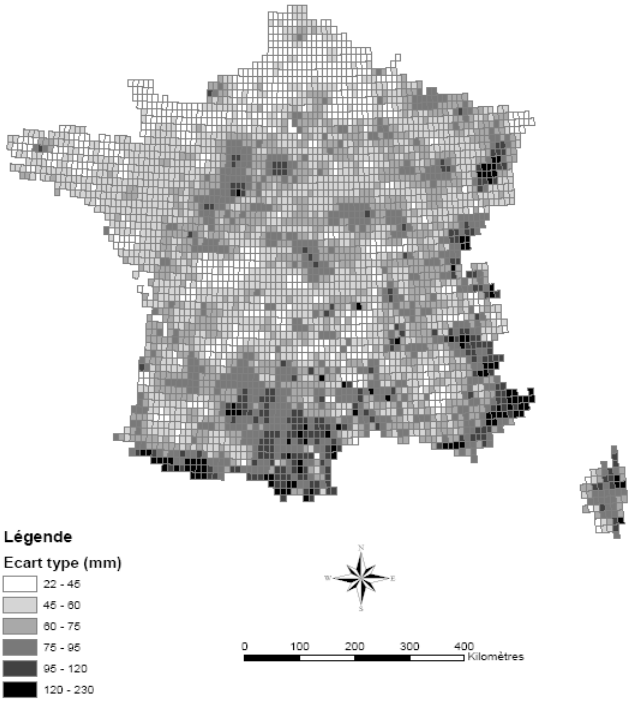
Quantité annuelle moyenne d'eau drainée
entre 1993 et 2004



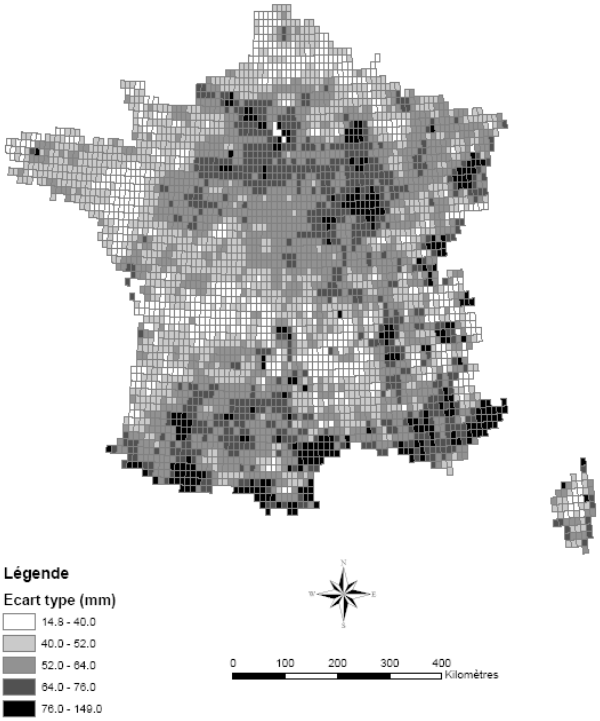
Ecart type moyen annuel de la pluviométrie entre 1993 et 2004



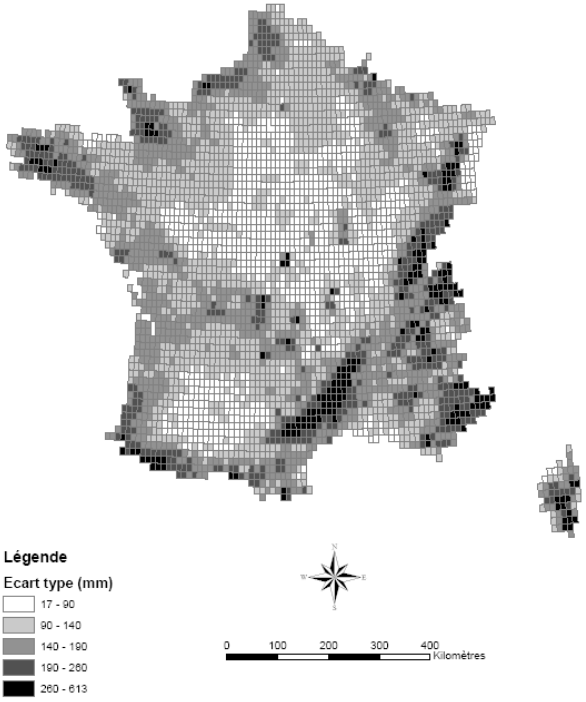
Ecart type de l'évapotranspiration maximale annuelle de 1993 à 2004



Ecart type moyen annuel de l'évapotranspiration réelle entre 1993 et 2004



Ecart type de la quantité d'eau drainée annuelle entre 1993 et 2004



- pour le drainage, on observe globalement une faible variabilité locale, ce qui traduit une influence plus forte du climat, à variation continue, que du sol, qui change rapidement, à échelle fine. La variabilité est forte dans les zones pluvieuses, et faible dans les zones à drainage faible.

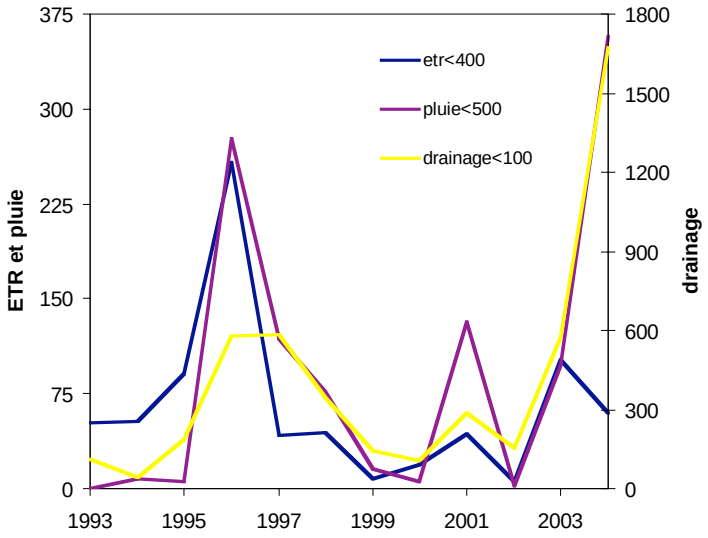
Précipitations, évapotranspiration et drainage : moyennes et écarts-types annuels

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
pluie	1015.92	1078.02	901.34	853.72	883.8	878.43	1001.12	1132.49	926.17	1017.85	782.89	714.5
	286.33	278.73	282.46	317.76	251.34	238.02	262.63	274.55	268.1	267	204.4	191.24
ETP	701.73	745.86	764.54	727.81	797.32	768.94	763	773.59	771.68	780.07	897.08	787.15
	129.18	139.98	138.51	125.21	127.77	148.95	128.45	142.19	145.5	137.91	125.48	124.32
ETR	567.87	575.23	545.63	519.06	591.09	542.16	589.78	621.91	593.75	593.16	512.24	555.23
	77.26	69	74.14	84.51	79.59	66.43	65.59	76.42	68.92	70.54	60.13	62.28
drainage	461.03	507.37	370.09	341.39	299.87	340.98	421.3	510.6	355.63	417.38	283.23	180.59
	280.3	283.36	272.51	285.73	231.87	218.84	255.54	276.64	235.31	255.24	185.08	166.23

Nombre de valeurs extrêmes par an, pour l'ETR, le drainage et la pluie

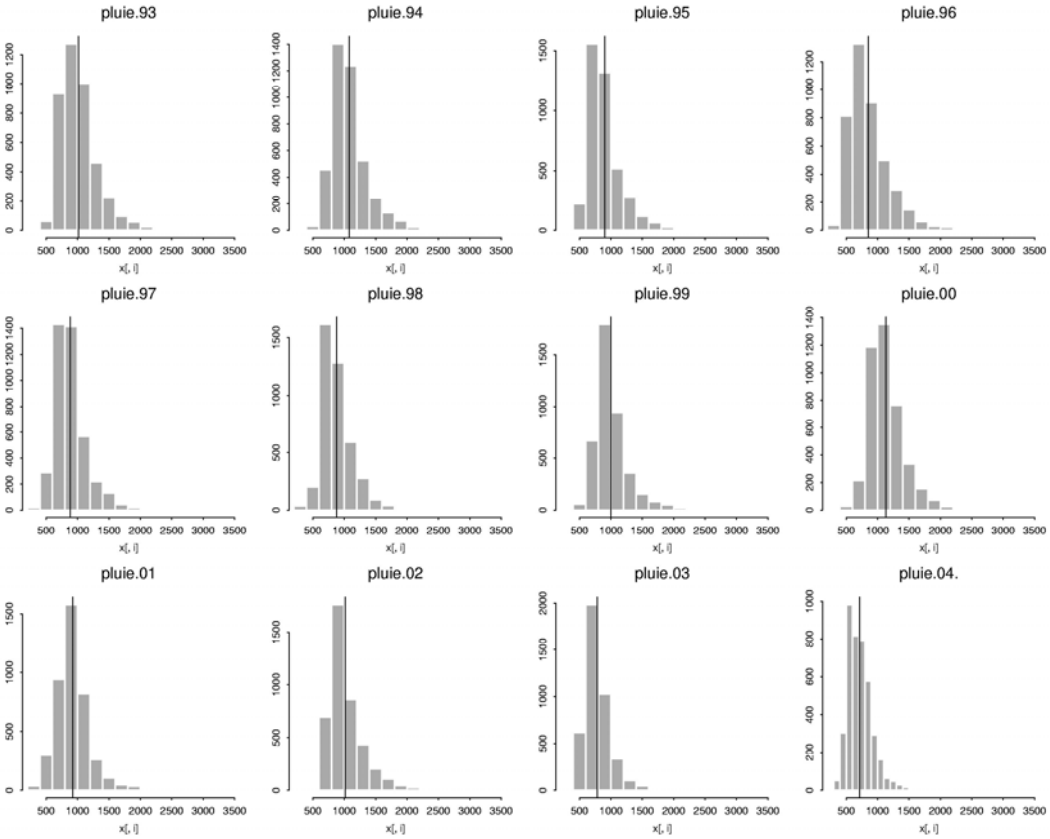
Année	ETR		Drainage		Pluie	
	<400	>800	<100	>1300	<500	>1500
1993	52	16	111	78	0	277
1994	53	7	44	94	8	356
1995	91	13	185	66	6	171
1996	258	8	578	62	276	186
1997	42	30	582	20	118	113
1998	44	7	343	14	76	88
1999	8	19	141	65	15	218
2000	19	57	107	60	5	418
2001	43	17	287	32	132	154
2002	6	46	153	53	2	251
2003	102	3	573	6	97	35
2004	60	3	1673	0	357	7

Notons que les années "humides" peuvent être de nature différente :
- en 2000, plus d'ETR que d'habitude, pas plus de drainage ; la pluie est donc bien consommée,
- en 1994, plus de drainage, pas d'ETR élevées, probablement pluies d'hiver, à un moment où la consommation est faible.

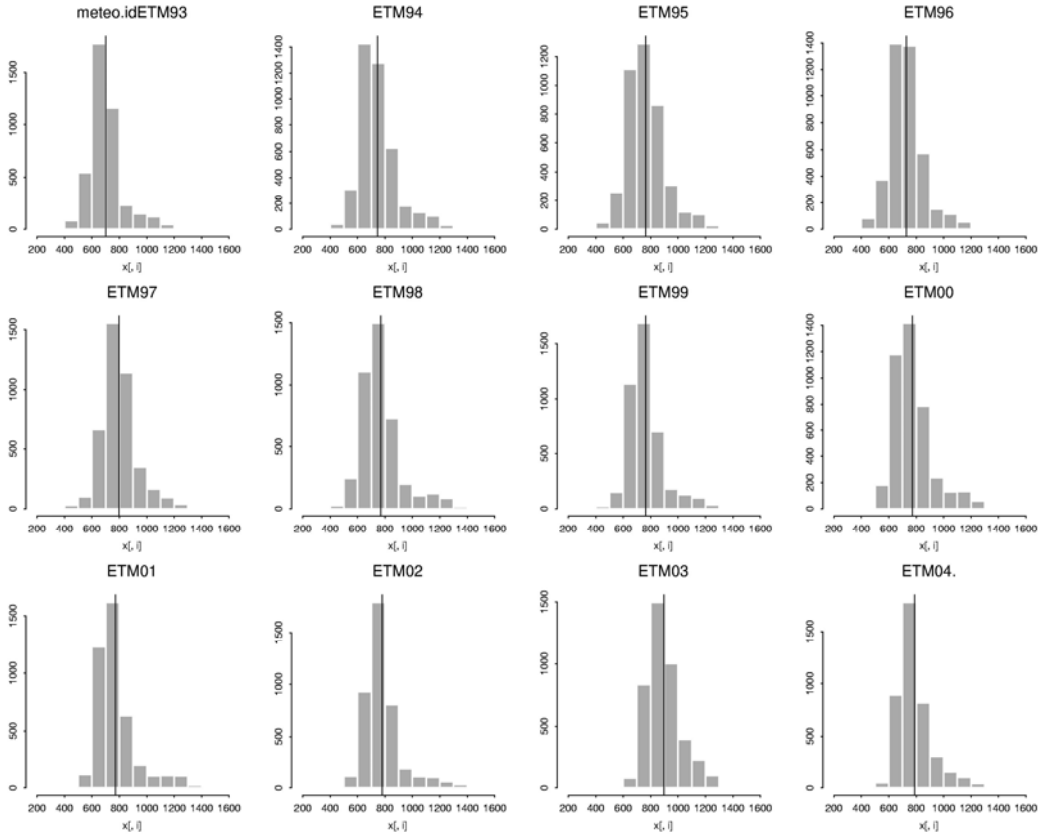


Nombre de mailles à moyenne annuelle de pluie, ETR et drainage inférieurs à un seuil
(Pour la variable représentant le nombre de mailles où le drainage est inférieur à 100 mm, il faut lire l'axe des ordonnées à droite). Noter que le drainage faible est fréquent non seulement l'année où pluie et ETR sont faibles, mais aussi l'année suivante, donc existence d'un effet retard.

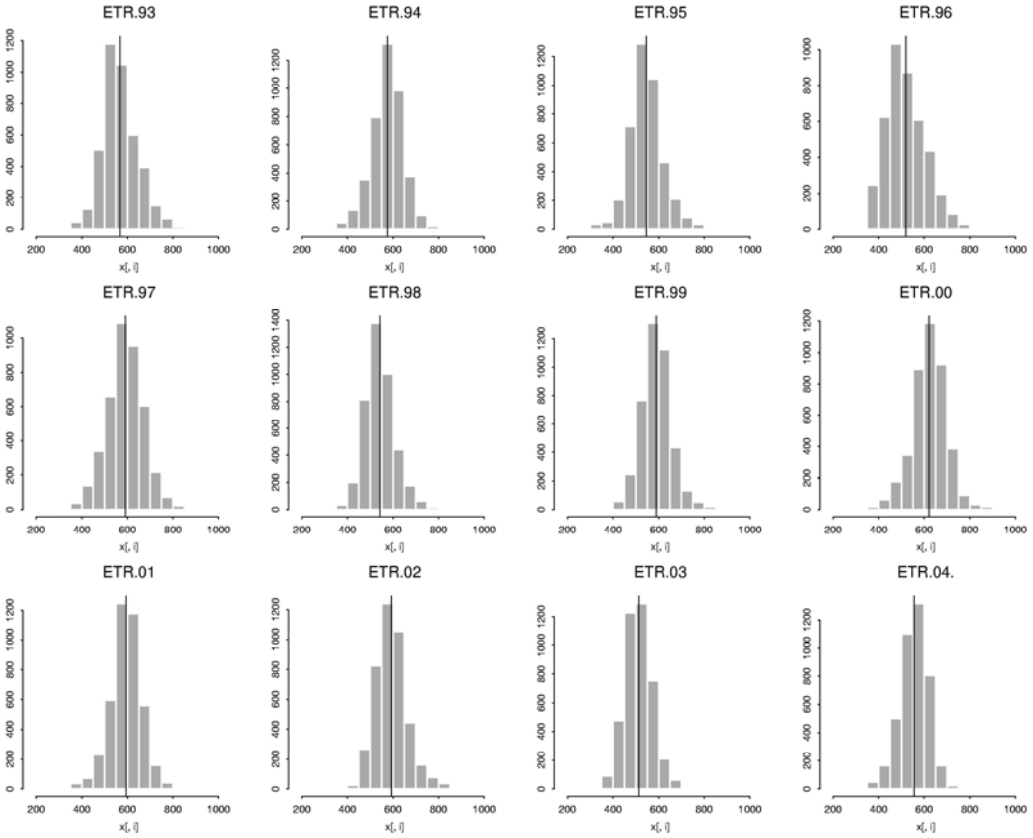
Précipitations, pour les années 1993 à 2004



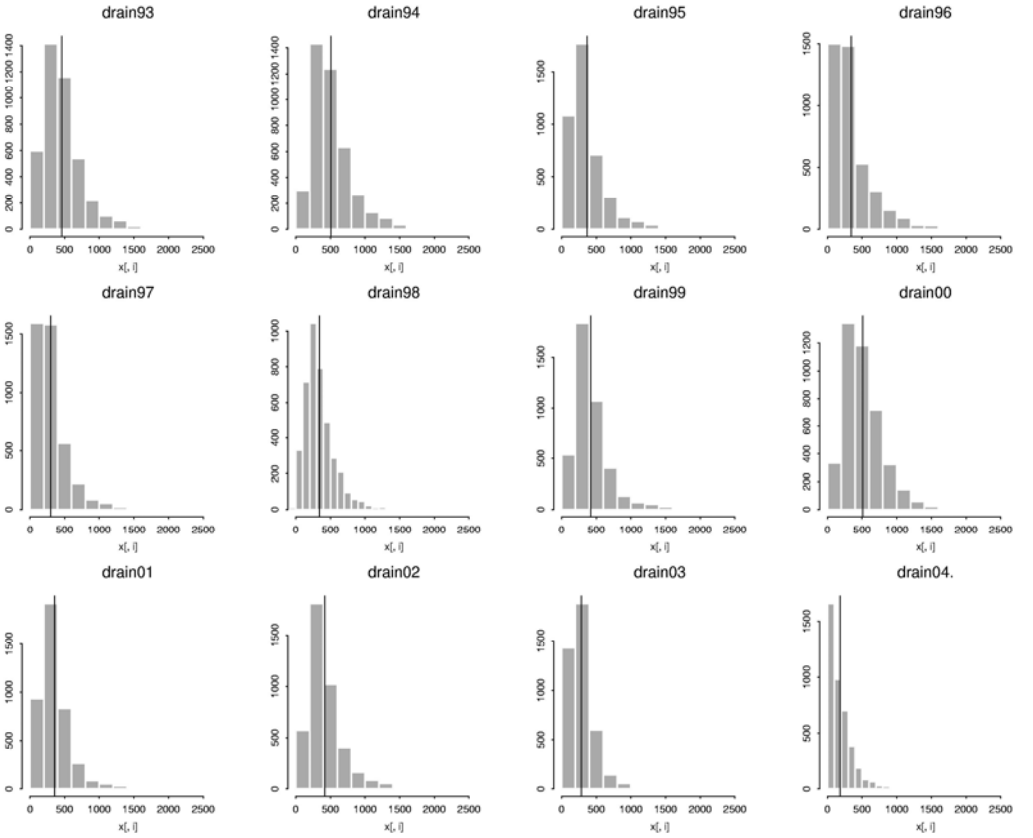
Evapotranspiration maximale, pour les années 1993 à 2004



Evapotranspiration réelle, pour les années 1993 à 2004



Drainage, pour les années 1993 à 2004



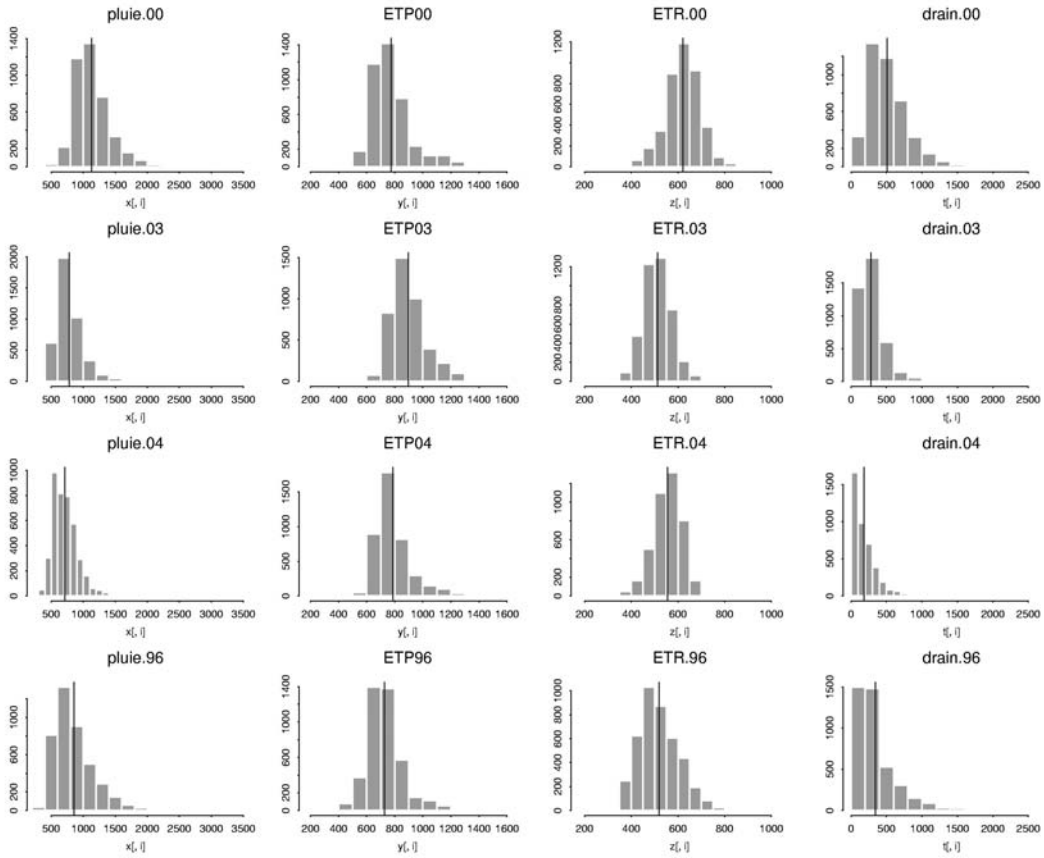
Nous présentons également ci-dessous les histogrammes d'une année humide et de 3 années sèches, pour les variables pluie, ETR et drainage.

Pour la pluie, en moyenne, 2004 est plus sèche que 2003 : ses valeurs les plus faibles sont encore plus basses (295 mm au lieu de 324) et ses pluies fortes sont beaucoup plus basses que celles de 2003 aussi (1611 mm en 2004 et 2959 en 2003). 1996 a un plus grand nombre de mailles (environ 400) à faibles pluies et faibles ETR que 2003, tandis que 2004 se distingue surtout par un très grand nombre de mailles à faibles pluies (environ 1700). L'ETP est sensiblement plus élevée en 2003 qu'en 2004, paradoxalement assez proche de celle de 2000. Entre les années 2003 et 2004 ou 2004 et 2000, ce sont les régimes des pluies qui sont différents, et expliquent les différences de types de ces années. C'est l'année 1996 qui a la plus faible ETP moyenne.

Au niveau des sorties, l'ETR moyenne de 2003 (512 mm) est équivalente à celle de 1996 (519 mm), sensiblement plus faible que celle de 2004 (555 mm), alors que la moyenne la plus élevée est 622 mm en 2000 (moyennes de toutes les mailles). La valeur minimale en 2003 est 310 mm et 320 en 2004, les valeurs maximales extrêmes sont 1038 mm en 2003 et 834 en 2004.

Le drainage est beaucoup plus faible en 2004 (181 mm en moyenne) qu'en 2003 (283 mm), ce qui semble être un arrière-effet de sécheresse visible aussi en 1997 (300 mm après l'année 1996 sèche, dont le drainage est 341 mm). Le drainage maximum est de 2836 en 2000, tandis qu'il est de 2130 en 2003.

Précipitations, évapotranspiration et drainage, pour une année humide et 3 années sèches



1.1.2. Perception de la sécheresse par la plante. Conséquences sur la productivité et sur la qualité des produits récoltés

François Tardieu (INRA, Montpellier), Pierre Cruiziat (INRA, Clermont-Ferrand – en retraite), Jean-Louis Durand (INRA, Lusignan), Eugène Triboï (INRA, Clermont-Ferrand), Michel Zivy (CNRS, Gif-sur-Yvette)

1.1.2.1. Définitions de la sécheresse pour la plante

1.1.2.1.1. Sécheresses en situations artificielle et en situation agricole : des différences de niveaux, de durée et de conception

Une des difficultés pour analyser l'état des connaissances sur les réactions des plantes à la sécheresse est la grande diversité de définitions. Pour le grand public, mais aussi pour une majorité des études de biologie moléculaires, sécheresse implique symptômes sévères et mort possible de la plante. Une plante tolérante à la sécheresse est, dans cette acception, celle qui survit à ces situations de stress sévère. On se situe là à des échelles de temps de quelques jours, celles de la vitesse de dessèchement d'un pot et de la reprise éventuelle de croissance après ré-irrigation. La définition est toute autre pour un agriculteur ou un agronome, pour lequel une sécheresse est définie par tout manque d'eau qui ne permet pas aux plantes cultivées d'exprimer le rendement qui serait attendu en situation favorable, ou qui peut affecter la qualité des produits récoltés. On se situe alors sur des échelles de temps longues, les quelques mois d'un cycle cultural, pendant lesquels les plantes ont eu le temps d'adapter leur structure et leur physiologie. Une plante tolérante pour un agriculteur est celle qui permet d'atteindre une production aussi élevée que possible dans un scénario donné de sécheresse. Plusieurs caractéristiques différencient ces deux acceptions de la sécheresse

a. Les niveaux de sécheresse pertinents sont différents suivant les conceptions. On ne voit qu'exceptionnellement des plantes mourir de sécheresse en situation agricole. L'agriculteur connaît le risque moyen dans une parcelle et un climat donnés. Il adapte donc les espèces semées à ce risque moyen. Les espèces ayant un cycle estival (tournesol, maïs) ne sont jamais semées dans une situation à risque élevé, au profit d'espèces à cycle plus précoce (colza). La survie des plantes n'est donc pas un mécanisme pertinent en situation agricole pour des plantes de grandes cultures, alors qu'elle l'est en situation naturelle et pour des espèces prairiales.

b. Les symptômes ont un poids différent suivant la définition de la sécheresse. Certains symptômes, comme le flétrissement, l'enroulement des feuilles ou même la mort précoce de la plante, sont en fait des adaptations de la plante (cf. plus loin). Par exemple, un raccourcissement du cycle se traduit visuellement par un symptôme spectaculaire à une date donnée : les plantes en déficit hydrique sont déjà sèches alors que celles bien irriguées sont encore vertes. Ce raccourcissement du cycle, un mécanisme adaptatif, permet à la plante de produire des graines alors qu'il reste encore de l'eau dans le sol. On ne peut donc pas qualifier *a priori* un symptôme comme une caractéristique défavorable d'un génotype. Tout dépend du scénario climatique (Hammer et al. 2005).

c. Les sécheresses agricoles ne peuvent être définies que comme des scénarios climatiques. Un même manque d'eau ou un même symptôme de sécheresse a des conséquences différentes suivant la période du cycle cultural à laquelle elle est appliquée. Elle a aussi des conséquences différentes suivant les autres conditions pédoclimatiques pendant la sécheresse : sécheresse de l'air, rayonnement solaire, état nutritionnel du sol... Alors que les sécheresses artificielles correspondent à un scénario simple avec des conséquences observables facilement, les conséquences d'une sécheresse agricole ne peuvent pas être caractérisées de façon unique et dépendent de l'ensemble du scénario climatique (Chapman et al 2003).

1.1.2.1.2. Sécheresse vécue par la plante : des conditions physiques ressenties par les racines et par les feuilles

a. L'eau traverse la plante, la sécheresse se définit donc en termes physiques par l'état hydrique du sol mais aussi celui de l'air. La masse d'eau contenue dans une plante est faible devant le flux d'eau qui la traverse en une journée d'été. En conséquence l'état hydrique d'une plante est directement lié à la différence entre le flux d'eau entrant par les racines et celui qui s'échappe par les feuilles au même instant (voir Annexe). La transpiration est, pendant la première partie de la journée, un peu plus grande que l'absorption : les organes du végétal perdent de l'eau ; la nuit c'est l'opposé qui se produit, et les organes se réhydratent jusqu'au lever du soleil. En cas de sécheresse, la récupération nocturne est incomplète et les tissus se déshydratent un peu plus chaque jour. La sécheresse ressentie par la plante se définit donc, à chaque instant, par les conditions hydriques aux bornes de la plante, dans le sol et dans l'air (Jones 1992).

- L'état hydrique du sol est caractérisé par une variable physique, le potentiel hydrique, qui est l'énergie qu'il faut apporter à l'unité de masse d'eau du sol pour qu'elle passe à l'état d'eau libre. Cet état énergétique dépend de la teneur en eau du sol, avec des relations différentes suivant les sols. Ces relations sont bien connues pour la majorité des sols (Van Genuchten, 1980). En première approximation, on peut donc déduire la disponibilité en eau pour les plantes de la teneur en eau du sol et de la profondeur à laquelle l'eau peut être extraite (cf. section 1.1.1.). Cependant, la grande variabilité spatiale du potentiel hydrique du sol peut avoir des conséquences importantes, indépendamment de l'état de la réserve du sol, sur la signalétique du déficit hydrique (Tardieu et Davies 1993).

- La demande évaporative peut être calculée de façon standardisée à partir de données climatiques, le rayonnement solaire, le degré de saturation de l'air en vapeur d'eau (VPD) et la vitesse du vent (cf. section 1.1.1.).

b. La circulation de l'eau dans la plante se fait sur des gradients physiques. La plante ne dispose d'aucune pompe hydraulique. A l'échelle de la plante entière, l'eau circule dans la plante depuis le sol où elle est peu liée (potentiel hydrique proche de 0) jusqu'aux feuilles où elle est très liée (potentiel hydrique fortement négatif), où elle est transpirée (voir Annexe). Chaque organe peut être caractérisé par plusieurs grandeurs physiques, essentiellement le potentiel hydrique (énergie de liaison de l'eau) et la turgescence (pression interne des cellules). A l'échelle de chaque organe et de chaque cellule, le transfert s'opère exclusivement selon des lois physiques, mais la traversée des tissus se fait par un "modèle composite" (Steudle, 2001) comprenant soit des trajets qui contournent les cellules, indépendants des contrôles de la plante, soit en traversant les cellules, avec des contrôles possibles de la conductivité hydraulique des tissus.

1.1.2.1.3. La plante agit sur son propre état hydrique au travers de mécanismes adaptatifs

Des espèces ou même des génotypes différents, soumis aux mêmes conditions de sol et de climat, ne perçoivent pas la même sécheresse. Des mécanismes entrent en jeu à des pas de temps différents, depuis quelques minutes jusqu'à quelques semaines.

a. *A l'échelle de quelques minutes, la plante peut réduire sa transpiration en fermant ses stomates* (pores microscopiques, environ 10 000 par cm^2 de feuille). La réduction de transpiration améliore l'état hydrique des tissus car les racines continuent à absorber l'eau alors que la transpiration est réduite (cf. supra). La signalétique du contrôle stomatique fait intervenir des messages de type chimique qui transitent entre les racines et les feuilles par la sève xylémienne, en particulier le pH de la sève (Wilkinson et Davies, 1997) et la concentration d'une hormone végétale, l'acide abscissique, synthétisée par les organes en dessèchement (Davies, 1991, Tardieu et Davies 1993). Des plantes transformées qui synthétisent plus de cette hormone gardent un état hydrique plus favorable et survivent plus longtemps au déficit hydrique (Iuchi et al., 2001 ; Borel et al., 2001). Une conséquence importante de ce mécanisme est que la plante réduit sa transpiration avant d'être en "stress" cellulaire.

Certaines espèces, en particulier le maïs ou le pommier, arrivent même à une quasi homéostasie de l'état hydrique foliaire quel que soit l'état hydrique du sol.

b. *A l'échelle de quelques minutes, la plante peut affecter la conductivité hydraulique des tissus.* Des protéines trans-membranaires, les aquaporines, peuvent moduler le trajet de l'eau au travers des membranes des cellules (Luu et Maurel, 2005). Le contrôle de l'ouverture des aquaporines n'est encore qu'imparfaitement connu, mais il est clair que le déficit hydrique, l'acide abscissique ou la nutrition azotée affectent la conductivité hydraulique des racines (Carvajal et al., 1996 ; Zhu et al., 2006). Plus la conductivité hydraulique des tissus est importante, plus faible est la différence de potentiel hydrique entre le sol et les feuilles. En particulier, des plantes transformées sur les aquaporines ont un comportement hydrique différent de celui des plantes sauvages (Martre et al., 2002).

c. *A l'échelle de quelques heures, la plante peut maintenir sa turgescence même si les tissus perdent de l'eau.* La turgescence, c'est-à-dire l'existence d'une pression élevée dans les cellules, est essentielle au maintien de la plante et à sa croissance (cf. Annexe). Une augmentation de la concentration en solutés de l'eau interne des cellules permet de maintenir un volume cellulaire et une pression de turgescence supérieurs à ce qu'ils seraient sans cette régulation et pour un même potentiel hydrique externe. C'est une réponse active, qui ne correspond pas à la simple concentration des molécules résultant de la perte en eau. Dans la vacuole, cet ajustement est essentiellement effectué par accumulation d'ions potassium. Ceci implique des circulations d'ions à travers les membranes de la cellule, régulés par des canaux et des transporteurs de potassium et de sodium. De fortes concentrations en ions seraient toxiques pour le cytoplasme et les organelles. L'ajustement y est donc effectué *via* l'accumulation de solutés compatibles avec la vie de la cellule, ou osmoprotectants : proline, glycine betaïne, polyols (mannitol, sorbitol, D-ononitol), trehalose, glucose, fructose, saccharose, fructanes (Zhang et al., 1999 ; Kishor et al., 1995 ; Hayashi et al., 1997 ; Shen et al., 1997 ; Abebe et al., 2003 ; Garg et al., 2002).

d. *A l'échelle de quelques semaines, la plante ajuste sa transpiration via des réductions de la surface foliaire, avec une variabilité génétique importante de ces réductions.* La surface foliaire est un déterminisme important de la transpiration. Une des premières réactions des plantes au déficit hydrique est de réduire la surface foliaire au travers de mécanismes présentés plus loin (§ 1.1.2.2.3.). Il existe une variabilité génétique importante des degrés de réaction de la croissance au déficit hydrique (Zhang et al., 1999 ; Reymond et al., 2003).

e. *Des différences de capacité d'enracinement induisent des différences d'état hydrique des plantes, avec une variabilité génétique importante du maintien de la croissance racinaire.* La croissance racinaire est notablement moins affectée que la croissance foliaire chez toutes les espèces connues (Saab et al., 1990). Ce maintien de croissance permet de prospecter des couches nouvelles de sol, alors même que la transpiration a été réduite par les mécanismes décrits en *a* et *c*. Comme pour la croissance foliaire, les mécanismes ne sont qu'imparfaitement connus. Il existe une variabilité génétique importante du degré de maintien de la croissance racinaire en cas de déficit hydrique (Tuberosa et al., 2002).

1.1.2.1.4. Conclusion partielle

La sécheresse est définie par les conditions physiques imposées aux feuilles et aux racines, mais la plante maintient un certain degré d'homéostasie au travers de mécanismes adaptatifs.

1.1.2.2. Conséquences de la sécheresse sur le fonctionnement des plantes

1.1.2.2.1. Photosynthèse et transpiration : un échange "eau contre carbone"

a. *Le gaz carbonique (CO_2) de la photosynthèse pénètre dans les feuilles par les stomates, qui contrôlent aussi la transpiration* (cf. § 1.1.2.1.3a). La fermeture des stomates qui permet de maintenir l'état hydrique foliaire diminue donc la photosynthèse, et donc la production des plantes. Une controverse existe depuis plusieurs années sur les parts stomatique et biochimique de la réduction de la

photosynthèse en cas de déficit hydrique. Dans une grande gamme de déficits hydriques compatibles avec l'activité agricole (cf. § 1.1.2.1.1), la part stomatique est probablement la plus importante (Cornic et al., 2002). Une conséquence est que la photosynthèse est intrinsèquement liée à la transpiration, et il n'existe aucun moyen connu de contourner cet échange "eau contre carbone". Cet échange est la principale limitation de la "tolérance à la sécheresse" : on ne pourra jamais construire des plantes qui maintiennent leur productivité sans un niveau élevé de transpiration. La diminution de la photosynthèse a des conséquences sur le métabolisme du carbone, et certaines enzymes impliquées dans la circulation des assimilats sont régulées en réponse au déficit hydrique (Zinselmeyer et al., 1999 ; Kim et al., 2000).

b. *Cependant, le rapport photosynthèse / transpiration, nommé efficience de l'eau, varie avec les conditions environnementales et a une variabilité génétique importante.* L'efficience de l'eau varie d'une part avec les conditions climatiques, d'autre part avec l'espèce. Farquhar et al. (1982) ont montré l'utilisation possible de la discrimination de l'isotope lourd du carbone (^{13}C) par rapport à son isotope léger (^{12}C) pour évaluer directement l'efficience de l'eau qui peut alors être mesurée facilement avec un spectromètre de masse. Des mesures directes peuvent également être effectuées.
- On observe de grandes différences entre espèces pour un climat donné, avec une efficience maximale chez certaines espèces disposant d'un métabolisme dit C4 (maïs, sorgho), et une variabilité génétique importante à l'intérieur de chaque espèce (Condon et al., 2004).
- Pour un génotype donné, l'efficience de l'eau est d'autant plus faible que la demande climatique est plus importante, puisque la plante transpire plus (Figure 1).

c. *Une conséquence importante des réductions de photosynthèse en cas de sécheresse est la synthèse de composés toxiques oxydants dans les cellules.* Si l'énergie solaire captée par les photosystèmes de la feuille n'est plus utilisée entièrement par la photosynthèse, des formes toxiques de l'oxygène peuvent apparaître, radicaux superoxydes ($O_2^{\bullet-}$), peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et radicaux hydroxyles ($OH^{\bullet}$). Ces radicaux sont les mêmes que ceux qui causent le vieillissement des cellules végétales et animales, en provoquant la peroxydation des lipides et la dénaturation des protéines et de l'ADN. Différents mécanismes permettent de contrecarrer cette accumulation de radicaux toxiques. Un premier consiste à dissiper l'énergie lumineuse sous forme de chaleur. Les caroténoïdes sont impliqués dans ce mécanisme *via* le cycle des xanthophylles (Munné-Bosch et Alegre, 2000). Un deuxième mécanisme est la détoxification, qui consiste à empêcher l'accumulation d'hydroxyles en intervenant à différentes étapes de leur formation. Les superoxyde dismutases (SOD) produisent H_2O_2 à partir des superoxydes et H_2O_2 peut ensuite être éliminé par des catalases ou par le cycle ascorbate-glutathione. Les catalases sont induites par H_2O_2, des ascorbates peroxydases sont induites par différents stress dont l'ABA, l'éthylène, la sécheresse (Inze et van Montagu 1995), et des SOD sont induites par la sécheresse et l'ABA (Kaminaka et al,. 1999 ; Guan et Scandalios, 1998).

1.1.2.2.2. Température d'organes et transpiration, un échange "eau contre chaleur"

Le bilan d'énergie du couvert végétal (cf. section 1.1.1.) montre qu'une partie importante de l'énergie radiative incidente est dispersée sous forme de transpiration. Une réduction de la transpiration par fermeture stomatique se traduit donc par un échauffement de la feuille, souvent de plusieurs degrés C. Le déficit hydrique se trouve ainsi fréquemment associé au stress thermique, non seulement parce que les périodes sèches sont souvent chaudes, mais aussi à cause des réductions de transpiration (Leinonen et Jones 2004). L'échange "eau contre chaleur" est une limitation de la tolérance à la sécheresse, puisqu'une stratégie génétique consistant à réduire la transpiration par contrôle stomatique se trouve confrontée au risque de stress thermique.

1.1.2.2.3. Limitations de la croissance des organes de la plante

Comme présenté plus haut, la limitation de la croissance foliaire est un mécanisme adaptatif qui permet de réduire la transpiration. Il est à noter que l'échauffement des feuilles présenté ci-dessus en cas de réduction de la transpiration par le contrôle stomatique ne se produit pas en cas de réduction par

la croissance foliaire. Les réductions de croissance sont l'une des premières manifestations du déficit hydrique (Boyer, 1970 ; Saab et al., 1989). Elles se produisent soit directement au travers d'une réduction de vitesse de croissance, soit indirectement en réduisant le nombre d'organes portant des feuilles.

a. La réduction de vitesse de croissance foliaire met en jeu plusieurs mécanismes. La vitesse de division cellulaire décroît (Granier et al., 2000), les parois cellulaires, qui doivent se déformer pour permettre la croissance cellulaire, deviennent plus rigides (Cosgrove, 2005), la turgescence décroît (Bou chabke et al., 2006)... Chacun de ces phénomènes met en jeu plusieurs familles de gènes dont les régulations ne sont qu'imparfaitement connues. La signalétique des modifications de croissance est elle-même complexe, en particulier parce que plusieurs signalétiques se superposent et s'entrecroisent (en particulier celles de l'acide abscissique, de l'éthylène et des sucres ; Sharp, 2002 ; Leon et Sheen, 2003). Il existe cependant un consensus sur le fait que la réduction de croissance n'est pas une conséquence passive du manque d'eau dans les cellules, elle est contrôlée et programmée par la plante, avec l'intervention de gènes d'inhibition qui s'expriment avant les sècheresses "catastrophiques". Il s'ensuit qu'une plante réduisant fortement sa taille lors d'un déficit hydrique n'a pas nécessairement été stressée au niveau cellulaire : il peut s'agir de régulations précoces.

b L'architecture de la plante est profondément modifiée. Un déficit hydrique, même très modéré et ne présentant pas de symptômes flagrants, se traduit chez beaucoup d'espèces par une modification importante de l'architecture de la plante. Par exemple, chez des dicotylédones comme le pois ou la vigne, le nombre de ramifications et le nombre d'organes élémentaires (phytomères) de la tige sont drastiquement réduits (Lecoeur et al., 1995 ; Belaygue et al., 1996 ; Lebon et al., 2004). Il en va de même chez les graminées, où le nombre de talles est réduit en cas de déficit hydrique (Courtois et al., 2000). Les processus en jeu et les signalétiques sont ici assez mal connus mais, ici encore, il s'agit de contrôles actifs de la plante mettant en jeu des signalétiques hormonales et l'expression de gènes induits par le stress, et non la conséquence passive du stress ou d'un manque de nutriments.

c. Les croissances de plusieurs organes sont inégalement affectées. Relativement peu d'études ont abordé les conséquences du déficit hydrique sur plusieurs organes de la plante. Un consensus existe cependant sur le fait que les racines sont les organes dont la croissance est la moins affectée, par rapport aux parties aériennes, végétatives et reproductrices (Wesgate et Boyer, 1985 ; Saab et al., 1990). La régulation des gènes affectant la croissance est assez nettement différente chez les racines et les parties aériennes (Wu et Cosgrove, 2000).

1.1.2.2.4. Limitation de l'alimentation minérale par un déficit hydrique

La sécheresse altère les besoins en azote des cultures puisque ceux-ci croissent avec la biomasse produite. La conséquence immédiate de la sécheresse est donc de réduire la demande en azote minéral du sol. Il s'ensuit qu'après des épisodes de sécheresse la quantité d'azote minéral dans le sol est relativement plus élevée et la lixiviation (entraînement de solutés vers les nappes par l'eau qui draine) peut être plus importante si le sol reste nu. Il faut ajouter à cela la mortalité des racines durant la période sèche, qui peut libérer encore davantage d'azote dans le sol. Cependant le déficit hydrique induit un déficit de nutrition azotée (Garwood et Williams, 1967 ; Van Keulen, 1981 ; Lemaire et Denoix, 1987), qui provient principalement des réductions de flux d'azote à la racine, et secondairement des réductions des capacités d'absorption par les racines et de la réduction du transport entre les parties souterraines et racinaires du fait de la chute de la transpiration. Les flux convectifs dans le sol (liés au transfert d'eau vers les racines) sont directement liés à la transpiration et faute de ce réapprovisionnement, la quantité d'azote de la rhizosphère est alors susceptible de devenir limitante. Les flux diffusifs (liés à la diffusion de solutés dans l'eau du sol) dépendent de l'humidité du sol qui détermine la porosité capable de transporter les solutés et de la densité racinaire (Van Keulen, 1981). Enfin, on ne sait pas avec certitude, à ce jour, pourquoi certaines espèces montrent des états de nutrition azotée optimale en sec (sorgho, dactyle aggloméré) alors que chez d'autres (blé, fétuque élevée…) ils se révèlent très sensibles (James et Richards, 2005 ; Bassirirad et al,. 1999 ; Gonzalez Dugo, 2006) si bien que le stress azoté se combine au déficit hydrique (Sadras, 2005). Enfin, chez les légumineuses qui fixent l'azote de l'air, la haute sensibilité de la fixation symbiotique de l'azote

(Durand et al., 1987) entraîne le plus souvent des déficits de nutrition azotée du même ordre que chez les plantes alimentées essentiellement à partir de l'azote en solution dans le sol (Lemaire et al., 1989).

1.1.2.2.5. Limitation de la croissance des organes reproducteurs, existence de "périodes critiques"

De la même manière que pour les organes végétatifs, tant la croissance des jeunes organes reproducteurs (ovules, puis fleurs puis grains) que leur nombre, définis par des processus de ramification, sont limités en cas de déficit hydrique (Robelin, 1963 ; Fonseca et Westgate, 2005 ; Hiler et al., 1972 ; Chapman et Edmeades, 1999). Il s'ensuit une réduction du nombre de grains et donc du rendement. Plusieurs remarques sont ici nécessaires.

a. *Cette limitation du nombre de grains est un accompagnement nécessaire de la réduction de la photosynthèse*. Les plantes ont évolué en privilégiant la formation de graines viables qui permettent la perpétuation de l'espèce. Si la photosynthèse et donc la quantité d'assimilats disponibles diminue, il est nécessaire de réduire le nombre de grains pour que ceux-ci soient viables. Cependant, d'un point de vue agronomique, cette réduction de nombre de grains peut être néfaste car elle est irréversible : si les conditions hydriques redeviennent favorables, la réduction de rendement sera toujours observée. Ceci explique qu'une grande partie de l'effort génétique sur la sécheresse a porté sur le maintien du nombre de grains (Ribaut et al., 2002), bien que cette stratégie soit porteuse d'un risque de non-viabilité des graines.

b. *Une "période critique" autour de la floraison.* Le caractère irréversible pour le rendement des réductions de nombre de grains, ainsi que la fragilité de certains processus au cours de la floraison, ont pour conséquence l'existence d'une période particulièrement sensible au déficit hydrique autour de la floraison. Celle-ci a été démontrée pour plusieurs espèces (Claassen et Shaw, 1970 ; Robelin, 1963). Cependant, ces études datent pour la plupart d'une trentaine d'années, alors que le progrès génétique a largement porté sur cette période. Des études plus récentes (Bruce et al., 2002) suggèrent que les génotypes récents de certaines espèces, comme le maïs, ont une sensibilité mieux répartie au cours du cycle cultural. Il est donc possible que l'importance des sécheresses autour de la floraison, qui est probablement un des résultats scientifiques les mieux diffusés et acceptés par les agriculteurs, soit largement surestimée avec les génotypes actuels.

c. *Une très grande variabilité génétique, inter- et intra-espèce, de la sensibilité du développement reproducteur*. La sensibilité de l'appareil reproducteur est extrêmement variable suivant les espèces, certaines comme la tomate ou le tournesol pouvant maintenir un développement reproducteur chez des plantes dont l'appareil végétatif est fortement stressé, d'autres comme le maïs ayant un appareil reproducteur plus sensible. Il existe également une variabilité génétique intra-espèce importante de cette sensibilité, en particulier chez le maïs (Bruce et al., 2002).

1.1.2.2.6. Conclusion partielle

La plante se trouve dans une "contradiction" entre maintien des capacités de croissance et protection contre le stress hydrique.

Les protections contre le stress évoquées au § 1.1.2.1. ont toutes un coût en termes de productivité. Le contrôle stomatique et la réduction de surface foliaire sont nécessaires au maintien de l'état hydrique des plantes, mais elles se traduisent par une baisse de photosynthèse. L'appareil reproducteur réduit le nombre de grains pour maintenir leur viabilité, mais ceci réduit de façon irréversible le rendement. Des réductions de transpiration se paient en terme de risque de stress thermique. C'est donc en terme d'optimisation entre des processus contradictoires, et non en termes d'amélioration pure, qu'il faut poser à la fois l'amélioration génétique et la gestion de l'irrigation.

En termes génétiques, on ne peut pas favoriser à la fois la protection de la plante, qui amène à une stratégie "conservatrice" (réduction des surfaces d'échange et du nombre de grains) et le maintien du potentiel de rendement qui amène à la stratégie inverse.

En termes de gestion d'irrigation, le choix le plus défavorable est celui d'une stratégie non cohérente : (i) soit développer des besoins élevés en eau par une irrigation importante en début de cycle, qui ne pourront pas être satisfaits en fin de cycle, (ii) soit une limitation irréversible des capacités d'accumulation de biomasse par un stress précoce, suivi par des apports d'eau qui seront mal valorisés. Or les pluies sont en général imprévisibles, donc ces possibilités défavorables ne sont nullement rares. Elles se paient en termes d'efficience de l'eau d'irrigation. Une réduction de la quantité d'eau apportée aux cultures, qui peut se traduire par une augmentation de l'efficience de l'eau si elle est bien menée, peut au contraire la diminuer si elle n'est pas cohérente.

1.1.2.3. Expression des gènes

Il existe des mécanismes moléculaire actifs, spécifiques du déficit hydrique.

1.1.2.3.1. Les outils de la génomique révèlent une réorganisation profonde et rapide de l'expression des gènes en déficit hydrique.

L'analyse des réponses au déficit hydrique au niveau de l'expression des gènes est analysée depuis le début des années 2000 en suivant simultanément les variations d'accumulation de milliers de transcrits de ces gènes (transcriptome). Ceci permet d'identifier des gènes qui sont induits lors d'un déficit hydrique et participent ainsi potentiellement aux réponses de la plante, et de les comparer à ceux induits lors d'autres types de stress comme les stress salin ou froid, ou à l'application d'hormones de stress sans le stress lui même (Seki et al., 2002 ; Rabbani et al., 2003). Par exemple, l'expression des gènes est modifiée différemment par une sécheresse seule et par une sécheresse accompagnée d'un stress thermique chez *Arabidopsis thaliana* (Rizhsky et al., 2004). D'autres analyses ont étudié plus précisément la dynamique de la réponse, et les différences entre génotypes de ces dynamiques (Kawasaki et al., 2001, chez le riz). Des différences de réponses entre organes ont enfin été analysées, par exemple en montrant des différences importantes de réponse au déficit dans le placenta et l'albumen du grain de maïs (Yu et Setter, 2003).

1.1.2.3.2. Il existe une signalétique mettant en jeu des "dialogues" entre gènes, et entre gènes et hormones de stress.

L'expression des gènes est contrôlée par des facteurs de transcription, des protéines qui se fixent au promoteur (séquence d'ADN en amont de la partie transcrite) des gènes qu'ils contrôlent. Ils se fixent sur un promoteur s'ils y reconnaissent des séquences particulières appelées éléments *cis*. Des éléments *cis* et des facteurs de transcription impliqués dans la réponse à la sécheresse ont été identifiés. Certains sont impliqués dans l'induction par l'ABA (éléments ABRE, ABA Responsive Elements, et facteurs de transcription AREB, ABA Responsive Element Binding proteins, Skriver et al., 1991 ; Uno et al., 2000 ; Abe et al., 1997), d'autres dans l'induction par la sécheresse indépendamment de l'ABA (DRE, Drought Responsive Element, et facteurs de transcription DREB, DRE-Binding proteins, Yamaguchi-Shinozaki et Shinozaki, 1994 ; Shinozaki et Yamaguchi-Shinozaki, 2000).
Les gènes régulés par de ces facteurs de transcription ont été recherchés en analysant les conséquences de leur sur-expression à l'échelle du génome (Seki et al., 2001 ; Abe et al., 2003 ; Sanchez et al., 2004).

1.1.2.3.3. Le déficit hydrique affecte aussi la traduction des transcrits en protéines, ainsi que le devenir des protéines.

Tous les ARNm ne sont pas traduits dans les mêmes proportions, et le taux de traduction est modifié au cours du déficit hydrique (Kawaguchi et al., 2004). Les quantités de protéines ne sont donc que partiellement corrélées aux quantités d'ARNm. Par ailleurs les protéines subissent ensuite des modifications (post-traductionnelles) qui ont une influence sur leur activité. L'analyse à grande échelle des quantités de protéines (protéome) permet d'accéder aux variations des quantités de protéines et à leurs modifications post-traductionnelles. Différentes analyses de la réponse à des déficits hydriques, à

un stress salin ou à l'ABA ont été effectuées dans différentes espèces (Riccardi et al., 1998 ; Costa et al., 1998 ; Hajheidari et al., 2005) parfois en analysant un compartiment subcellulaire particulier (Rey et al., 1998). Il a par exemple été montré que l'induction de protéines par le déficit hydrique dépend du stade de développement de l'organe considéré (Vincent et al., 2005) et du génotype (de Vienne et al., 1999 ; Riccardi et al., 1998 et 2004 ; Salekdeh, 2002).

1.1.2.3.4. Conclusion partielle

Le déficit hydrique met en jeu une série de mécanismes à l'échelle de gènes et de protéines. Il existe un grand nombre de fonctions induites par le déficit hydrique, vraisemblablement impliqués dans les réponses de la plante.

Il faut signaler que les résultats ci-dessus sont difficiles à synthétiser du fait de la très grande hétérogénéité des conditions dans lesquelles les expériences sont réalisées. Les cultures varient de la serre, voire du champ, à la boîte de Petri, le stress est parfois extrêmement brutal (assèchement de plantules sur buvard) ou plus modéré (Bray, 2002). Parfois les messagers sont extraits de la plantule entière, parfois d'un organe précis. Il faut donc se garder de trop extrapoler à partir de chacune de ces expériences. Cependant, ces expériences dans leur ensemble permettent une analyse intégrée des réponses, et certains mécanismes mis en évidence ont permis d'identifier des gènes candidats intéressants.

1.1.2.4. Conséquences de périodes de déficit hydrique sur la qualité des produits récoltés

1.1.2.4.1. Caractéristiques physiques

Chez beaucoup d'espèces, notamment chez les légumes et les fruits consommés en frais, les propriétés physiques représentent un premier critère de qualité par "l'attractivité" qu'elles exercent sur le consommateur (taille, forme, couleur...). Chez les espèces à graine, les caractéristiques physiques d'un grain ont une importance moindre, mais la masse d'un grain de blé et sa dureté sont des critères importants car ils déterminent le rendement meunier et la dépense énergétique.

Si la sécheresse intervient avant la floraison, on observe une diminution du nombre d'organes, graines ou fruits, mais la masse des organes récoltés reste stable ou peut même augmenter en raison d'une augmentation de la disponibilité en assimilat pour chaque organe ("compensation"). Les conséquences sur la qualité sont donc limitées. Les conséquences sont en revanche maximales pour des sécheresses qui interviennent après la fécondation. En général, la phase de division cellulaire qui détermine le volume de l'organe, et ainsi son poids potentiel, est plus sensible que la phase ultérieure de remplissage des cellules (Gooding et al., 2003).

Hormis la taille du fruit, d'autres modifications d'ordre physiologique ou pathologiques sont causées par un déficit hydrique pendant la phase post-floraison. C'est le cas des craquelures du fruit chez la tomate ou chez le clémentinier. De même, une déficience en calcium, souvent liée au flux d'eau, produit des désordres morphologiques qui affectent la commercialisation des fruits (Kays 1999 ; Guichard et al., 2001).

1.1.2.4.2. Effets de la sécheresse sur la composition primaire des graines et des fruits

La composition primaire est représentée par les trois composants majeurs, hydrates de carbone, lipides et protéines, qui représentent la plus grande partie de la masse des organes récoltés.

a. *Chez les plantes à graines*, les teneurs en amidon, protéines et huile sont des critères majeurs de qualité. Une variation forte est enregistrée sous l'effet du climat, interannuelle ou géographique. Par exemple, dans les conditions chaudes et sèches de l'année 2003, on a enregistré une teneur supérieure en protéines chez le blé et une diminution de la teneur en huile chez le tournesol. Chez cette espèce,

41% des échantillons ont eu des teneurs en huile qui n'ont pas satisfait la norme de commercialisation (Garnon et Merrien, 2004). Ces résultats sont une conséquence de la relation négative rendement - teneur en protéines enregistrée à différents niveaux d'investigation (Triboi et al., 2002, 2003).

De même que pour les qualités physiques des organes récoltés, l'effet d'un déficit hydrique dépend fortement du stade végétatif auquel il survient. Cet effet est faible pour des déficits survenant avant la floraison (Triboi et al., 2003), et des augmentations de teneurs en protéines ou en huile peuvent même être observés. Ceci est lié à la réduction de la compétition pour les assimilats entre les organes récoltés (Triboi-Blondel et Renard, 1999). Un déficit hydrique post-floraison diminue la disponibilité en carbone pour le grain, affectant ainsi les teneurs en amidon et en huile. Au contraire, les teneurs en protéines sont souvent augmentées car les métabolismes liés aux protéines sont moins affectés que ceux liés à l'accumulation de carbone.

b. Chez les fruits consommés en "frais", les deux composants principaux sont les glucides solubles et les acides organiques. Le rapport sucres/acidité est un critère principal de qualité. Une sécheresse précoce pendant le développement du fruit induit une amélioration de la qualité par augmentation de la concentration en sucres et de l'intensité de la couleur rouge du fruit (Chalmers et al., 1985 ; Girona et al., 2003 ; Gelly et al., 2003). Une sécheresse plus tardive, pendant la phase de croissance rapide du fruit, diminue non seulement la taille du fruit mais aussi sa teneur en glucides (Besset et al., 2001). L'acidité est liée à deux acides organiques, malique et citrique, dont le rapport est relativement constant pendant la première partie de la croissance du fruit, et change lors de stades ultérieurs (Wu et al., 2002). Une légère sécheresse est souvent favorable à la qualité de ce point de vue, car elle augmente la concentration en acides organiques.

c. Chez la vigne, les composants majeurs d'une baie sont les glucides solubles, les acides organiques et les composés phénoliques issus du métabolisme secondaire. Il admis que la quantité totale de sucres, critère principal de qualité pour la consommation en frais et pour la qualité du vin, varie négativement avec le rendement (Huglin, 1986). Cependant la relation rendement - teneur en sucres est variable selon la date d'apparition du déficit hydrique. La période précoce du développement de la baie est la plus sensible à la sécheresse en ce qui concerne la croissance de la baie, sans effet majeur sur la concentration en sucres qui s'accumulent dans un volume plus faible (Ojeda et al., 2002). Si la sécheresse est continue depuis la floraison à la maturité, le rendement baisse mais la concentration en sucre continue de baisser (Becker et Zimmerman, 1984).

L'acidité détermine certaines qualités organoleptiques ainsi que la capacité de conservation du vin (Huglin, 1986). Elle est due essentiellement à deux acides organiques, malique et tartrique. Le premier détermine l'acidité totale durant la maturation mais apporte un goût désagréable. Le second, l'acide tartrique participe à l'élaboration des propriétés organoleptiques. Contrairement à l'acide malique, la quantité d'acide tartrique reste relativement stable car il n'est pas métabolisé après sa synthèse (Ruffner et al., 1983). Peyrot des Gachons et al. (2005) ont montré qu'une sécheresse sévère réduit l'acidité titrable, en particulier la teneur en acide malique.

1.1.2.4.3. Micronutriments, composants issus du métabolisme secondaire, valeur santé

a. Parmi les minéraux, hormis l'azote et le soufre qui sont contenus dans les protéines, 15 autres macro- et oligo-éléments sont essentiels pour la nutrition humaine. Leur concentration dans l'organe récolté est fonction de la biodisponibilité dans le sol et du fonctionnement de la plante (Fageria et al., 2002). Le déficit hydrique modifie la biodisponibilité dans le sol par des phénomènes d'oxydoréduction, solubilisation/précipitation, et de mobilité dans le sol. Au niveau de la plante, la sécheresse modifiant la croissance et la quantité des composants majeurs, réduit la dilution par rapport à d'autres composants dont l'accumulation est moins altérée. Pour cette raison, le poids d'un grain de blé est souvent corrélé négativement avec la teneur en P, Mg, Se, Mn, Ca, K, Sr, Fe.

b. Les composants organiques issus du métabolisme secondaire sont très nombreux (>100 000) et ont un rôle important dans la détermination de la qualité. Les composés phénoliques sont localisés essentiellement dans la pellicule de la baie de vigne et dans la graine. Ainsi la taille de la baie,

modifiant le rapport surface/volume est un premier facteur de variation de la concentration du moût de raisin en phénols en cas de déficit hydrique (Ojeda et al., 2002). Là encore, le stade de développement pendant lequel le déficit hydrique intervient a une grande importance sur les concentrations finales en composés phénoliques (Deloire et al., 2004). Des résultats similaires montrent un effet positif d'un léger stress hydrique sur certains composés du métabolisme secondaire chez la tomate (Dumas et al., 2003) et la pêche (Monet, 1983).

c. Composantes toxiques. L'effet toxique des mycotoxines, qui sont des composants du métabolisme secondaire des champignons, est connu depuis environ 50 ans. Elles sont produites principalement par l'Aspergillus, le Penicillium et le Fusarium. Chez le blé, la production de mycotoxines par le Fusarium est fonction de la température et de l'humidité de l'air principalement à la floraison (Hope et al., 2005). Des pluies fréquentes favorisent donc le développement du pathogène, mais l'effet au niveau des mycotoxines reste difficile à prédire car en conditions naturelles il n'y a pas une bonne corrélation entre l'intensité de l'attaque par Fusarium sp. et la production de mycotoxines (Grosjean et Barrier-Guillot, 2004).

1.1.2.4.4. Conclusion partielle

L'effet du déficit hydrique sur la qualité des produits récoltés est complexe et ne peut pas être résumé par des règles générales comme "la sécheresse augmente la qualité".

Les effets dépendent très largement du stade pendant lequel le déficit hydrique se produit. En général, la taille de l'organe et donc la quantité des composants stockés diminue avec le déficit hydrique. Ces changements diminuent aussi la dilution des composés étudiés par l'eau ou le carbone, avec des conséquences positives ou négatives selon l'utilisation du produit. La production d'assimilats carbonés étant plus touchée que celle des protéines, les teneurs en amidon ou en lipides tendent à baisser et celles en protéines tendent à augmenter avec le déficit hydrique. Les teneurs en composés secondaires varient aussi avec le déficit hydrique, d'une façon qui dépend de l'intensité du déficit et du stade auquel il est appliqué.

Les connaissances actuelles sur les variations de la composition des organes sont encore très limitées. Le développement de modèles fondés sur des lois de fonctionnement devraient permettre de mieux comprendre les interactions entre le climat et la plante qui sont difficiles à étudier expérimentalement et qui sont souvent à l'origine des résultats apparemment contradictoires (Triboi et al., 2003 ; Martre et al., 2003 ; Génard et Huguet, 1996 ; Lescourret et al., 1999).

1.1.2.5. Conséquences en termes de stratégies de tolérance à la sécheresse et de tolérances relatives de différentes espèces au déficit hydrique

1.1.2.5.1. Esquive, évitement et maintien de la croissance

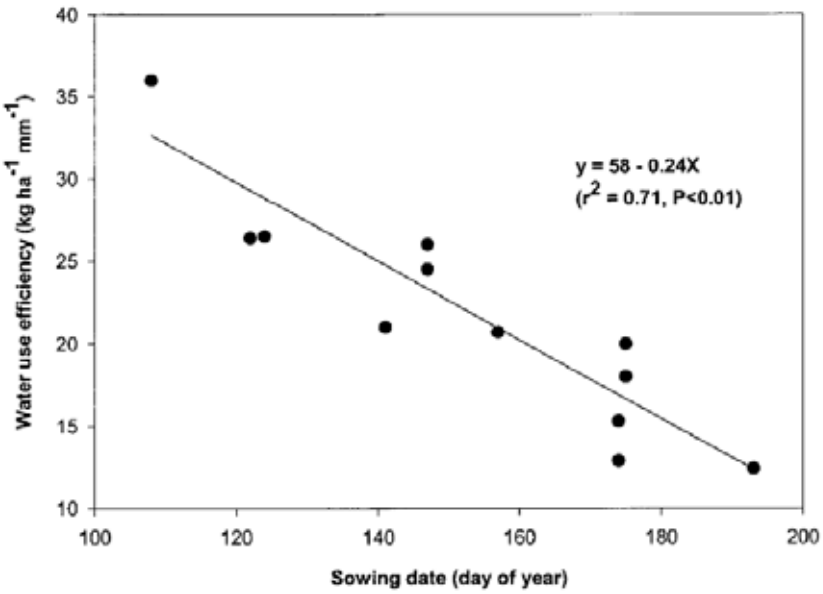
Ces stratégies diffèrent quant à leurs conceptions, mais elles ont toutes un coût en terme de rendement final pour la plante.

. L'esquive consiste à placer le cycle cultural pendant des périodes où la demande climatique est faible et/ou pluvieuses.

La stratégie d'esquive la plus efficace consiste à éviter les cultures d'été. La demande climatique estivale est environ deux fois supérieure à celle du printemps. La quantité d'eau nécessaire pour garder les stomates ouverts est donc plus grande en été. C'est ce qui explique que le blé ait une efficience de l'eau similaire à celle du maïs bien que ce dernier ait une efficience intrinsèque supérieure à cause de son métabolisme C4 (cf. Figure 1). Une autre stratégie efficace consiste à implanter des espèces ou génotypes à cycle cultural court, qui peuvent se développer avant les périodes les plus stressantes. Ce raccourcissement du cycle se traduit aussi par une réduction de la photosynthèse cumulée et donc du rendement potentiel.

Dans les deux cas, l'esquive ne peut se raisonner qu'à l'échelle de l'exploitation agricole et des systèmes de culture. Il est donc traité dans ce rapport dans le chapitre correspondant.

Figure 1. Un exemple d'évolution de l'efficience climatique avec la période de croissance de la plante



Plus tardive est la période de croissance, plus forte est la demande climatique et plus basse est l'efficience de l'eau (définie par la biomasse aérienne par unité de précipitation entre avril et octobre, hémisphère sud). L'efficience intrinsèque était probablement indépendante de la période de croissance. L'esquive consiste donc à éviter les périodes à forte demande climatique.

Données issues de lignées quasi isogéniques de blé semées à différents dates, lieux et années, Australie de l'est (Richards et al., 2002).

. L'évitement consiste à empêcher que la plante ne soit soumise à un stress hydrique important. (i) D'un point de vue génétique, il s'agit des limitations de la surface foliaire et de la transpiration, et d'un développement favorisé du système racinaire. D'une certaine manière, la limitation du nombre de grains peut être considérée comme un mécanisme d'évitement. Toutes ces adaptations ont un coût en terme de productivité. Elles sont détaillées dans le chapitre 2.1. (ii) D'un point de vue cultural, il s'agit d'une irrigation rationnée, qui consiste à apporter la quantité minimale d'eau pour maintenir une production acceptable. Les paragraphes précédents montrent que le timing des déficits hydriques sont cruciaux.

. Le maintien consiste à maintenir les fonctions de la plante malgré le déficit hydrique. Elle est de nature essentiellement génétique.

1.1.2.5.2. Classification de quelques espèces quant à différents critères de tolérance au déficit hydrique

Ces critères sont de plusieurs ordres, et suivent les trois stratégies ci-dessus. Ils sont présentés pour plusieurs d'espèces au tableau 1, dont la fonction est plus de montrer les différences d'acceptions de la tolérance que de réaliser un inventaire exhaustif des espèces. Ce tableau est issu de dires d'expert, et peut donc être contesté. Ses conclusions pourraient aussi être profondément altérées à la suite de progrès génétiques.

Il est d'abord important de noter que la consommation en eau des cultures est proche entre espèces, lorsque celles-ci sont soumises à un même climat et aux périodes de leur cycle où leur feuillage est pleinement développé et non encore sénescent. Ainsi, des couverts de maïs, de tournesol, de sorgho ou de blé ont des consommation en eau similaires aux alentours de leur floraison à caractéristiques climatiques similaires (de 1 à 6 $l.m^{-2}.j^{-1}$, suivant les caractéristiques météorologiques de la journée considérée). La consommation en eau des cultures dépend donc pour l'essentiel d'une part de la durée de leur cycle, d'autre part du climat moyen pendant ce cycle. Ainsi, des couverts de blé et de maïs ont des consommation en eau similaire (environ 500 l d'eau par m^2 et par an) : le blé a un cycle plus long que le maïs, mais celui-ci réalise son cycle pour l'essentiel en été.

- Un premier groupe d'espèces n'a pas de caractéristique particulière de tolérance au déficit hydrique, mais leur cycle cultural se déroule pour l'essentiel pendant les périodes automnale et hivernale, pendant lesquelles le risque de déficit hydrique est très faible (esquive). Il s'agit des espèces d'hiver comme le colza ou, dans une moindre mesure, le blé d'hiver. Elles ont dès lors une bonne tolérance globale et une bonne efficience de l'eau liée au fait que la demande transpiratoire est faible pendant leur cycle végétatif.

- D'autres espèces, non particulièrement tolérantes intrinsèquement, le sont en raison d'un système racinaire pérenne et très développé, qui parvient à coloniser même des sols peu favorables (évitement). Il s'agit par exemple de la vigne et de la luzerne. Ces espèces perdent leur caractère de tolérance si elles sont placées dans un sol dont les couches profondes ne sont pas colonisables, même par leur système racinaire.

- D'autres espèces d'été ont une tolérance intrinsèque forte, tant des appareils végétatif que reproducteur, et parviennent donc à des productions acceptables en l'absence d'irrigation. Il s'agit par exemple de l'orge, du tournesol ou du sorgho. Il est à noter que ce caractère est complètement délié de l'efficience de l'eau transpirée (cf. § 1.1.2.2.1b). Le tournesol a une conductance stomatique élevée en conditions irriguées et une faible efficience intrinsèque de l'eau, au contraire du sorgho qui a une efficience de l'eau élevée en raison de son métabolisme C4 et de son contrôle stomatique. Une caractéristique commune de toutes ces espèces est la forte tolérance au déficit hydrique de leur développement reproducteur.

- Enfin d'autres espèces d'été ont une tolérance intrinsèque faible, et ne peuvent être cultivées que soit en sol profond pour celles qui ont un système racinaire bien développé, soit avec de l'irrigation. Il s'agit par exemple du pois et du maïs. Ce dernier mérite quelques remarques particulières. C'est l'espèce ayant l'efficience de l'eau la plus élevée, en raison de son système photosynthétique C4 et de ses capacités de croissance élevées ; il a des mécanismes de régulation particulièrement efficaces en ce qui concerne son système végétatif (croissance racinaire rapide et contrôle stomatique élaboré), mais son système reproducteur est particulièrement fragile ce qui nécessite son irrigation. C'est ce paradoxe qui justifie le fait que de nombreuses recherches sur la tolérance au déficit hydrique sont menées sur cette espèce.

Tableau 1. Critères de tolérance à la sécheresse de plusieurs espèces

	Risque climatique, esquive / évitement			Efficience de l'eau		Tolérance		Global
Espèce	Cycle cultural	Système racinaire	Degré de esquive / évitement	Efficience climatique	Efficience intrinsèque	Robustesse système végétatif	Robustesse système reproducteur	Appréciation, "réputation"
Colza	automne-printemps	profond	++++	+++	+	+	+	++++
Luzerne	pérenne	très profond	+++	++	+	+	+	++++
Vigne	pérenne	très profond	++++	+	++	+	+	++++
Blé	hiver-printemps	profond	+++	+++	+	++	++	+++
Tournesol	printemps-été	profond	+	+	-	++	+++	++
Orge	printemps-été	moyen	++	+	+	++	+++	+++
Sorgho	été	moyen	+	-	+++	++	+++	+++
Pois	printemps-été	faible	-	+	+	+	+	-
Maïs	été	moyen	+	-	+++	++	-	-

Références bibliographiques

Abe H., Urao T., Ito T., Seki M., Shinozaki K. & Yamaguchi-Shinozaki K. (2003). Arabidopsis AtMYC2 (bHLH) and AtMYB2 (MYB) function as transcriptional activators in abscisic acid signaling. *Plant Cell* 15, 63-78.

Abe H., Yamaguchi-Shinozaki K., Urao T., Iwasaki T., Hosokawa D. & Shinozaki K. (1997). Role of arabidopsis MYC and MYB homologs in drought- and abscisic acid-regulated gene expression. *Plant Cell* 9, 1859-68.

Abebe T., Guenzi A.C., Martin B., Cushman J.C. (2003). Tolerance of mannitol-accumulating transgenic wheat to water stress and salinity. *Plant Physiology,* 131, 1748-55

Bassiri Rad H., Tremmel D.C., Virginia R.A., Reynolds J.F., de Soyza A.G., Brunell M.H. (1999). Short-term patterns in water and nitrogen acquisition by two desert shrubs following a simulated summer rain. *Plant Ecology,* 145: 27-36

Bélaygue C., Wery J., Cowan A.A., Tardieu F. (1996) How do Leaf Expansion, Rate of Leaf Appearance and Stolon Branching Contribute to Plant Leaf Area Establishment under Water Deficit in White Clover (Trifolium repens L.). *Crop Science*, 36, 1240-1246

Besset J.K., Génard M., Girard T., Serra V., Bussi C. (2001). Effect of water stress applied during the final stage of rapid growth on peach tree (cv. Big-Top). *Scientia Horticulturae*, 91, 289-303

Borel C., Frey A., Marion-Poll A., Tardieu F., Simonneau T. (2001) Does engineering ABA synthesis in N. plumbaginifolia modify stomatal response to drought ? *Plant, Cell and Environment*, 24, 477-489

Bouchabke O., Tardieu F., Simonneau T. (2006) Leaf growth and turgor in growing cells of maize (Zea mays L.) respond to evaporative demand in well-watered but not in water saturated soil. *Plant, Cell and Environment*, 29, 1138-1148

Boyer J.S. (1970) Leaf enlargement and metabolic rates in corn, bean and sunflower at various leaf water potential. *Plant Physiology* 46, 233-235

Bray E.A. (2002). Genes commonly regulated by water-deficit stress in Arabidopsis thaliana. *Journal of Experimental Botany*, 55, 2331-2341

Bruce W.B., Edmeades G.O., Barker T.C. (2002). Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53, 13-25

Carvajal M., Cooke D.T., Clarkson D.T. (1996). Responses of wheat plants to nutrient deprivationmay involve the regulation of water-channel function. *Planta,* 199, 372-381

Chalmers D.J., Mitchell P.D., Jerie P.H. (1985). The relation between irrigation, growth and productivity of peach tree. *Acta Horticulturae*, 173, 283-288

Chapman S.C., Cooper M., Podlich D., Hammer G.L. (2003). Evaluating plant breeding strategies by simulating gene action and dryland environment effects. *Agronomy Journal*, 95, 99-113

Chapman S.C., Edmeades G.O. (1999). Selection improves drought tolerance in tropical maize populations. II. Direct and correlated changes among secondary traits. *Crop Science*, 39 1315-1324.

Claassen M.M., Shaw R.H. (1970). Water deficit effects on corn. II. Grain components. *Agronomy Journal,* 62, 652-655

Condon A.G., Richards R.A., Rebetzke G.J., Farquhar G.D. (2004). Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany,* 55, 2447-2460

Condon A.G., Richards R.A., Rebetzke G.J., Farquhar G.D. (2004). Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 55, 2447-60

Cornic G., Fresneau C. (2002). Photosynthetic carbon reduction and carbon oxidation cycles are the main electron sinks for photosystem II activity during a mild drought. *Annals of Botany*, 89, n°sp., 887-894

Cosgrove D.J. (2005). Growth of the cell wall. Nature Reviews. *Molecular Cell Biology*, 6, 850-861

Costa P., Bahrman N., Frigerio J.M., Kremer A., Plomion C. (1998). Water-deficit-responsive proteins in maritime pine. *Plant Molecular Biology*, 38, 587-96

Courtois B., McLaren G., Sinha P.K., Prasad K., Yadav R. & Shen L. (2000). Mapping QTLs associated with drought avoidance in upland rice. *Molecular Breeding*, 6, 55-66

Davies W.J., Zhang J. (1991). Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology,* 42, 55-76

de Vienne D., Leonardi A., Damerval C., Zivy M. (1999). Genetics of proteome variation for QTL characterization : application to drought-stress responses in maize. *Journal of Experimental Botany,* 50: 303-309

Deloire A., Carbonneau A., Wang Z.P., Ojeda H. (2004). Vine and water a short review. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 38 (1), 1-13

Dumas Y., Dadomo M., Di Lucca G., Grolier P. (2003). Effects of environnemental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture,* 83, 369-382

Durand J.L., Sheehy J.E., Minchin F. (1987). Nitrogenase activity, photosynthesis and nodule water potential of soybean plants experiencing water deprivation. *Journal of Experimental Botany*, 38, 311-321

Fageria N.K., Baligar V.C., Clark R.B. (2002). Micronutriments in crop production. *Advances in Agronomy*, 77, 185-267

Farquhar G.D., O'Leary M.H., Berry J.A. (1982). On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, 9, 121-137.

Fonseca A.E., Westgate M.E. (2005). Relationship between desiccation and viability of maize pollen. *Field Crops Research*, 94, 114-125

Garg A.K., Kim J.K., Owens T.G., Ranwala A.P., Choi Y.D., Kochian L.V., Wu R.J. (2002). Trehalose accumulation in rice plants confers high tolerance levels to different abiotic stresses. *Proceeedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 99, 15898-903

Garnon V., Merrien A. (2004). Pénurie d'huile dans les graines de tournesol en 2003. *Oléoscope*, 76, 4-5

Garwood E.A., Williams T.E. (1967). Growth, water use and nutrient uptake from the subsoil by grass swards. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 69: 125-130

Gelly M., Recasens I., Mata M., Arbones A., Rufat J., Girona J., Marsal J. (2003). Effects of water deficit during stage II of peach fruit development and postharvest on fruit quality and ethylene production. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 78, 3, 324-330

Génard M., Huguet J.G. (1996). Modelling the response of peach fruit growth to water stress. *Tree Physiology*, 16, 407-415

Génard M., Lescouret F. (2004). Modelling fruit quality : ecophysiological, agronomiccal and ecological perspectives. In : Dris R and Jain SM (eds)., *Production practices and quality assessment of food crops, Vol 1, "Preharvest practice"*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands, 47-82

Girona J., Mata M., Arbones A., Alegre S., Rufat J., Marsal J. (2003). *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128, 3, 432-440

Gonzalez D. (2006). Effet du déficit hydrique sur l'état de nutrition azotée chez les graminées fourragères. Thèse de doctorat. Université de Poitiers. 164 p. + annexes

Gooding M.J., Ellist R.H., Shewry P.R., Schofield J.D. (2003). Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *Journal of Cereal Science*, 37, 295-309

Granier C., Inzé D., Tardieu F. (2000) Spatial distribution cell division rate can be deduced from that of $P34^{cdc2}$ kinase activity in maize leaves grown in contrasting conditions of temperature and water status. *Plant Physiology*,. 124, 1393-1402

Grosjean F., Barrier-Guillot B. (2004). Facteurs de variation et évaluation de la teneur en mycotoxines des céréales françaises. In : "Action transversale Mycotoxines", Séminaire bilan Toulouse 25-26 oct, INRA, 32-35

Guan, L. & Scandalios, J. G. (1998). Two structurally similar maize cytosolic superoxide dismutase genes, Sod4 and Sod4A, respond differentially to abscisic acid and high osmoticum. *Plant Physiol* 117, 217-24.

Guichard S., Bertin N., Leonardi C., Gary C. (2001). Tomato fruit quality in relation to water and carbon fluxes. *Agronomie*, 21, 385-392

Hajheidari M., Abdollahian-Noghabi M., Askari H., Heidari M., Sadeghian S.Y., Ober E.S. & Hosseini Salekdeh G. (2005). Proteome analysis of sugar beet leaves under drought stress. *Proteomics*, 5, 950-60

Hammer G., Chapman S., van Oosterom E., Podlich D. (2005). Trait physiology and crop modelling as a framework to link phenotypic complexity to underlying genetic systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56, 947-960

Hayashi H., Alia Mustardy L., Deshnium P., Ida M., Murata N. (1997). Transformation of Arabidopsis thaliana with the codA gene for choline oxidase; accumulation of glycinebetaine and enhanced tolerance to salt and cold stress. *Plant Journal*, 12, 133-42

Hiler E.A., Van Bavel C.H.M., Hossain M.M., Jordan W.R. (1972). Sensivity of southern peas to plant water deficit at three growth stages. *Agronomy Journal*., 64, 60-64

Hope R., Aldred D., Magan N. (2005). Comparison of environmental profiles for growth and deoxynivalenol production by Fusarium culmorum and F graminearum on wheat grain. *Letter in Applied Microbiology,* 40, 295-300

Huglin P. (1986). *Biologie et écologie de la vigne.* INRA (ed), Payot Lausanne, Technique &Documentation, Paris, 125-151

Iuchi S., Kobayashi M., Taji T., Naramoto M., Seki M., Kato T., Tabata S., Kakubari Y., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. (2001) Regulation of drought tolerance by gene manipulation of 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase, a key enzyme in abscisic acid biosynthesis in Arabidopsis. *Plant Journal,* 27, 325-33

James J.J., Richard J.H. (2005). Plant N capture from pulses: effects of pulse size, growth rate, and other soil resources. *Oecologia*, 145: 113-122

Jones HG (1992) Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University Press, Cambridge UK.

Kaminaka H., Morita S., Tokumoto M., Masumura T., Tanaka K. (1999). Differential gene expressions of rice superoxide dismutase isoforms to oxidative and environmental stresses. *Free Radical Research*, 31 Suppl, S219-25

Kawaguchi R., Girke T., Bray E.A., Bailey-Serres J. (2004). Differential mRNA translation contributes to gene regulation under non-stress and dehydration stress conditions in Arabidopsis thaliana. *Plant Journal*, 38, 823-39

Kawasaki S., Borchert C., Deyholos M., Wang H., Brazille S., Kawai K., Galbraith D., Bohnert H.J. (2001). Gene expression profiles during the initial phase of salt stress in rice. *Plant Cell*, 13, 889-905

Kays S.J. (1999). Preharvest factors affecting appearance. *Postharvest Biology and Technology*, 15, 233-247

Kim J.Y., Mahe A., Brangeon J., Prioul, J.L. (2000). A maize vacuolar invertase, IVR2, is induced by water stress. Organ/tissue specificity and diurnal modulation of expression. *Plant Physiology*, 124, 71-84

Kishor P.B.K., Hong Z., Miao C.H., Hu C.A.A., Verma D.P.S. (1995). Overexpression of A1-Pyrroline-5-Carboxylate Synthetase Increases Proline Production and Confers Osmotolerance in Transgenic Plants *Plant Physiology* 108: 1387-1 394

Inze D., van Montagu M. (1995). Oxidative stress in plants. *Curr Opin Biotechnol*ogy 6*:*153-158.

Lebon E., Pellegrino A., Tardieu F., Lecoeur J. (2004) Shoot development in grapevine is affected by the modular branching pattern of the stem and intra and inter-shoot trophic competition. *Annals of Botany*, 93, 263-274

Lecoeur J., Wery J., Turc O., Tardieu F. (1995). Expansion of pea leaves subjected to short water deficit: cell number and cell size are sensitive to stress at different periods of leaf development. *Journal of Experimental Botany*, 46 1093-1101

Leinonen I., Jones H.G. (2004). Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. J. Exp. Bot., 55, 1423 - 1431.

Lemaire G., Denoix A. (1987). Croissance estivale en matière sèche de peuplements de fétuque élevée (Festuca arundinacea Schreb.) et de dactyle (Dactylis glomerata L.) dans l'Ouest de la France. II. Interaction entre les niveaux d'alimentation hydrique et de nutrition azotée. *Agronomie,* 7(6) : 381-389

Lemaire G., Durand J.L., Lila M. (1989). Effet de la sécheresse sur la valeur énergétique et azotée de la luzerne. *Agronomie*, 9(9), 841-848

Leon P., Sheen J. (2003) Sugar and hormone connections. *Trends in Plant Science* , 8, 110-116

Lescourret F., Blecher N., Habib R., Chadoeuf J., Agostini D., Pailly O., Vaissière B., Poggi I. (1999). Development of a simulation model for studying kiwi fruit orchard management. *Agricultural Systems*, 59, 215-239

Martre P., Morillon R., Barrieu F., North G.B., Nobel P., Chrispeels M.J. (2002). Plasma membrane aquaporins play a significant role during recovery from water deficit. *Plant Physiology*, 130, 2101-2110

Martre P., Porter J.R., Jamiesson P., Triboi E. (2003). Modeling Grain Nitrogen Accumulation and Protein Composition to Understand the Sink/Source Regulations of Nitrogen Remobilization for Wheat. *Plant Physiology*, 133, 1959-1967

Monet R. (1983). Le pêcher. Génétique et physiologie. INRA (ed), Masson, 86-96

Munné-Bosch S and Alegre L (2000). The significance of beta-carotene, alpha-tocopherol and the xanthophyll cycle in droughted Melissa officinalis plants. Aust J *Plant Physiol* 27*:* 139-146.

Luu D.T., Maurel C. (2005). Aquaporins in challenging environment : molecular gears for adjusting plant water status. *Plant Cell and Environment*, 28, 85-96

Ojeda H., Kraeva E., Deloire A., Carbonneau A., Andary C. (2002). Influence of pre and post-veraison water deficits on synthesis and concentration of skins phenolic compounds during the berry growth of Shiraz grapes (Vitis vinifera L.). *American Journal of Enology and Viticulture*, 53 (4).: 261-267.

Peyrot des Gachons C., Van Leeuwen C.V., Tominaga T., Soyer JP., Gaudillère JP, Dubourdieu D. (2005). Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of Vitis vinifera L cv Sauvignon blanc in field conditions. *Journal of the Science Food and Agriculture,* 85, 73-85

Rey P., Pruvot G., Becuwe N., Eymery F., Rumeau D., Peltier G. (1998). A novel thioredoxin-like protein located in the chloroplast is induced by water deficit in Solanum tuberosum L. plants. *Plant Journal,* 13, 97-107

Reymond M., Muller B., Leonardi A., Charcosset A., Tardieu F. (2003). Combining quantitative trait loci analysis and an ecophysiological model to analyse the genetic variability of the responses of leaf growth to temperature and water deficit. *Plant Physiology*, 131, 664-675

Rabbani M.A., Maruyama K., Abe H., Khan M.A., Katsura K., Ito Y., Yoshiwara K., Seki M., Shinozaki K. & Yamaguchi-Shinozaki K. (2003). Monitoring expression profiles of rice genes under cold, drought, and high-salinity stresses and abscisic acid application using cDNA microarray and RNA gel-blot analyses. *Plant Physiol* 133, 1755-67.

Ribaut J.M., Jiang C., Gonzalez de Leon D., Edmeades G.O., Hoisington, D.A. (1997). Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize. 2. Yield components and marker-assisted selection strategies. *Theoretical and Applied Genetics,* 94, 887-896

Ribaut J.M., Hoisington D.A., Deutsch J.A., Jiang C., Gonzalez-de-Leon D. (1996). Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize. 1. Flowering parameters and the anthesis-silking interval. *Theoretical and Applied Genetics,* 92, 905-914

Ribaut J.M., Banziger M., Hoisington D. (2002) Genetic dissection and plant improvement under abiotic stress conditions: drought tolerance in maize as an example. JIRCAS Working Report (2002) 85-92.

Riccardi F., Gazeau P., Jacquemot M.P., Vincent D., Zivy M. (2004). Deciphering genetic variations of proteome responses to water deficit in maize leaves. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42, 1003-11

Riccardi F., Gazeau P., de Vienne D., Zivy M. (1998). Protein changes in response to progressive water deficit in maize: quantitative variation and polypeptide identification. *Plant Physiology,* 117, 1253-1263

Rizhsky L., Liang H., Shuman J., Shulaev V., Davletova S. & Mittler R. (2004). When defense pathways collide. The response of Arabidopsis to a combination of drought and heat stress. *Plant Physiol* **134**, 1683-96.

Robelin M. (1963). Contribution à l'étude du comportement du maïs-grain vis-à-vis de la sécheresse. Journées internationales de l'irrigation, AGPM Ed, 69-76

Ruffner H.P., Brem S., Malpiero U. (1983). The physiology of acid metabolism in grape berry ripening. *Acta Horticulturae,* 139, 123-127

Saab I.N., Sharp R.E. (1989) Non-hydraulic signals from maize roots in drying soil : inhibition of leaf elongation but not stomatal conductance. *Planta*: 466-474.

Saab I.N., Sharp R.E., Pritchard J. (1990) Increased endogenous abscisic acid maintains primary root growth and inhibits shoot growth of maize seedlings at low water potentials. *Plant Physiology* , 93, 1329-1336

Sadras V.O. (2005). A quantitative top-down view of interactions between stresses: theory and analysis of nitrogen-water co-limitation in Mediterranean agro-ecosystems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56: 1151-1157

Salekdeh G.H., Siopongco J., Wade L.J., Ghareyazie B., Bennett J. (2002). A proteomic approach to analyzing drought- and salt-responsiveness in rice. *Field Crops Research,* 76, 199-219

Sanchez J.P., Duque P., Chua N.H. (2004). ABA activates ADPR cyclase and cADPR induces a subset of ABA-responsive genes in Arabidopsis. *Plant Journal*, 38, 381-95

Seki M., Narusaka M., Abe H., Kasuga M., Yamaguchi-Shinozaki K., Carninci P., Hayashizaki Y., Shinozaki K. (2001). Monitoring the expression pattern of 1300 Arabidopsis genes under drought and cold stresses by using a full-length cDNA microarray. *Plant Cell*, 13, 61-72

Seki M., Narusaka M., Ishida J., Nanjo T., Fujita M., Oono Y., Kamiya A., Nakajima M., Enju A., Sakurai T., Satou M., Akiyama K., Taji T., Yamaguchi-Shinozaki K., Carninci P., Kawai J., Hayashizaki Y., Shinozaki K. (2002). Monitoring the expression profiles of 7000 Arabidopsis genes under drought, cold and high-salinity stresses using a full-length cDNA microarray. *Plant Journal*, 31, 279-92

Sharp R.E. (2002). Interaction with ethylene : changing views on the role of abscisic acid in root and shoot growth responses to water stress. *Plant Cell and Environment*, 25, 211-222

Shen B., Jensen R.G., Bohnert H.J. (1997). Increased resistance to oxidative stress in transgenic plants by targeting mannitol biosynthesis to chloroplasts. *Plant Physiology*, 113, 1177-83

Shinozaki K., Yamaguchi-Shinozaki K. (2000). Molecular responses to dehydration and low temperature: differences and cross-talk between two stress signaling pathways. *Current Opinion in Plant Biology*, 3, 217-23

Skriver K., Olsen F.L., Rogers J.C., Mundy J. (1991). Cis-acting DNA elements responsive to gibberellin and its antagonist abscisic acid. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA,* 88, 7266-70

Steudle E. (2001). The cohesion-tension mechanism and the acquisition of water by plant roots. *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology*, 52, 847-875

Tardieu F. (2003). Virtual Plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends in Plant Science*, 8, 9-14

Tardieu F., Davies W.J. (1993) Integration of hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants. *Plant, Cell and Environment*, 16, 341-349.

Triboi E., Martre P., Triboi A.M. (2003). Environmentally-induced changes of proteins composition for developing grain of wheat are related to changes in total protein content. *Journal of Experimental Botany*, 84, 388, 1731-1742

Triboi E., Triboi-Blondel A.M. (2002). Productivity and grain or seed composition : a new approach to an old problem – invited paper. *European Journal of Agronomy*, 16, 163-186

Triboi-Blondel A.M., Renard M. (1999). Effects of temperature and water stress on fatty acid composition of rapeseed oil. 10th International Rapeseed Congress, 26-29/09 1999, Canberra, Australia, 4p.

Triboi-Blondel A.M., Triboi E. (2000). A modelling approach to integrate the effects of post-anthesis temperature and water stress on grain growth and composition of wheat, rapeseed and sunflower. Proc ESA, 3rd International Crop Science Congress, 17-22/08 2000, Hambourg (Germany)

Tuberosa R., Salvi S., Sanguineti M.C., Landi P., Maccaferri M., Conti S. (2002). Mapping QTLs regulating morpho-physiological traits and yield: case studies, shortcomings and perspectives in drought-stressed maize. *Annals of Botany*, 89 n° spec., 941-63

Uno Y., Furihata T., Abe H., Yoshida R., Shinozaki K., Yamaguchi-Shinozaki K. (2000). Arabidopsis basic leucine zipper transcription factors involved in an abscisic acid-dependent signal transduction pathway under drought and high-salinity conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 97, 11632-7

Van Genuchten M.T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsatured soils. *Soil Science Society of America Journal*, 4 : 892-898

Van Keulen H. (1981). Modelling the interaction of water and nitrogen. *Plant and Soil*, 58: 205-229

Vincent D., Lapierre C., Pollet B., Cornic G., Negroni L., Zivy M. (2005). Water deficits affect caffeate O-methyltransferase, lignification, and related enzymes in maize leaves. A proteomic investigation. *Plant Physiology*, 137, 949-60

Westgate M.E., Boyer J.S. (1985). Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem and silk growth at low water potentials in maize. *Planta*, 164, 540-549

Wilkinson S., Davies W.J. (1997). Xylem sap pH increase: a drought signal received at the apoplastic face of guard cell that involves the supression of saturable abscisic acid uptake by epidermal symplast. *Plant Physiology,* 113, 559-573

Wu Y., Cosgrove D.J. (2000). Adaptation of roots to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins. *Journal of Experimental Botany,* 51, 1543-1553

Wu B.H., Génard M., Lescourret F., Gomez L., Li S.H. (2002). Influence of assimilate and water supply on seasonal variation of acids in peach (cv Suncrest). *Journal of the Science of Food and agriculture*, 82,1829-2002

Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. (1994). A novel cis-acting element in an Arabidopsis gene is involved in responsiveness to drought, low-temperature, or high-salt stress. *Plant Cell*, 6, 251-64

Yu L.X., Setter T.L. (2003). Comparative transcriptional profiling of placenta and endosperm in developing maize kernels in response to water deficit. *Plant Physiology*, 131, 568-82

Zhang J., Nguyen H.T., Blum A. (1999). Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. *Journal of Experimental Botany*, 50, 291-302

Zinselmeier C., Jeong B.R., Boyer J.S. (1999). Starch and the control of kernel number in maize at low water potentials. *Plant Physiology*, 121, 25-36

Zhu C., Schraut D., Hartung W., Schaffner A.R. (2005). Differential responses of maize MIP genes to salt stress and ABA. *Journal of Experimental Botany*, 56, 2971-2981

Annexe. Etat hydrique des plantes et du sol

L'état hydrique des plantes et des sols peut être défini par leur teneur en eau ou "humidité" ($g.g^{-1}$) ou par l'état énergétique de l'eau (eau plus ou moins retenue par le matériau où elle est adsorbée, par analogie avec la pression à apporter à une éponge pour en extraire l'eau. Des éponges faites avec des matériaux différents peuvent avoir des humidités différentes pour une même pression de la main). L'état énergétique est défini par le potentiel hydrique, énergie qu'il faut apporter à l'unité de volume d'eau pour l'amener à l'état libre ("goutte d'eau qui s'échappe de l'éponge"). Il est exprimé en unités de pression, en général MPa. Il est négatif puisque l'énergie est apportée au système.

L'eau s'écoule depuis les potentiels les plus élevés ("humides", proches de zéro) vers les potentiels les plus faibles (secs, plus négatifs), de la même manière qu'une rivière coule des altitudes élevées aux altitudes faibles.

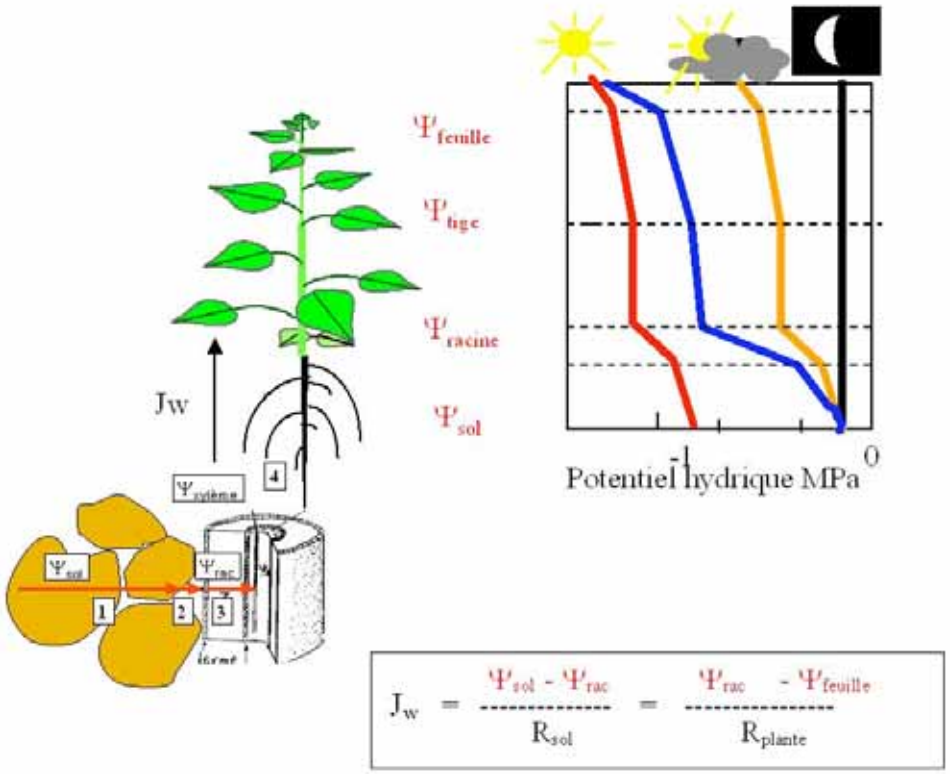
Le potentiel hydrique des plantes a plusieurs composantes, essentiellement :
- la composante hydrostatique Ψ_p, pression exercée sur l'eau, négative si l'eau est sous tension comme dans une paille, et positive si l'eau est sous pression comme dans une seringue. L'eau des cellules doit être sous pression pour un bon fonctionnement de la plante, en générale de 0,4 à 1 MPa. C'est la turgescence ;
- la composante osmotique (Ψ_{osm}) liée à la concentration en solutés. Elle est d'autant plus négative que la concentration en solutés s'élève.

Dans une plante, ces deux composantes représentent la quasi totalité du potentiel hydrique total d'un organe. On a donc :

$$\Psi_{tot} = \Psi_P + \Psi_{osm} \qquad (1)$$

Si la cellule perd de l'eau (Ψ_{tot} diminue), chez la majorité des espèces la cellule accumule en même temps des solutés (Ψ_{osm} diminue), si bien que la turgescence peut être maintenue constante. C'est l'ajustement osmotique, caractère d'adaptation au déficit hydrique des plantes.

Figure A.1. Ecoulement de l'eau, état hydrique du sol et de la plante et demande évaporative



L'eau est transpirée par la feuille, d'autant plus que la demande climatique est élevée (courbes noire, nuit, orange, journée nuageuse, et bleue, journée ensoleillée et sèche). L'eau "coule" depuis le sol où elle est peu retenue (fort potentiel hydrique, Ψ_{sol}) vers les feuilles où elle est plus retenue (faible potentiel hydrique $\Psi_{feuille}$). Ce mouvement peut être décrit par une équation de transfert où le flux (J_w) est d'autant plus fort que la différence de potentiel hydrique (Ψ_{sol} - $\Psi_{feuille}$) est grande, et que la résistance au transfert (R) est faible. La principale résistance au transfert de l'eau se trouve dans les stomates, qui chez une plante bien irriguée sont d'autant plus ouverts que la plante reçoit plus de lumière. L'état hydrique de la feuille est plus défavorable (Ψ_{sol} plus faible) lorsque la transpiration est élevée que lorsqu'elle est faible.

Chez une plante en déficit hydrique (courbe rouge dans la figure, Ψ_{sol} = -0,9 MPa au lieu de 0,05 MPa chez les plantes irriguées), les stomates sont aussi partiellement fermés. Ceci diminue le flux d'eau J_w, et donc la différence de potentiel hydrique entre le sol et les racines. Les feuilles peuvent ainsi garder un potentiel hydrique acceptable bien que le sol soit sec. Cette fermeture stomatique est donc un processus adaptatif nécessaire à la survie de la plante. Elle a l'inconvénient de ralentir la photosynthèse et de causer l'échauffement de la feuille (cf., section 1.1.2.2., échanges "eau contre carbone" et "eau contre chaleur").

1.1.3. Sensibilité à la sécheresse des systèmes de culture (grandes cultures, vigne et arboriculture fruitière)

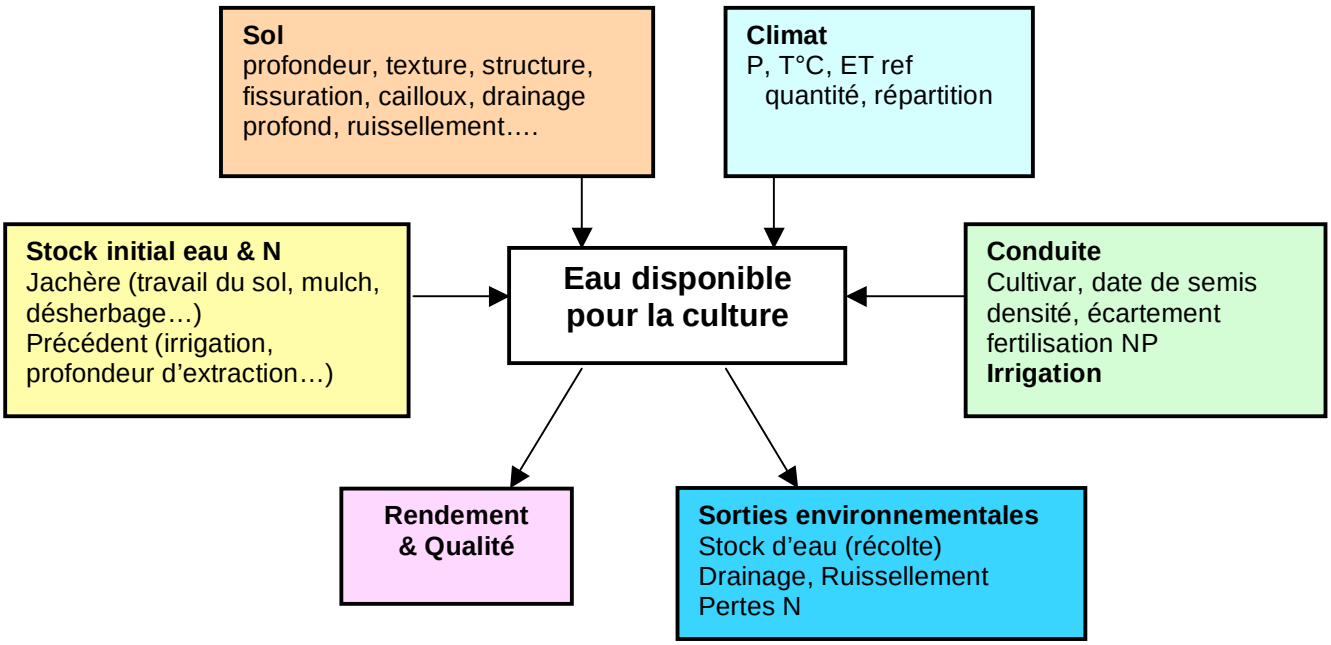
Philippe Debaeke (INRA, Toulouse), Michel Bertrand (INRA, Grignon), Christian Gary (INRA, Montpellier)

1.1.3.1. La sécheresse agricole dans le contexte français

Tout agriculteur en France qui n'a pas recours à l'irrigation est confronté au risque de sécheresse édaphique, avec plus de fréquence en conditions méridionales, sur sol superficiel et pour les cultures d'été. La sécheresse édaphique résulte en premier lieu de conditions physiques que l'on ne peut corriger (Figure 1) : défaut structurel de stockage en eau du sol (profondeur, structure, texture, pierrosité…), défaut de pluviométrie en interculture ou en période de végétation associée à une forte demande évaporative (rayonnement et températures élevés).

Figure 1. Déterminants de l'eau disponible pour la culture

La sécheresse peut être chronique ou occasionnelle ; elle peut être d'origine pédologique, climatique ou liée à la conduite de culture (semis tardifs, irrigation déficitaire…).



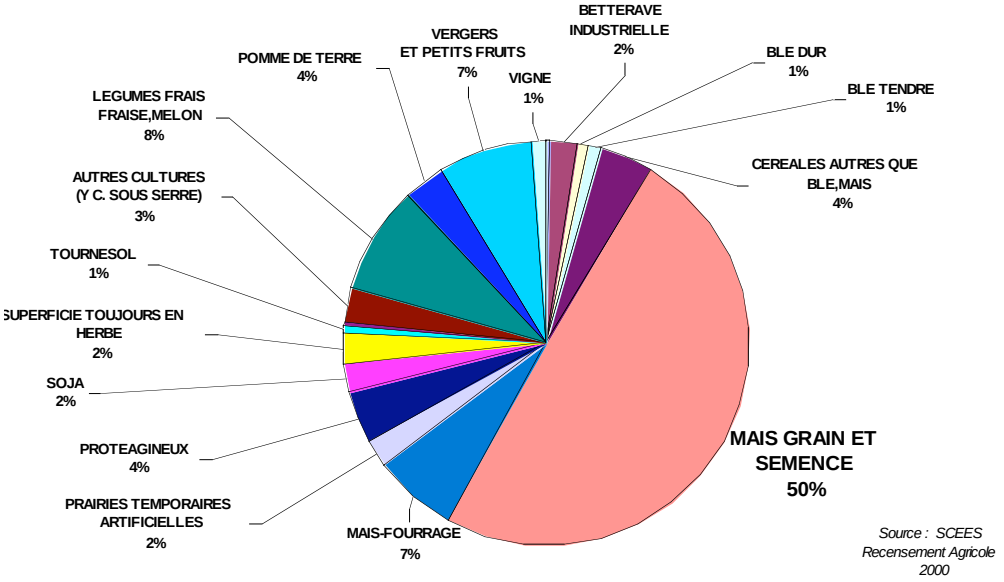
En zone méditerranéenne semi-aride, là où la plupart des références (internationales) sont produites, la variabilité de pluviométrie en interculture peut amener à l'impossibilité d'accomplir un cycle de culture de printemps si le stock est trop bas ; par ailleurs, c'est le retour des pluies à l'automne qui décide de la date d'implantation ; enfin, la distribution des pluies au cours de la saison conditionne le succès des techniques de rationnement végétatif et d'esquive (Cooper et Gregory, 1987 ; Turner, 2004). On parle ainsi de sécheresse terminale ('terminal drought') pour indiquer que c'est le manque d'eau qui clôt le cycle de la plante, avec des conséquences variables selon la précocité et l'intensité de la sécheresse. Ces conditions ne sont pas celles rencontrées par les systèmes de culture en France, bien que certaines années l'indice d'aridité Pluie/Evapotranspiration puisse positionner certaines situations françaises en régime semi-aride (1989 ou 2003 dans le Sud-Ouest, par exemple).

Dans la plupart des régions, les irrigants sont confrontés au risque de sécheresse hydrologique, avec ses conséquences sur le remplissage hivernal des retenues (barrages, lacs collinaires…) et des nappes, et sur les autorisations de pompage en nappes et rivières au cours de la saison. L'origine de la

ressource (barrage, lac ou rivière), le caractère collectif ou individuel de la gestion, l'incertitude sur le volume ou le débit disponible, la capacité d'irrigation de l'installation (mm par jour) sont autant d'éléments qui peuvent différencier au sein d'une même région la sensibilité à la sécheresse des systèmes de culture irrigués.

L'incapacité de relayer suffisamment le défaut de ressource édaphique et pluviométrique par une irrigation, tant pour des raisons de disponibilité totale que de période d'apport, introduit la notion d'irrigation déficitaire ou restrictive ; on parle plutôt d'irrigation d'appoint ou de complément pour caractériser un programme d'irrigation mettant en jeu un nombre limité d'applications en vue de compléter les ressources sol + pluie (Debaeke, 2003). L'irrigation de complément permet de stabiliser la quantité et la qualité produite, alors même qu'une production non irriguée resterait faisable et rentable (céréales à paille, sorgho…). On ne peut employer tout à fait ce terme pour l'irrigation du maïs-grain dans la plupart des contextes pédoclimatiques où cette culture est irriguée et pour certains systèmes (arboriculture fruitière, cultures légumières), qui ne pourraient exister durablement sans irrigation. Ainsi, en grande culture, l'irrigation de complément au sens strict (grandes cultures sauf maïs, soja et pomme de terre) ne concerne qu'une faible partie de la sole irriguée (20% environ de la sole irriguée en grande culture) (Figure 2). Dans certains milieux, la pomme de terre pourrait s'affranchir d'irrigation. Cependant, pour respecter le cahier des charges de l'industrie et du marché des pommes de terre de consommation (calibre et présentation des tubercules), cette culture est de plus en plus irriguée (notamment en Picardie : 46% de la surface en pomme de terre) avec des doses élevées (4 passages, 90-100 mm en Picardie) (Agreste, 2004).

Figure 2. **Répartition des cultures irriguées en surface en 2000**



Le cas de la vigne est particulier. Pour la production de raisin de table, on cherche à éviter le déficit hydrique comme pour la plupart des cultures fruitières. Pour la production de raisin de cuve en revanche, le déficit hydrique est utilisé comme un moyen de piloter l'élaboration du rendement et de la qualité en limitant le développement végétatif (pour favoriser la croissance des fruits et générer un microclimat moins favorable aux maladies cryptogamiques), en ajustant le niveau de rendement au cahier des charges adopté (AOC, vin de pays) et en favorisant l'accumulation de composés associés à la qualité des baies (sucres, anthocyanes…). Quand elle est pratiquée, l'irrigation est donc toujours déficitaire.

On peut caractériser de différentes manières la sécheresse perçue par l'agriculteur, avec des implications variables pour l'adaptation de ses systèmes de culture.

Un premier trait concerne le **caractère exceptionnel ou structurel (sol, climat) de la sécheresse**. On observe des sécheresses 'structurelles', prévisibles (liées au sol, au climat, à l'accès à la ressource pour

l'irrigation, aux systèmes de culture pratiqués) qui affectent régulièrement une partie du territoire et plutôt les cultures de printemps et d'été, et des sécheresses 'exceptionnelles' qui affectent toutes les cultures et la majorité du territoire national. Ces dernières ont un caractère catastrophique et nécessitent une prise en charge de type "calamités agricoles". La sécheresse structurelle fait l'objet d'une adaptation du système de culture (robustesse). Elle peut se traduire également par la souscription de contrats d'assurance récolte.

Un second trait concerne le **caractère aléatoire ou prévisible** de la sécheresse (prévision saisonnière). Dans de nombreuses régions sèches, la période d'arrêt ou de reprise des pluies est cyclique (c'est le cas en région méditerranéenne), avec une certaine régularité en dépit d'une variation sur les quantités de pluie annuelles (la sécheresse est plus ou moins marquée). Dans les régions de l'Ouest Atlantique, la variabilité est à l'évidence plus forte et les possibilités d'anticipation plus réduites : on distingue *a posteriori* des années sèches ou pas avec des fréquences d'1 à 2 années sur 5. Dans certaines régions du globe (Australie, par exemple), une prévision saisonnière du climat (consécutive à la manifestation d'un effet El Niño) est possible, offrant des marges de manoeuvre supplémentaires aux agriculteurs pour s'adapter au risque sécheresse (Meinke et Stone, 2005). Cette prévision saisonnière est à l'évidence plus incertaine pour la France (CSM, 1999). Cependant la connaissance de l'état des ressources en eau en fin d'hiver peut déjà aider aux choix stratégiques pour la campagne d'irrigation (quelles cultures d'été ? quelle irrigation ?).

Enfin, les événements de sécheresse se distinguent par leur **intensité, leur dynamique de mise en place, (brutale ou progressive), leur durée (sécheresses intermittentes ou prolongées) et leurs époques d'apparition** par rapport au cycle cultural (Choisnel, 1993) :
(1) sécheresse d'automne : liée à un retour différé des pluies (alors que le sol est sec en fin d'été)
(2) sécheresse d'automne-hiver : liée à un déficit pluviométrique à une période où le drainage est la norme et où la faible évaporation permet un recomblement en profondeur de la réserve en eau consommée lors de l'été précédent (1988-89 et 1989-90, par exemple)
(3) sécheresse de printemps : souvent intermittente, parfois durable (sécheresse de 1976...)
(4) sécheresse d'été (parfois très marquée comme en 1986), habituelle dans la plupart des régions, en raison du développement de la végétation, de l'augmentation de la demande évaporative, de pluies estivales plus aléatoires ; la sécheresse se manifeste plus ou moins précocement selon le type de sol et les besoins en eau. C'est ce scénario qui est le plus étudié sur le plan agronomique.

C'est souvent la conjonction d'une sécheresse d'hiver et/ou de printemps et d'une sécheresse estivale marquée qui est à l'origine des épisodes de sécheresse exceptionnels : on passe d'une sécheresse intermittente à une sécheresse continue, qui réduit les possibilités de récupération (surtout pour les cultures à cycle court). Ce n'était pas le cas en 2003, où l'hiver a été normalement pluvieux. Par contre le scénario 2005 répond à ce cas de figure (comme 1990 dans le Sud-Ouest).
S'y ajoutent souvent des températures élevées (dès le mois de juin) qui aggravent ou accélèrent la mise en place de la sécheresse pluviométrique (et réduisent la durée de cycle, donc les possibilités de récupération).

Les conséquences sont diverses pour le sol et le peuplement selon la période d'occurrence de la sécheresse.

Tableau 1. Effets de la sécheresse sur le sol et la culture selon la période à laquelle elle se manifeste

Processus affectés	**automne**	**hiver**	**printemps**	**été**
Recomblement de la réserve en eau du sol	+	++	+	
Implantation des cultures (y compris travail du sol)	++ (cultures d'hiver)	+	++ (cultures de printemps)	
Prélèvement d'azote (croissance pré-floraison)		+ (cultures d'hiver)	++ (cultures d'hiver et de printemps)	+ cultures de printemps)
Alimentation hydrique			+	++

+ : effet modéré de la sécheresse ; ++ : effet important de la sécheresse

En ce qui concerne les cultures pérennes fruitières (vignes, vergers), la période de sécheresse affectera successivement :

- au printemps, la mise en place des organes végétatifs et l'élaboration du nombre de fruits ;
- en été, la croissance des fruits, en termes d'accumulation de matière sèche et d'eau, l'élaboration de leur qualité, et l'induction florale qui détermine la fructification de la saison suivante ;
- à l'automne (après récolte des fruits), la durée d'activité de l'appareil végétatif et par conséquent la reconstitution des réserves carbonées et azotées utiles au démarrage du cycle végétatif suivant.

Idées principales

. *Tout agriculteur en France qui n'a pas recours à l'irrigation est confronté au risque de sécheresse édaphique, avec plus de fréquence en conditions méridionales, sur sol superficiel et en cultures d'été.*

. *On peut caractériser la sécheresse agricole par plusieurs critères : exceptionnelle ou structurelle, prévisible ou aléatoire, intense ou non, précoce ou non, durable ou non : ces caractéristiques permettent ou non à l'agriculteur de s'adapter (en stratégique, en tactique…).*

. *La durée et l'époque d'apparition de la sécheresse sont des facteurs clés pour en évaluer les impacts (sol ou plante).*

1.1.3.2. Les impacts annuels et pluri-annuels de la sécheresse

1.1.3.2.1. Conséquences globales d'une sécheresse sur les états du milieu et du peuplement

A l'échelle annuelle, les conséquences d'une sécheresse dépendent de sa période de démarrage (par rapport au stade cultural) et de sa durée d'action.

. Effets sur le peuplement (production et qualité)

Les effets le plus souvent observés au champ sont :
- une levée retardée, incomplète et irrégulière (en vagues) : défaut de peuplement plus grave pour les cultures qui ne ramifient pas (betterave, tournesol…), hétérogénéité dans les stades phénologiques jusqu'à la récolte…
- une implantation racinaire médiocre et superficielle : couverture du sol retardée, carences précoces, sensibilité à la sécheresse de fin de cycle…
- un défaut ou un retard de mise en solution des engrais (azotés) et des pertes par volatilisation
- un défaut de prélèvement du nitrate dans les horizons superficiels, qui sont les plus concentrés et les plus sensibles à la sécheresse édaphique
- une réduction de la surface foliaire, de la biomasse aérienne et du nombre d'organes (grains et fruits en particulier), en raison d'un défaut de transpiration et d'une carence azotée (cf. section 1.1.2.)
- une sénescence accélérée et un défaut de remplissage du grain (ou une réduction de calibre des fruits)
- des conséquences variables sur la qualité du grain ou du fruit.

La reprise tardive des pluies après un épisode de sécheresse peut permettre une compensation partielle par d'autres composantes du rendement (par exemple poids d'1 grain, s'il pleut en période de remplissage). Pour certaines espèces, une reprise de la ramification (tallage pour les céréales) peut être défavorable car elle décale le cycle vers des périodes plus échaudantes qui ne permettront pas de bien valoriser cette apparition de nouveaux organes.

Sur le plan **qualitatif**, les teneurs en huile (colza, tournesol) sont souvent affectées par le stress hydrique en fin de cycle. A l'inverse, dans ces mêmes conditions, les teneurs en protéines du grain sont généralement élevées. Chez les espèces fruitières, plusieurs processus affectés par la contrainte hydrique se superposent : flux d'assimilats, flux d'eau, maturation, équilibre entre tissus liés à la taille du fruit… Cela conduit à associer la qualité de la baie de raisin à des contraintes hydriques modérées.

Par contre si la sécheresse est précoce, le défaut d'absorption d'azote peut également conduire à une diminution de la teneur en protéines sauf si la reprise des pluies permet une absorption de l'azote non

utilisé, après la floraison de la culture. Dans le cas de la vigne, une teneur réduite en azote des moûts entraîne un ralentissement de la fermentation, mais elle peut être corrigée à la cave.

. Effets sur l'humidité et la structure du sol

Les effets précédents sont à mettre en relation avec un défaut d'humidité du sol (en surface ou/et en profondeur), un état structural défavorable si les conditions de travail du sol n'ont pas permis une fragmentation suffisante, un contact terre/graine insuffisant, une fissuration excessive du sol (fentes de retrait)...

Le type de sol et les choix d'intervention mécanique (types d'outils, profondeur, fréquence de passage…) seront déterminants pour l'économie d'eau (notamment en surface) et la réussite de l'implantation. Par contre, la sécheresse permet des récoltes plus précoces sans risque de compaction, facilitant ainsi l'implantation des cultures suivantes.

. Effets sur les bioagresseurs

Sur le plan des bioagresseurs, les années sèches sont très peu concernées par les **maladies cryptogamiques**, tant pour l'infection initiale que pour la progression au sein du peuplement. C'est en particulier le cas lors de sécheresses printanières (montaison des céréales). Cependant des alternances de petites pluies et de périodes sèches peuvent favoriser certains pathogènes à condition que le statut azoté du peuplement ne soit pas trop limitant (oïdium des céréales, mildiou de la vigne...). La reprise des pluies peut provoquer également des attaques de rouille brune sur céréales dont le caractère tardif limite cependant la nuisibilité, ou de botrytis sur les baies de raisin potentiellement très dommageable à la qualité de la vendange. Les plantes affaiblies par la sécheresse pourraient alors être moins résistantes aux attaques de pathogènes (Schoeneweiss, 1985). Ainsi sur tournesol, les attaques de *Macrophomina* sont plus fréquentes pour des plantes subissant la sécheresse (Alexandrov et Koteva, 2001). A l'inverse, l'irrigation, en favorisant la fermeture du couvert et le maintien d'une plus forte humidité relative, est un facteur propice au développement de certaines maladies (par exemple *Sclerotinia* et *Phomopsis c*hez le tournesol) (Alexandrov et Angelova, 2004 ; Debaeke et al., 2003).

Les **ravageurs** peuvent se développer surtout si des changements de régimes thermiques accompagnent la sécheresse (cycles supplémentaires, nouveaux ravageurs "tropicaux"). Les conditions sèches et chaudes peuvent être diversement favorables au développement de nombreux insectes ravageurs des cultures. Ainsi pour la pyrale du maïs, les températures élevées accélèrent les cycles de développement alors que la sécheresse compromet la survie des œufs et des jeunes larves (Faure et al., 2004). Par ailleurs, les plantes affaiblies par la sécheresse pourraient être plus sensibles à l'attaque de certains insectes (Haile, 2001).

L'impact des **adventices** serait plus marqué en raison de la forte compétition pour l'eau que certaines mauvaises herbes peuvent exercer notamment en culture d'été. Si la sécheresse se produit tôt, la levée des adventices sera cependant compromise. Par contre, le défaut de peuplement cultivé (lié à une sécheresse précoce) peut favoriser un salissement en tâches au cours de la saison et une grenaison augmentant le salissement potentiel.

Le défaut d'efficacité de certains herbicides de pré-levée (faible migration en profondeur) peut être responsable de salissements parfois conséquents lors d'années sèches.

Là encore, le cas de la vigne est particulier puisque la recherche d'une contrainte hydrique peut contribuer à justifier l'installation d'un enherbement (spontané ou semé) dans les inter-rangs. Une sécheresse exceptionnelle peut conduire à une contrainte hydrique excessive liée à la compétition pour les ressources hydriques et azotées (faible minéralisation).

En conclusion, les prévisions sont difficiles à réaliser dans ce domaine : de manière certaine, un moindre développement des maladies à dissémination aérienne affectant le couvert foliaire ; de fortes incertitudes sur le développement et l'impact des maladies telluriques, des ravageurs, et des adventices.

. Arrières effets de la sécheresse

Les arrières effets de la sécheresse, qui s'apprécient dans nos conditions à l'échelle de 2 campagnes successives (pour les grandes cultures), rarement plus, se manifestent de plusieurs manières :

- un défaut de remplissage plus ou moins important de la réserve en eau du sol au début de l'automne, plus marqué après certaines cultures d'été à forte extraction en profondeur (sorgho, tournesol) ou après luzerne, limité après maïs irrigué (Debaeke et Cabelguenne, 1994) ; si la période d'interculture est pluvieuse, le début de drainage pourra être retardé dans le premier cas, ce qui est un atout ; si la période est très déficitaire (comme en 1989 ou en 2004), le non-recomblement de la réserve (en sol profond) peut être observé en sortie d'hiver. Les risques d'un drainage au cours de la culture seront très faibles en année sèche et le début de drainage à l'automne dépendra de la date d'arrêt de l'irrigation en fin d'été.

- un reliquat d'azote à la récolte du précédent qui peut être important (lié à une inefficacité de l'azote) et doit donc être pris en compte pour raisonner l'occupation du sol à l'automne et le raisonnement de la fertilisation de la culture suivante (Debaeke et al., 1996).

- dans certains cas, des résidus de produits phytosanitaires dans les horizons superficiels en raison d'une faible dégradation ou de l'absence d'entraînement en profondeur, avec des risques de phytotoxicité pour la culture suivante (blé après tournesol, par exemple), ce qui doit être considéré pour le choix du travail du sol après l'année de sécheresse.

- en cultures pérennes, une vitesse de développement végétatif ralentie au débourrement liée à un défaut d'accumulation de réserves, et une fructification limitée par une mauvaise induction florale au cours de l'année n-1.

***Idées principales** :*

. *La sécheresse peut avoir des effets positifs pour la production (surtout si elle est modérée).*
. *On peut considérer en grande culture que les effets à moyen / long terme sur le bilan hydrique sont négligeables dans le contexte d'alternances de périodes sèches et humides que l'on connaît généralement.*
. *Pour les cultures pérennes, des effets défavorables pour la fructification l'année suivante sont à craindre.*

1.1.3.2.2. Variabilité inter-annuelle des pertes de rendement et de la qualité des graines : effet de la sécheresse

Plusieurs sources de données peuvent renseigner sur les baisses de rendement liées à la sécheresse :
- les expérimentations agronomiques, qui ont le défaut d'être locales et souvent menées en milieu favorable (sols profonds) ;
- les modèles de simulation, qui s'appuient sur la connaissance agronomique mais dont le paramétrage est délicat ;
- les données statistiques régionalisées sur les rendements moyens (SCEES).

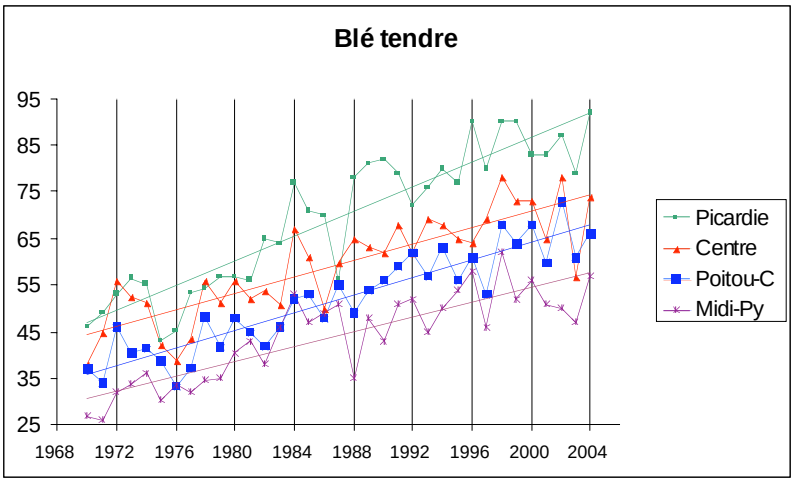
Notre estimation s'est basée sur ces données régionales disponibles sur la période 1970-2005. Ces données rendent compte de la sensibilité des cultures dans leur système de culture (en particulier mode d'irrigation et sols).

. Rendement (source SCEES)

La sensibilité des cultures à la sécheresse dépend de leur sensibilité intrinsèque évoquée plus haut (phases sensibles et critiques, capacités d'extraction d'eau, processus d'endurcissement et d'ajustement…) mais aussi des conditions de culture qui leur sont appliquées (période de semis, irrigation) et des choix variétaux qui sont faits (précocité…). La perte de rendement résulte *in fine* du stade où survient le plus fréquemment le déficit hydrique. Il nous faut superposer ces 3 informations pour comprendre la sensibilité des cultures à la sécheresse telle qu'elle nous est révélée par notre méthode d'estimation basée sur l'analyse des données régionale du SCEES.

Dans 4 régions françaises (Picardie, Centre, Poitou-Charentes, Midi-Pyrénées), nous avons analysé les séries chronologiques de rendement depuis 1970 pour 10 cultures (blé tendre, blé dur, orge d'hiver, colza, maïs-grain, tournesol, sorgho-grain, soja, betterave sucrière, pomme de terre). Pour chaque année, un rendement de référence peut être calculé qui traduit le rendement accessible étant donné le progrès génétique, l'amélioration des techniques culturales et l'évolution climatique (hausse des températures, par exemple) (Figures 3, et 4 à 7 en annexe).

Figure 3. Evolution des rendements du blé tendre pour 4 régions françaises



On montre bien la progression annuelle moyenne des rendements : 11,3 q/ha (betterave), 6,3 q/ha (pomme de terre), 1,4 q/ha (maïs), 1,1 q/ha (blé tendre), 0,9 q/ha (orge d'hiver), 0,8 q/ha (sorgho), 0,5 q/ha (colza), 0,3 q/ha (soja), 0,2 q/ha (tournesol). Si on exprime cet accroissement relativement au rendement de la période 1995-2005, on obtient les valeurs suivantes : 1,7% (maïs), 1,6% (blé tendre, betterave), 1,5% (orge d'hiver), 1,4% (colza, sorgho, pomme de terre), 1,0% (soja) et 0,8% (tournesol).

Tout écart négatif par rapport à cette référence traduit un facteur limitant majeur (sécheresse ou maladie en général). Les indices agroclimatiques et la connaissance des situations vécues permettent d'identifier les facteurs limitants majeurs. La perte de rendement liée à la sécheresse est générale en 1976, 2003 et 2005. Les autres épisodes de sécheresse qui ont davantage touché le Sud-Ouest sont 1982, 1986, 1989, 1990, 1997 et 2004.

Ainsi, lors des grandes sécheresses de 1976 et 2003, on évalue les pertes de rendement :

- sur blé (Tableau 2) : 10 à 30% selon les régions (les petites terres du Centre étant plus sensibles) ;
- sur maïs (Tableau 3 en annexe) : 10 à 55% (selon l'équipement d'irrigation et les restrictions d'accès à la ressource mais aussi à cause du fait que plus de la moitié du maïs grain est cultivé sans irrigation et donc soumis directement aux sècheresses) ;
- sur tournesol (Tableau 4 en annexe) : 5 à 20% en 2003, 40 à 70% en 1976 (tournesol majoritairement non irrigué) ;
- sur sorgho : 14 à 37% (sorgho majoritairement non irrigué).

Tableau 2. Blé tendre : écart de rendement à la référence annuelle (q/ha et %)

	France	Picardie	Centre	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées
1976	-7,8	-9,6 (21%)	-10,9 (28%)	-8,2 (25%)	-2,0 (6%)
2003	-12,8	-11,6 (15%)	-16,4 (29%)	-6,0 (10%)	-9,8 (21%)
2005	-6,0				

Si l'on compare la sensibilité à la sécheresse des cultures entre 1976 et 2003, on retrouve des ordres de grandeur comparables pour le colza, le blé et le maïs, avec le classement suivant pour les pertes : colza

8%, blé 17%, maïs 21% (Figure 8, en annexe). Par contre, la sensibilité de la pomme de terre et de la betterave a été considérablement réduite (développement de l'irrigation). Le sorgho et le tournesol montrent des résultats contrastés : sur ces cultures 'jeunes', l'amélioration génétique a beaucoup progressé au cours de la période.

En 2005, les pertes ont été plus faibles (<10%), le sorgho (10%), le maïs (9%), le blé (6,5%) et le soja (6%) ayant été les plus affectés. Les pertes ne dépassent pas 2% pour les autres productions (dont le tournesol, l'orge, le colza, la pomme de terre et la betterave).

Les séries statistiques permettent de classer les cultures selon leur sensibilité à la sécheresse, en tenant compte des systèmes de culture pratiqués : le colza et le tournesol apparaissent peu sensibles, le blé moyennement sensible, le sorgho (en sec) et le maïs (sec + irrigué) assez sensibles. Notons que le sorgho est plus sensible si la sécheresse se manifeste tôt car l'implantation est alors pénalisée ; par contre, le sorgho tolère bien une sécheresse au cours du remplissage des graines. Le sorgho (comme le tournesol) est souvent cultivé sur des sols plus superficiels que le maïs, ce qui le pénalise d'autant dans les statistiques.

Sur l'exemple de Midi-Pyrénées, nous avons chiffré les pertes pour 7 épisodes marqués de sécheresse depuis 1976 (Tableau 5) : sécheresses de printemps comme en 1997 (6-10 q/ha de pertes sur céréales), sécheresses d'été comme en 1986, 1989 ou 2004 (8-11 q/ha de pertes pour le sorgho non irrigué, 5-6 q/ha pour le maïs irrigué), sécheresses longues comme 2003 (10-13 q/ha de pertes en blé, 4 en tournesol, 26 en sorgho, 27 en maïs, du fait de restrictions à l'irrigation).

Tableau 5. Midi-Pyrénées : évaluation des pertes de rendement liées à la sécheresse (q/ha)

	Blé T	Blé D	Tournesol	Sorgho	Maïs
1976	-2.0	+3.0	**-6.0**	**-9.0**	**-8.9**
1986	+5.6	+4.0	-0.5	**-10.9**	-4.8
1989	+2.3	-4.2	**-2.9**	**-8.3**	-4.6
1990	-3.5	+2.9	-2.1	**-11.1**	-9.2
1997	**-6.0**	**-10.0**	+1.0	+11.6	+14.7
2003	**-9.8**	**-12.8**	**-3.8**	**-26.2**	**-26.9**
2004	-0.6	-1.8	-0.9	**-7.8**	-5.5

Printemps + été **Printemps** **Eté**

On note par ailleurs que les pertes dues à la sécheresse sont de la même ampleur que des attaques parasitaires mal contrôlées (Midi-Pyrénées : phomopsis sur tournesol en 1992-93 : 17-36% ; rouille brune sur blé en 1988 : 16%) (Figures 3 ; Figure 5). Une différence notable concerne le caractère général des pertes liées à la sécheresse qui affecte le plus souvent cultures d'hiver et d'été.

Depuis quelques années seulement, les statistiques du SCEES distinguent les rendements du maïs en sec et en irrigué. Une forte baisse du rendement en non irrigué est observée en 2003 (-30% par rapport à 2002, contre -12% avec irrigation), mais les baisses sont plus faibles en 2005 (-12% en sec, -3% en irrigué).

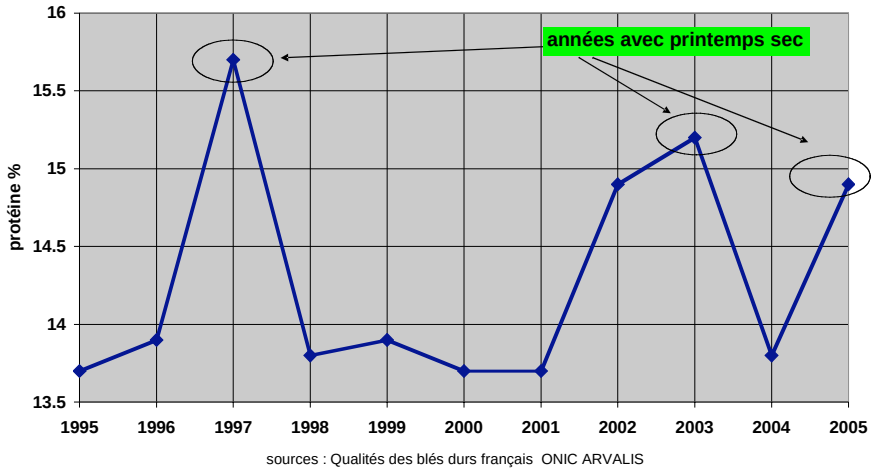
Tableau 6. Répartition des surfaces et rendement du maïs selon l'irrigation

		2002	2003	2004	2005
Maïs non irrigué :	Surfaces (ha) Rendement (q/ha)	1 027 095 84	900 610 59 (-30%)	1 011 183 83	931 476 74
Maïs irrigué :	Surfaces (ha) % du total maïs Rendement (q/ha)	753 055 (42%) 101	735 160 (45%) 89 (-12%)	755 392 (43%) 103	683 317 (42%) 98

. Teneur en protéines du blé (d'après ONIC, résultats communiqués par ARVALIS)

La teneur en protéines des céréales augmente lors des années à printemps sec (1997, 2003, 2005), compensant ainsi en partie le défaut de rendement par un supplément de qualité valorisable.

Figure 9 **Taux de protéine du blé dur de la région Sud-Ouest en %**



. Teneur en huile du tournesol et du colza (d'après les données du Cetiom)

La teneur en huile du tournesol (1993-2005) est de 46,3% en moyenne pour les régions Nord et Est et de 45,1 pour les régions plus méridionales (Centre, Poitou-Charentes, Midi-Pyrénées). C'est en 1993 (maladies) et en 2003 (sécheresse) que l'on a observé les plus faibles teneurs en huile : respectivement 1,3% et 1,2% de perte en huile par rapport à la moyenne de 45,4%, se surajoutant à une perte de rendement.
Pour le colza, la variabilité inter-régionale est faible. En 2003, la perte d'huile a été de 1,6% par rapport à la valeur moyenne de 43,3%.

Ces résultats confirment les données de la littérature qui concluent toujours à une baisse de la teneur en huile en présence de contrainte hydrique en post-floraison pour les oléagineux (Ouattar et al., 1992 ; Champolivier et Merrien, 1996 ; Baldini et al., 2002 ; Santonoceto et al., 2003).

Idées principales

. Les séries statistiques permettent de classer les cultures selon leur sensibilité dans les systèmes de culture (ainsi colza et tournesol sont peu sensibles, blé moyennement sensible, sorgho (sec) et maïs (irrigué) assez sensibles) : pertes de 10 à 25% lors des grandes sécheresses ; cette sensibilité évolue avec le déplacement des cultures vers certains sols ou l'adoption de l'irrigation (pomme de terre par exemple).

. La teneur en protéines (céréales) augmente en année sèche ; la teneur en huile (oléagineux) suit la tendance inverse.

1.1.3.3. Réaction des agriculteurs face à la sécheresse

1.1.3.3.1. Les marges de manoeuvre

Plusieurs stratégies d'adaptation au stress hydrique à l'échelle de la culture ont été décrites dans la littérature, principalement pour évaluer l'adaptation variétale (Ludlow & Muchow, 1990) mais que l'on peut appliquer également à la conduite de culture:

(a) l'**esquive**, qui consiste à achever le cycle cultural avant l'apparition de sécheresses drastiques ('terminal drought') ou, sous nos climats, de décaler les phases les plus sensibles par rapport aux périodes de forte demande climatique ou de faibles précipitations ;
(b) la **tolérance,** lorsque la culture maintient sa croissance à de plus faibles teneurs en eau (sol, plante).
Par la conduite de culture, il est possible également de réduire les besoins en eau de la culture. On parle ainsi de **'rationnement végétatif'** pour désigner une stratégie de (c) **réduction précoce du prélèvement d'eau** en vue d'un report aux phases de plus forts besoins (floraison, remplissage). La réduction de la surface foliaire par la culture soumise au stress hydrique modéré constitue ainsi une **stratégie d'évitement** de la sécheresse à venir.
Enfin, le recours à l'irrigation permet (d) **atténuer le stress** pendant les phases les plus sensibles.
Dans les zones où le rendement est régulièrement limité par l'eau, c'est l'application d'une combinaison satisfaisante de ces stratégies qui permet de réduire les impacts du stress hydrique, en évitant de trop pénaliser le rendement les années les plus favorables (recherche de "productivité sous contrainte hydrique" et non de "tolérance à la sécheresse").

La plupart de ces concepts ont été développés dans le cadre de l'aridoculture (*dryland farming)*, mode de production basé sur la capture et l'utilisation la plus efficiente possible des précipitations et de l'eau stockée pendant les périodes d'interculture. On parle de culture pluviale (*rainfed farming)* en situation plus humide pour désigner un système non irrigué permettant la production de cultures d'été en se basant sur la seule ressource 'précipitations'. Alors qu'en aridoculture, l'eau est le facteur limitant majeur, on considère qu'en culture pluviale d'autres considérations telles que la gestion de la fertilité minérale ou la protection contre les bio-agresseurs sont tout aussi importantes que la conservation de l'eau (Robinson, 2003). C'est dans ce contexte que se placent en général nos problématiques françaises de systèmes de culture.

L'agriculteur dispose donc de plusieurs stratégies d'adaptation aux faibles disponibilités hydriques qu'il devra combiner de manière optimale par rapport à des objectifs de production quantitative et qualitative (mais aussi de respect d'objectifs assignés à la culture suivante) et en vue de réduire la variabilité inter-annuelle. Chacune de ces stratégies peut se traduire en objectifs concrets pour la gestion de la ressource.

(1) **Maximiser le stockage de l'eau au semis de la culture** : principalement par les techniques de "conservation" combinant travail du sol et gestion des résidus de récolte (infiltration rapide et profonde, limitation des pertes évaporatives), par la prévention des infestations adventices, par la pratique de la jachère…
(2) **Optimiser l'usage de l'eau stockée tout au long du cycle de végétation** : par un prélèvement d'eau maximal mais optimal dans le temps (enracinement), par le choix d'une densité de peuplement et d'un écartement entre rangs, par la gestion de l'azote…
(3) **Choisir une espèce ou une variété tolérante à la contrainte hydrique** (ou peu consommatrice en eau) ;
(4) **Eviter la coïncidence entre périodes de forte demande évaporative ou de faible pluviométrie et périodes clés du cycle cultural** (en particulier, phases critiques ou sensibles) : choix d'une date de semis et d'une précocité variétale…
(5) **Suppléer aux déficits hydriques les plus importants, les années à printemps sec, par une irrigation de complément**, pour les systèmes de culture concernés par ce type d'irrigation (céréales d'hiver, pois...) ;
(6) **Suppléer aux déficits hydriques plus conséquents et réguliers par des irrigations jugées indispensables à la rentabilité et à la commercialisation de certaines productions** (< 50% des surfaces de maïs-grain qui sont implantés sur sols à réserve en eau faible à moyenne et sous climat séchant ; vergers ; légumes).

Selon les contextes hydrauliques, les questions de gestion optimale de la ressource en eau d'irrigation se posent différemment à l'échelle de l'exploitation (Deumier et al., 1996 ; Puech et al., 1997 ; Nolot et Debaeke, 2003) :

- en conditions où l'eau d'irrigation est peu ou pas limitante, les cultures exigeantes, à forte valorisation de l'eau, sont privilégiées (maïs, soja, par exemple) : il s'agit alors d'optimiser le calendrier d'irrigation pour chaque culture, en donnant la priorité au pilotage de l'irrigation (assurer les besoins) tout en limitant les effets indésirables pour l'environnement ou la culture suivante (pollution azotée, dégradation de la structure) ;
- en condition d'eau d'irrigation plus limitée (en volumes, débits, surfaces), il s'agit d'optimiser le choix d'assolement et d'allocation de la ressource entre cultures (voire variétés) compte tenu des périodes de sensibilité au stress de chaque espèce : une diversification plus grande est attendue, avec des cultures faiblement voire non irriguées ;
- en l'absence d'irrigation, il s'agit d'adapter la conduite de culture et les choix d'espèces et de variétés à la variabilité attendue du déficit hydrique et au risque de plus faible valorisation des intrants. Les adaptations à l'échelle de la culture et du système de culture dépendront fortement de l'intensité de la contrainte.

L'efficacité de ces stratégies devra être évaluée par rapport au maintien d'une production à un niveau acceptable mais également par la réduction de la variabilité de résultat qui accompagne souvent les situations où le déficit hydrique est chronique mais surtout très variable.

La variabilité pluviométrique peut rendre difficile l'identification de pratiques optimales sous certains climats. D'où le recours chaque fois que possible à des outils d'évaluation de scénarios basés sur la modélisation (Cabelguenne et al., 1995 ; Bergez et al., 2002).

Idées principales

- *L'agriculteur dispose de plusieurs stratégies d'adaptation aux faibles disponibilités hydriques. Chacune de ces stratégies peut se traduire en objectifs concrets pour la gestion de la ressource : cf. (1) à (6).*
- *Le contexte français n'est pas (encore) celui de l'aridoculture ; néanmoins, l'irrigation s'est beaucoup développée depuis 10-15 ans.*
- *On peut distinguer une irrigation de complément (1-2 apports), occasionnelle (1 année sur 5) qui permet de régulariser la production et la qualité et une irrigation plus conséquente (5-7 apports en moyenne) et plus régulière (tous les ans) sans laquelle certaines cultures ne seraient pas possibles dans certaines régions (climat séchant, sol superficiel).*

1.1.3.3.2. Comment les agriculteurs se sont-ils ajustés lors des sécheresses récentes ?

Dans les régions arides et semi-arides où l'efficience d'utilisation de l'eau est toujours problématique, les systèmes de culture se sont adaptés depuis longtemps (Loomis, 1983 ; Turner, 2004). Dans nos régions humides à sub-humides où la sécheresse marquée est occasionnelle, cet évènement est accepté comme un risque.

L'analyse des sécheresses récentes montre que les agriculteurs s'ajustent avant tout par l'**assolement**, en augmentant la part des cultures d'hiver ou des cultures d'été à besoin d'irrigation limité (tournesol, sorgho). Il est plus difficile de savoir si d'autres adaptations au niveau de l'itinéraire technique sont fondées ou non sur la perception d'un risque de sécheresse accru.

Après les années **1988-91**, où une série de périodes sèches s'est manifestée notamment dans le Sud-Ouest, c'est la prise de conscience d'une nécessité d'une gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation et des possibilités de diversifier les cultures irriguées, dans un contexte de prix plus favorable aux autres cultures d'été (tournesol en particulier). C'est aussi la découverte que des cycles de sécheresse cumulée avec non-recharge hivernale peuvent se rencontrer même sous nos climats.

En **2003**, la sécheresse brutale, après un hiver froid et pluvieux, n'a pas permis d'anticipation au niveau des choix d'assolements.

En **2005**, c'est la connaissance du défaut de remplissage hivernal des sols et des réserves qui a permis d'anticiper fortement sur le choix d'assolement, tout spécialement dans les situations où la réserve en eau des sols était faible et l'irrigation très dépendante de la recharge hivernale (lacs, nappes superficielles…) : le risque sécheresse avait été largement annoncé en février-mars par les Ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement (Comité Sécheresse). Dans les régions, le suivi de l'état de remplissage des ressources est de plus en plus organisé et efficace (DIREN, SAR, Agence de l'Eau…). Ce suivi permet d'informer les filières qui peuvent alors s'organiser à temps.

D'après le SCEES (Agreste – Notes de conjoncture générale), la surface de maïs grain aurait perdu 10% par rapport à 2004 (16% en Poitou-Charentes, 22% dans les Pays de la Loire, 9% en Midi-Pyrénées, 4% en Aquitaine) en raison du déficit hydrologique hivernal et printanier[1]. Au cours de l'été (Pays de la Loire), certaines parcelles semées en maïs grain ont été reconverties en ensilage pour pallier la diminution de production fourragère. Les surfaces de sorgho a augmenté de 5% (surtout en Poitou-Charentes). La sole de tournesol a augmenté de 6% (9% en Midi-Pyrénées, 7% en Aquitaine et Pays de la Loire, 5% dans le Centre, 2% en Poitou-Charentes). Localement, le tournesol a progressé fortement (+20-30%) dans le Tarn-et-Garonne et le Lot-et-Garonne au détriment des cultures irriguées (maïs), mais a reculé dans l'Aude au profit du blé dur.

Le colza, plus précoce encore que les céréales d'hiver, a atteint un rendement record en 2005 (36,4 q/ha). Ce comportement favorable, combiné au développement des biocarburants, pourrait accroître encore la part du colza dans les assolements.

En dépit de ces réajustements annuels, les surfaces de tournesol et de sorgho baissent régulièrement depuis 10-15 ans pour des raisons de prix et de marchés.

Pour le sorgho, un regain d'intérêt s'observe après chaque épisode marqué de sécheresse (1989-90 par exemple), mais il n'y a pas eu jusqu'à présent d'évolution de fond quant au choix d'espèces plus tolérantes à la sécheresse, pour des raisons de marchés (sorgho) et de prix (sorgho, tournesol).

En Poitou-Charentes (sol de groies), le semis de variétés demi-précoces semées assez tôt a permis une esquive de la sécheresse effective en 2005 puisque la floraison est atteinte dès la fin juin. Cette adaptation est moins évidente là où les sols se réchauffent plus lentement (boulbènes du Sud-Ouest).

En **2006**, les alertes ministérielles ont été précoces car le risque d'un non-recomblement des réserves en fin d'hiver a été longtemps présent. De ce fait, mais aussi à cause de la nouvelle PAC, les données 2006 témoignent d'une adaptation significative des agriculteurs (choix de cultures plus précoces ou à plus faible demande en eau). La sole de colza d'hiver a augmenté de façon très nette (+12%), la hausse concernant l'ensemble des régions. La sole de blé dur d'hiver est supérieure de 6% à celle récoltée en 2005, augmentant de façon très nette dans le Centre et en Poitou-Charentes. Alors que le blé tendre est stable, l'orge d'hiver a augmenté de 11 %. Les surfaces en maïs grain ont baissé à nouveau de 9% en 2006, soit une baisse de 17 % en deux ans. Par contre, le sorgho a augmenté de 10 % en 2006 (soit +19 % en 2 ans) alors que le tournesol a peu varié. Les surfaces de maïs fourrage sont restées stables.

Idées principales

*L'analyse des sécheresses récentes montre que les agriculteurs s'ajustent avant tout par l'**assolement**, en augmentant la part des cultures d'hiver (colza, blé, orge) et celles des cultures d'été à besoin d'irrigation limité (sorgho, tournesol). Tout dépend si l'alerte sécheresse est suffisamment précoce.*

[1] Les prix moins favorables du maïs en 2004 et le retour à l'obligation de gel à 10% ont probablement contribué à la baisse des surfaces semées en 2005.

1.1.3.3.3. Comment les agriculteurs gèrent-ils l'irrigation : choix stratégiques et tactiques ; quelles adaptations face à la sécheresse hydrologique ?

La surface irrigable représente près de 10% de la SAU, avec de fortes variations régionales. La surface équipée pour l'irrigation était de 2,7 Mha alors que l'irrigation a concerné 1,9 Mha en 2003 (Agreste, 2005). Cette surface équipée est relativement stable depuis ces dernières années alors que l'augmentation a été de 41% entre 1988 et 1995. Ce sont surtout les régions Centre, Poitou-Charentes, Pays de la Loire où l'irrigation était moins traditionnelle qui ont connu un fort développement depuis les sécheresses de 1989 et 1990 (Morardet et al., 1998).

Le maïs (grain et semences) est très nettement la principale culture irriguée (51% de la sole irriguée). Le maïs est principalement pluvial en Bretagne, Normandie, Nord-Picardie et Est (Gleyses et Rieu, 2004).
Le taux global d'irrigation du maïs (surface irriguée / surface de la culture) a fortement augmenté depuis 1988 : entre 42 et 45% sur la période 2000-2004 alors qu'il était de 29% en 1988. Ceci cache de fortes disparités régionales (Gleyses et Rieu, 2004) : le taux d'irrigation dépasse en effet 75% dans une partie importante du bassin Adour-Garonne (Landes, Coteaux de Gascogne, Vallées et Terrasses de la Garonne), en Beauce, sur la Vienne et dans la moyenne vallée du Rhône (Drôme).

Les préoccupations des irrigants concernent la maîtrise globale de leurs systèmes irrigués en recherchant une utilisation optimale des moyens d'arrosage (ressource en eau, main d'œuvre et matériel) (Deumier et al., 1996).

Les choix stratégiques liés au dimensionnement des équipements d'irrigation et aux types de cultures à irriguer, engagent l'irrigant pour plusieurs années (Tableau 7).

Tableau 7. Choix stratégiques et tactiques de l'irrigant (Deumier et al., 2005)

Choix stratégiques		**CHOIX TACTIQUES**
Pour plusieurs années	**Chaque année**	**Chaque année avec décision chaque semaine**
. Accès à la ressource . Dimension et choix des équipements et matériels d'irrigation de la sole irrigable . Main d'œuvre pour l'irrigation . Type de cultures irriguées = assolement irrigué	. Ajustement de l'assolement de la sole irrigable aux contraintes économiques (marge) et hydrauliques (ressource) . Stratégie de conduite de l'irrigation = calendrier prévisionnel d'irrigation . Ajustement du plan prévisionnel d'utilisation du matériel d'irrigation	. Pilotage de l'irrigation en cours de campagne = adaptation du calendrier prévisionnel d'arrosage . Gestion et contrôle du matériel d'irrigation.
Prise en compte du climat "historique"		Prise en compte du climat observé et des prévisions météorologiques.

Les charges d'irrigation en grande culture représentent 20 à 30% du produit brut (aides compensatoires comprises). Compte tenu de ce coût élevé, les aménagements hydrauliques sont rarement dimensionnés pour faire face aux années les plus sèches et les équipements d'irrigation dans les exploitations agricoles ne permettent pas de satisfaire les besoins en eau des cultures dans toutes les situations. Les systèmes d'irrigation sont réfléchis pour couvrir les besoins en eau 8 années sur 10 dans les meilleurs cas.

Chaque année cependant l'irrigant a la possibilité d'ajuster ses choix en fonction des contraintes économiques de l'année (hypothèse de prix des produits, montants des aides compensatoires, coût de l'eau…) et hydrauliques (état de la ressource en eau) dans le cadre défini auparavant :

- l'assolement de la sole irrigable doit tenir compte en effet de ces contraintes : quelles cultures, quel volume d'eau et quel débit pour chaque culture irriguée ?

– le calendrier prévisionnel d'arrosage et le plan d'utilisation du matériel d'irrigation sont alors revus et adaptés. Cela est particulièrement vrai pour les chantiers d'irrigation avec des canons-enrouleurs.

Pendant la campagne d'irrigation, l'irrigant conduit les irrigations en adaptant le calendrier prévisionnel d'arrosage aux événements : état de la culture irriguée, ressource en eau, climat. Il a à gérer et à contrôler le fonctionnement du matériel d'irrigation dans le cadre d'un tour d'eau, temps nécessaire pour irriguer l'ensemble des parcelles de la sole irriguée. Ce tour d'eau dure généralement de 4 à 10 jours et confère une inertie certaine au chantier d'irrigation.

Cependant, les pratiques d'irrigation varient selon la place des cultures irriguées dans le revenu, l'aversion au risque des agriculteurs, les moyens d'arrosage, la ressource accessible, et les objectifs propres de l'agriculteur (Labbe et al., 2000 ; Maton et al., 2005).

On voit donc que l'irrigation des cultures ne se limite évidemment pas à décider chaque jour si l'on doit irriguer ou pas. C'est une technique complexe pour laquelle les choix stratégiques sont aussi importants que les choix tactiques en cours de campagne. Par ailleurs, les agriculteurs mettent en œuvre des règles de décision plus ou moins formalisées et quantifiées pour décider notamment du démarrage de l'irrigation (stade de développement de la culture, état du sol et de la végétation, nombre de jours sans pluie…).

Si la ressource en eau d'irrigation n'est pas assurée, l'agriculteur s'adapte en modifiant la composition de la sole irriguée (cultures moins exigeantes en eau, étalement des périodes de besoin) et en modifiant les stratégies d'irrigation par culture (date de démarrage, fréquence de retour). Dans le dernier cas, il peut s'agir d'une décision individuelle ou collective (organisation d'une gestion en commun des débits prélevés pour retarder l'interdiction de pompage à l'échelle d'une rivière, par exemple).

Idées principales

L'irrigation des cultures est une technique complexe pour laquelle les choix stratégiques sont aussi importants que les choix tactiques en cours de campagne. L'organisation d'un chantier d'irrigation introduit une certaine inertie dans les changements de stratégie en cours de campagne.

1.1.3.4. Le conseil en irrigation

L'état des lieux réalisé dans le cadre de l'opération IRRI-MIEUX en 1999 (Guiberteau, 1999) montre que les actions de conseil irrigation sont portées essentiellement par les Chambres d'Agriculture (72% des actions) avec une implication moindre mais probablement croissante d'autres organismes tels que les industriels, les coopératives, les compagnies d'aménagement et certaines structures spécialisées.

Des groupes de travail constitués par les organismes de conseil et animés par ARVALIS – Institut du végétal, le Cemagref et l'INRA produisent, partagent et structurent des références utilisées dans les actions de conseil. C'est ainsi que les guides de l'utilisateur IRRINOV® écrits en partenariat avec les Chambres d'Agriculture et des organismes économiques tels que Limagrain pour le maïs semence, Mc Cain pour la pomme de terre, rassemblent les informations techniques de référence pour l'irrigation du maïs, des céréales, des protéagineux et des pommes de terre. La méthodologie est souvent utilisée dans le suivi des parcelles de référence, bases des avertissements irrigation.

Les actions de conseil portent essentiellement sur le pilotage de l'irrigation en cours de campagne (Tableau 8). Ce sont en effet les actions les plus nombreuses et elles s'adressent à la majorité des irrigants (conseil de masse). Les **avertissements irrigation** existent dans la quasi-totalité des départements où l'irrigation est significative. Ils donnent à l'agriculteur un cadre général pour la conduite des irrigations des cultures.

Tableau 8. Nombre d'actions de conseil irrigation engagées en France par type de conseil
(Source "Etat des lieux des actions de conseil et d'appui technique en irrigation" Janvier 1999 – Opération IRRI-MIEUX)

		Conseil de masse	Conseil de groupe	Conseil individuel	Total
Choix stratégique	Mobilisation de la ressource et équipement d'irrigation	0	7	27	34
Choix tactique	Contrôle du matériel		4	12	16
	Pilotage de l'irrigation	26	7	7	40

Ainsi, par exemple, en Haute-Garonne, les avertissements d'irrigations sont envoyés chaque semaine à plus de 1000 irrigants (Deumier et al., 2005*)*. Il s'agit d'un conseil global qui s'appuie sur le suivi de 20 parcelles de référence situées chez les irrigants (11 parcelles de maïs et 9 parcelles de soja) et sur les relevés météorologiques de 10 stations Météo-France. Chaque message comprend 4 rubriques :

- le rappel sur la consommation en eau des cultures la semaine précédant l'envoi,
- la rubrique "ce qu'il faut faire" indiquant la marche à suivre pour la semaine en cours,
- la rubrique "actualité sur l'eau" qui rend compte des évènements relatifs à l'état et à l'évolution de la ressource en eau,
- la rubrique "données climatiques brutes" avec le détail des ETP et pluies pour chaque parcelle de référence et chaque station météorologique.

Les conseils de groupe et individuels de pilotage sont moins développés mais probablement en augmentation. Les conseils pour la maîtrise du matériel accompagnent souvent les actions de pilotage. Ce sont principalement des actions individuelles.

Les actions d'ordre stratégique (mobilisation de la ressource et aide à l'équipement d'irrigation) concernent moins d'irrigants que dans les années de forte croissance des surfaces irriguées et sont surtout des actions individuelles.

Enfin, les actions de conseil sur les choix d'assolements et de stratégie d'irrigation absents en 1999 reviennent actuellement sur le devant de la scène compte tenu des évolutions économiques et réglementaires (PAC 2007, loi sur l'eau). Les opérateurs du conseil sont tous engagés aujourd'hui dans des études et simulations pour aider les irrigants à bien négocier ce moment délicat.

Que font les agriculteurs du conseil en irrigation ? L'avertissement est plutôt un cadre global pour conforter des décisions qu'une recommandation qui sera appliquée à la parcelle.

L'enquête "Pratiques Culturales" menée en 2001 en Aquitaine (Agreste, 2005) montre que 18% des irrigants utilisent des outils de pilotage individuels et que 15% "suivent" les avertissements collectifs. Les autres irrigants se répartissent en 2 catégories :
- ceux qui pratiquent une simple observation de leurs parcelles (40%),
- ceux qui arrosent de manière systématique selon un schéma peu variable d'une année sur l'autre (27%).
Ces derniers sont aussi ceux qui consomment l'essentiel de l'eau d'irrigation allouée au maïs grain (44%).

Tableau 9. Part des surfaces et volumes d'irrigation en fonction des méthodes de déclenchement de l'irrigation en Aquitaine (2001)

Conduite de l'irrigation	Nombre d'irrigants	Surface	Volume d'eau	Dose moyenne (mm)	Rendement (q/ha)
"Comme d'habitude"	27%	33%	44%	203	94
Simple observation	40%	31%	19%	94	93
Outils de pilotage	18%	18%	21%	183	96
Avis technique	15%	17%	16%	138	100
Ensemble	100%	100%	100%	154	95

Source : Agreste Aquitaine, 2005

Idées principales

La généralisation de l'avertissement irrigation (conseil de masse) apparaît comme un cadre général pour conforter les décisions des irrigants plus que pour indiquer la bonne stratégie adaptée à chaque exploitation.

Remerciements à J.M. Deumier (Arvalis - Institut du Végétal), A. Merrien et L. Champolivier (Cetiom) pour la fourniture de références techniques.

Références bibliographiques

Agreste (2004). Enquête sur les pratiques culturales en 2001. *Agreste Chiffres et Données*, n°159, 253 p.

Agreste (2005). 2.7 Millions d'hectares équipés en 2003. *Agreste Cahier,* n°2

Agreste-Aquitaine (2005). *L'irrigation, un outil de développement en voie de stabilisation,* N°3, Mars 2005, 6 p.

Alexandrov V, .Koteva V. (2001). Attack on sunflower by charcoal rot (Sclerotium bataticola T.) under the influence of climate and mineral fertilization. *Bulgarian Journal of Agricultural Science,* 7, 271-274

Alexandrov V, .Angelova M. (2004). Influence of meteorological conditions and agronomical practices upon attack of sunflower by Sclerotinia white rot (Sclerotinia sclerotiorum Lib.). *Bulgarian Journal of Agricultural Science,* 10 (2), 185-189

Baldini M., Giovanardi R., Tahmasebi-Enferadi S., Vannozzi G.P. (2002). Effects of water regime on fatty acid accumulation and final fatty acid composition in the oil of standard and high oleic sunflower hybrids. *Italian Journal of Agronomy,* 6, 119-126

Bergez JE, Deumier JM, Lacroix B, Leroy P, Wallach D (2002). Improving irrigation schedules by using a biophysical and decisional model. *European Journal of Agronomy* , 16, 123-135

Cabelguenne M., Jones C.A., Williams J.R. (1995). Strategies for limited irrigations of maize in southwestern France - a modeling approach. *Transactions of the ASAE,* 38, 507-511

Champolivier L., Merrien A. (1996). Effects of water stress applied at different growth stages to Brassica napus L. var. oleifera on yield, yield components and seed quality. *European Journal of Agronomy,* 5, 153-160

Choisnel E (1993). Le risque sécheresse en agriculture. *Chambres d'Agriculture*, n°807, 6-12

Connor D.J., Loomis R.S. (1991). Strategies and tactics for water-limited agriculture in low rainfall Mediterranean climates, in : *Proceedings International Symposium on Improvement and Management of Winter Cereals under Temperature, Drought and Salinity Stresses*, INIA, Cordoba (Spain), p. 441-465

Conseil Supérieur de la Météorologie (1999). Table ronde sur les besoins des utilisateurs potentiels des prévisions saisonnières. *CR 29ème assemblée plénière*, Paris, 11/02/1999, p. 53-59.

Cooper P.J.M., Gregory P.J (1987). Soil water management in the rain-fed farming systems of the Mediterranean region. *Soil Use Management,* 3, 57-62

Debaeke P. (2003). Irrigation, Supplemental. In *Encyclopedia of Water Science,* B.A. Stewart & T.Howell (eds), Marcel Dekker, Inc., New York, 537-539

Debaeke P., Cabelguenne M. (1994). Influence of previous crop on available water for a subsequent winter wheat on a deep silty clay soil. *Proc. 3rd ESA Congress*, Padova (Italy), p. 682-683

Debaeke P., Nolot J.M. (2000). Testing crop management systems for sunflower in South-West France. *Proc. 15th International Sunflower Conf*erence, Toulouse, C, 1-6

Debaeke P., Aboudrare A. (2004). Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of .Agronomy,* 21, 433-446

Debaeke P., Aussenac T., Fabre J.L., Hilaire A., Thuries L. (1996). Grain nitrogen content of winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) as related to crop management and to the previous crop. *European Journal of Agronomy*, 5, 273-286

Debaeke P., Estragnat A., Reau R. (2003). Influence of crop management on sunflower stem canker (*Diaporthe helianthi.*). *Agronomie,* 23, 581-592

Debaeke P., Nolot J.M., Raffaillac D. (2006). A rule-based method for the development of crop management systems applied to grain sorghum in south-western France. *Agricultural Systems* (sous presse).

Deumier J.M., Balas B., Leroy P., Jacquin C. (1996). Maîtrise des systèmes irrigués. Gestion d'un équipement existant. *Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 82 (5), 89-102.

Deumier J.M., Boussaguet J., Mailheau M. (2005). Stratégie des agriculteurs, pilotage et ajustement des apports d'eau aux besoins des cultures. Actes du *Colloque Cemagref « Eau et agriculture durable »,* SIMA, Paris, 1/03/2005.

Faure A., Guéry B., Guinefoleau J.P., Weissenberger A., Naïbo B., Decoin M. (2004). Bilan phytosanitaire 2003 du maïs. *Phytoma,* 567, 39-41

Flagella Z., Rotunno T., Tarantino E., Di Caterina R., De Caro A. (2002). Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *European Journal of Agronomy,* 17, 221-230

Gleyses G., Rieu T. (2004). *L'irrigation en France. Etat des lieux 2000 et évolution*. Cemagref Editions, 60 p.

Guiberteau M. (1999). *Etat des lieux des actions de conseil et d'appui technique en irrigation*. Rapport Irri-Mieux, ANDA, 64 p.

Haile F.J. (2001). Drought stress, insects, and yield loss. In : *Biotic stress and yield loss*, R.K.D. Peterson and L.G.Higley eds, CRC press, 117-13

ITCF (1993). *Gérer l'irrigation en grandes cultures*, Brochure Optim'Eau, Mai 1993, 56 p.

Labbe F., Ruelle P., Garin P., Leroy P. (2000). Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages. *European Journal of Agronomy,* 12, 55-67

Leroy P., Deumier J.M., Jacquin C. (1996). Water management at farm level. Method and tool to support strategic decisions – In : *Management of Limited Water Resources. Agro-economical Consequences.* Final report of the EU contract no. 8001-CT91-0109

Loomis R.S. (1983). Crop manipulations for efficient use of water: an overview. In : *Limitations to efficient water use in crop production (*Taylor H.M., Jordan W.R., Sinclair T.R., eds), American Society of Agronomy, Madison (WI, USA), p.345-374

Maton L., Leenhardt D., Goulard M., Bergez J.E. (2005). Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems. *Agricultural Systems,* 86, 293-311.

Meinke H., Stone R. (2005). Seasonal and inter-annual climate forecasting: The new tool for increasing preparedness to climate variability and change in agricultural planning and operations. *Climatic Change,* 70, 221-253.

Morardet S., Mailhol J.C., Vidal A., Garin P., Gleyzes G. (1998). Sécheresse et demande en eau d'irrigation : élements de réflexion. *Ingéniéries*, n°13, 15-28.

Nolot J.M., Debaeke P. (2003). Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. *Cahiers Agricultures,* 12, 387-400

Quattar S., El Asri M., Lhatoute B., Lahlou O. (1992). Effet du régime hydrique sur la productivité et la teneur en huile du tournesol. *Cahiers Agricultures,* 1, 173-179.

Puech J., Cabelguenne M., Attonaty J.M., Leroy P., Amigues J.P., Balas B., Perarnaud V. (1997). Gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation agricole. In : *L'eau dans l'espace rural* (Riou C, Bonhomme R, Chassin P, Neveu A, Papy F, eds), AUPELF-URELF & INRA Editions, p. 101-119

Rinaldi M., Rizzo V., Franceso F. (1996). Effects of winter sowing on sunflower yield, oil and plant characteristics in Southern Italy. *Proceedings 14th International Sunflower Conference*, Beijing (China), 345-350.

Robinson C.A. (2003). Dryland farming. In : *Encyclopedia of Water Science,* B.A. Stewart & T.Howell (eds), Marcel Dekker, Inc., New York, 183-186

Santonoceto C., Anastasi U., Riggi E., Abbate V. (2003). Accumulation dynamics of dry matter, oil and major fatty acids in sunflower seeds in relation to genotype and water regime. *Italian Journal of Agronomy,* 7 (1), 3-14

Schoeneweiss D.F. (1985). Water stress predisposition to disease – an overview. In : *Water, fungi and plants* (P.G.Ayres and L.Boddy eds), Cambridge University Press, 157-174.

Sivakumar M.V.K, Glinni A.F. (2002). Applications of crop growth models in the semiarid regions, in : Ahuha L.R., Ma L., Howell T.A. (Eds), *Agricultural System Models in Field Research and Technology transfer*, Lewis Publishers, 2002, 178-205

Turner N. (2004). Agronomic options for improving rainfall use efficiency of crops in dryland farming systems. *Journal of Experimental Botany,* 54, 2413-2425.

Annexe

Figure 4. Evolution des rendements du maïs grain pour 3 régions françaises

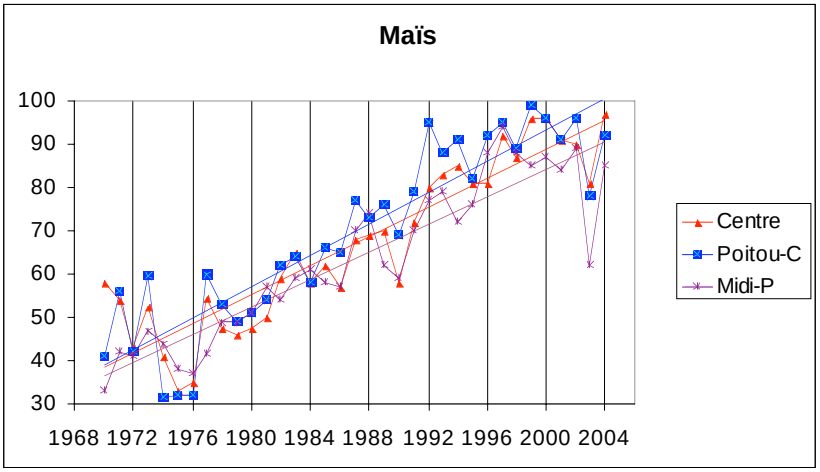


Tableau 3. Maïs grain : écart de rendement à la référence annuelle (q/ha & %)

	France	Picardie	Centre	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées
1976	-11,7	-19,0 (49%)	-13,4 (38%)	-17,5 (54%)	-8,9 (24%)
2003	-18,9	-7,9 (10%)	-12,6 (16%)	-20,6 (26%)	-26,9 (43%)
2005	-4,8				

Figure 5. Evolution des rendements du tournesol pour 3 régions françaises

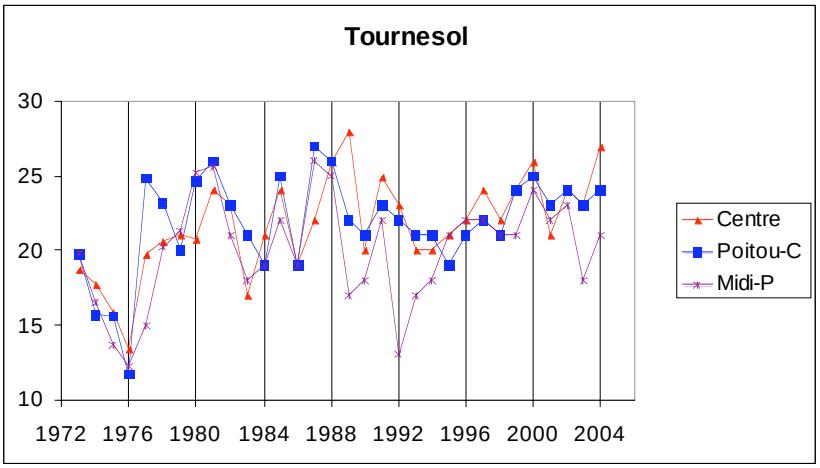


Tableau 4. Tournesol : écart de rendement à la référence annuelle (q/ha & %)

	France	Centre	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées
1976	-6,5	-5,3 (40%)	-8,0 (68%)	-6,0 (49%)
2003	-2,2	-1,9 (8%)	-0,9 (4%)	-3,8 (21%)
2005	-2,0			

Figure 6. Evolution des rendements du colza pour 4 régions françaises

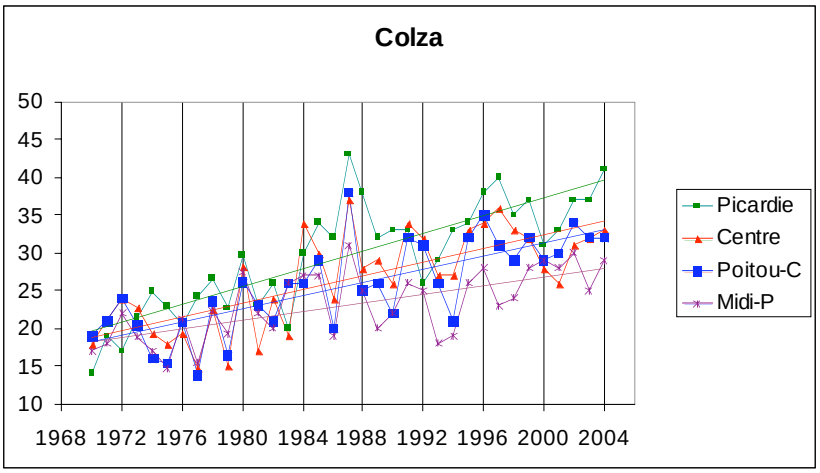


Figure 7. Evolution des rendements du sorgho pour 2 régions

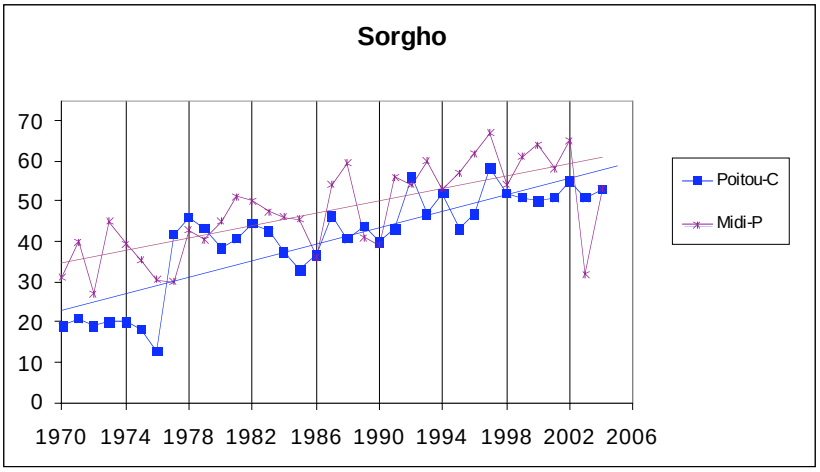
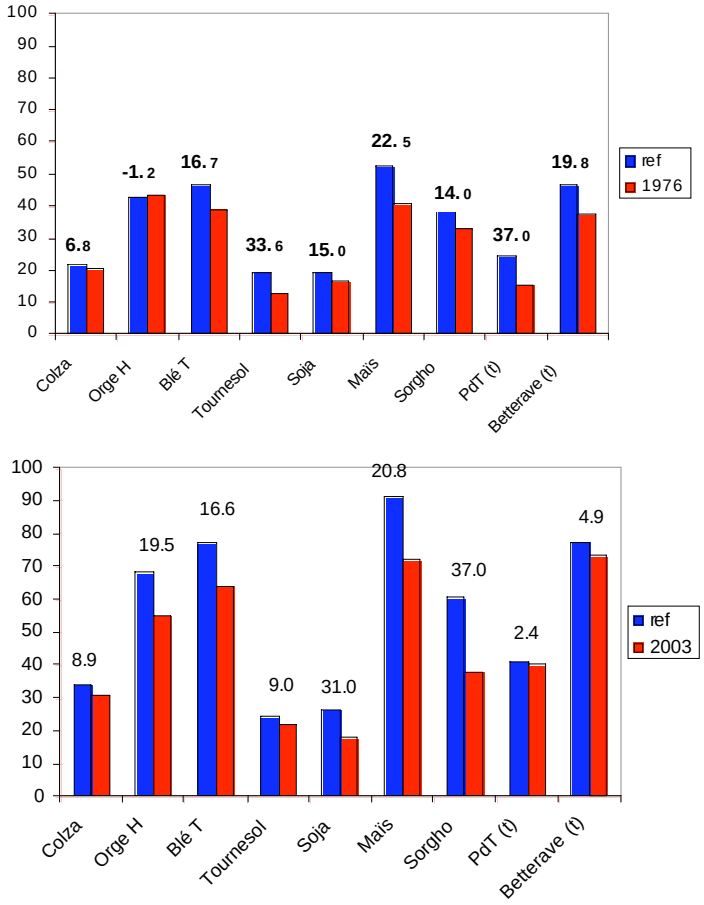


Figure 8. Pertes de rendement liées à la sécheresse (%)
Comparaison entre cultures : Total France 1976 & 2003

(ref = rendement de référence lié au progrès génétique)



1.1.4. Sensibilité à la sécheresse des systèmes fourragers et de l'élevage des herbivores

G. Lemaire (INRA, Lusignan), Didier Micol (INRA Theix), Luc Delaby (INRA Saint-Gilles), Jean Louis Fiorelli (INRA Mirecourt) et Michel Duru (INRA Toulouse). Françoise Ruget (INRA Avignon)

1.1.4.1. Introduction

Par rapport aux systèmes de cultures annuelles, pour lesquels on peut considérer que les aléas d'années sèches défavorables peuvent être compensés par les "bonnes" années et pour lesquels la production moyenne a un sens, les systèmes d'élevage, qui doivent assurer, à tout moment de l'année, une adéquation entre l'offre en fourrage et la demande alimentaire du troupeau, doivent mettre en œuvre des stratégies d'adaptation beaucoup plus coûteuses pour faire face à ces mêmes aléas. Dans beaucoup de régions et de systèmes d'élevage, la base de l'alimentation est la production d'herbe au pâturage. La forte saisonnalité de croissance de l'herbe et la relative constance de la demande alimentaire des troupeaux implique un système de constitution de stocks et de report de consommation intra-annuel. Les aléas de sécheresse amplifient donc cette distorsion entre production et consommation de l'herbe. Dans les cas les plus extrêmes, cela peut même nécessiter des reports de stocks fourragers d'une année sur l'autre et même conduire à des pénuries fourragères à l'échelle locale, régionale, voire nationale. Les systèmes d'élevage basés sur l'exploitation de l'herbe sont donc directement dépendant des effets du climat (froid hivernal et printanier, sécheresse et hautes températures estivales) qui déterminent à la fois la croissance de l'herbe au pâturage et la constitution des stocks fourragers. Les systèmes d'élevage qui utilisent davantage de cultures annuelles (maïs irrigué ou non, céréales immatures…) sont moins directement affectés par les variations interannuelles du climat.

Dans cette section, nous analyserons en premier lieu les effets du climat et plus particulièrement de la sécheresse sur la production des prairies, afin de donner l'ampleur des variations interannuelles de production d'herbe au niveau régional. Puis nous analyserons comment face à cette variabilité les systèmes d'élevage peuvent développer des stratégies d'adaptation et de flexibilité. Ensuite nous étudierons les conséquences que peuvent avoir certains épisodes de sécheresse sur la pérennité des prairies. Enfin nous analyserons la sécheresse et la pénurie alimentaire qui peut en résulter du point de vue de l'animal.

1.1.4.2. La variabilité de la production des prairies en fonction du climat. Outils d'analyse (le système ISOP) (Françoise Ruget)

La forte dépendance des systèmes d'élevage basés sur l'exploitation de l'herbe vis-à-vis du climat donne lieu à des estimations très attendues, surtout quant à sa variabilité interannuelle, qui peut remettre en cause l'équilibre des exploitations d'élevage, où la fourniture de fourrages doit être continue.

1.1.4.2.1. Méthodes d'estimations possibles

Les estimations classiques sont le résultat d'avis d'experts, se déplaçant sur le terrain, avec les risques de subjectivité que cela entraîne et la difficulté d'intégration spatiale sûre, mais aussi une connaissance des événements qui empêche des estimations "farfelues", et permet la prise en compte de certains accidents climatiques rares ou localisés. Les estimations classiques du SCEES, donnant lieu à la publication des résultats nationaux de la Statistique Agricole Annuelle (SAA), sont faites par cette méthode de synthèse d'observations de terrain réparties dans toute la France.

Mais elles peuvent aussi être issues de modèles, ceux-ci ayant la qualité théorique de l'objectivité et de l'immédiateté. Mais le risque d'estimations fausses, qu'elles soient biaisées (formalismes, paramétrage) ou dispersées (incertitude sur les données d'entrée) n'est pas négligeable : les sorties de modèles ne sont utiles que si on peut leur accorder une certaine confiance.

Les modèles permettant d'estimer la production des prairies sont nombreux. LINGRA (Schapendonk et al., 1998), et PASIM (Riedo et al., 1998), pour citer 2 exemples européens, sont particulièrement adaptés à la simulation de pousses courtes, car ils sont calés et validés dans des conditions de coupes nombreuses (4 à 6 coupes par an), qui excluent l'existence de sénescence : ils sont plutôt adaptés à la simulation des systèmes intensifs. Il existe aussi de nombreux modèles où la croissance de l'herbe n'est qu'une petite partie, car leur but est la gestion de l'alimentation des troupeaux ou des effluents : modèle australien GrassGro (Moore et al., 1997), américain SPUR (Wight and Skiles, 1987), danois FASSET (Jacobsen et al., 1998), français Sépatou (Cros et al., 2004). Dans ce cas, les entrées nécessaires peuvent être définies de façon précise.

L'estimation de production régionale – ou de variabilité de production régionale - est assez rare, car plus difficile à bâtir et à contrôler. En effet, pour passer du modèle à l'estimation régionale, le travail à réaliser est conséquent : il faut construire une base de données adaptée au modèle et permettant de caractériser le milieu et les pratiques régionalement (paramètres et variables d'entrées "régionaux"). A cet effet, le ministère de l'Agriculture français a fait construire un système permettant d'évaluer régionalement la variabilité interannuelle des productions (ISOP) : il est appuyé sur un modèle et les résultats du système ont été mis à l'épreuve de la confrontation annuelle des résultats aux estimations des experts. Ce travail a été fait dans le cadre d'ISOP, et des confrontations aux estimations habituelles de terrain ont permis de valider ces estimations simulées.

Les autres estimations régionales en Europe sont celles de MARS qui donnent toutes les 6 à 8 semaines pendant la période de production une carte de la production en 4 classes par rapport à une référence dite "normale" (1 au dessus, 2 en dessous) (http://agrifish.jrc.it/marsstat/bulletins/2005.htm). Elles permettent de détecter en temps "réel" les zones affectées par la sécheresse sur l'ensemble de l'Europe et du bassin méditerranéen. Cet outil opérationnel, n'est pas employé actuellement pour des études historiques ou fréquentielles, sans doute en raison de l'absence de longues séries historiques (emploi d'images satellitaires, de disponibilité récente). L'estimation de l'évolution des couverts cultivés (par rapport aux années précédentes prises comme référence) est assez globale, car à l'échelle du 25 millionième environ (l'Europe sur un format A5).

1.1.4.2.2. Résultats du système ISOP

Le système ISOP (Ruget et al., 2001 ; Ruget et al., 2006) estime la variabilité interannuelle de production pour chaque région fourragère et l'évolution au cours de l'année de cette production, en valeur relative par rapport à la production "normale" de la même zone à la même date.

a. La variabilité de la production annuelle

. *Au niveau national*, en valeur absolue : les statistiques du SCEES et celles d'ISOP
En moyenne nationale sur 20 ans (de 1984 à 2003), le rendement est de 50 q/ha avec des valeurs pour la moyenne nationale variant entre années de 36 à 61q/ha (chiffres SAA, SCEES), ce qui correspond à un rapport amplitude/moyenne de 0.5.
Les estimations du modèle donnent des valeurs absolues un peu plus élevées (moyenne nationale 67, minimum interannuel de 38 q/ha, maximum de 92 q/ha), ce qui correspond, en raison des maxima plus élevés, à une variabilité plus forte (amplitude/moyenne = 0.8).

. *Au niveau régional*
En valeur rapportée à la moyenne régionale, les estimations du modèle sont généralement proches des estimations des experts. Elles donnent de très grandes amplitudes de productions régionales : l'amplitude interannuelle de production se situe majoritairement entre 50 et 100% de la moyenne, avec

quelques rares valeurs plus faibles, par exemple dans les montagnes régulièrement arrosées, et quelques valeurs plus élevées dans des zones sèches, souvent peu productives, essentiellement à cause des années très sèches 1989, 1990, 1996 et 2003.

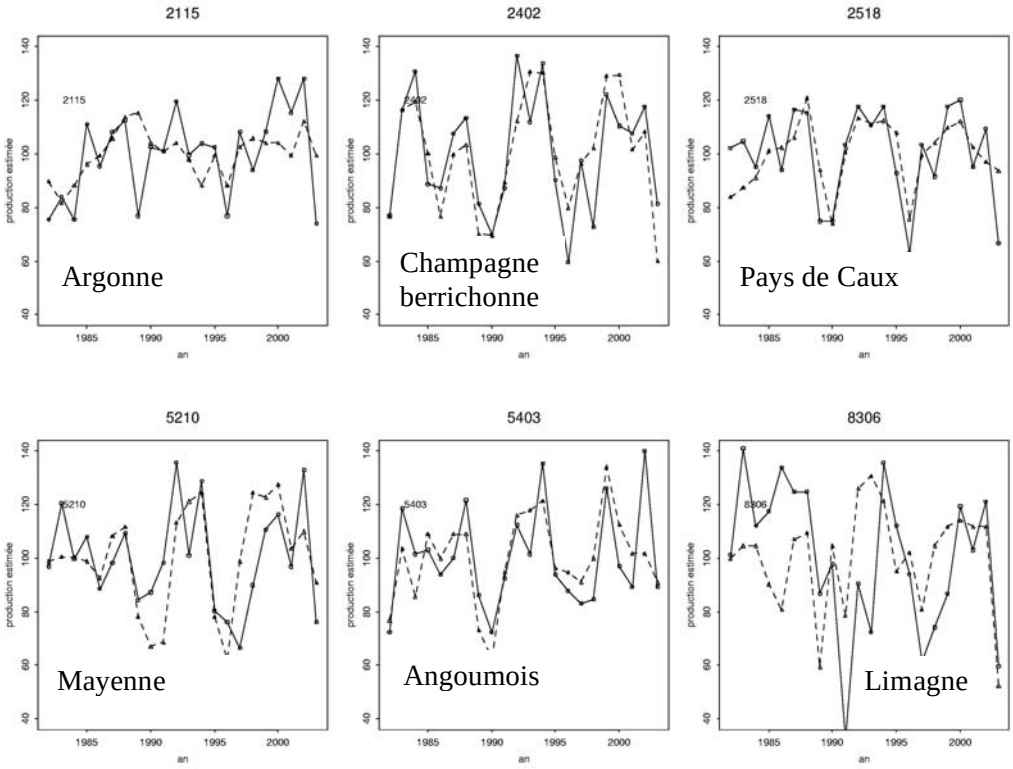


Figure 1. Quelques exemples de variabilité interannuelle relative régionale (ISOP, Ruget et al. 2001).

b. La variabilité de production au cours de l'année

. *A l'échelle nationale*

La période où la production devient anormalement faible. L'entrée en sécheresse a paru assez fiable par rapport à ce qui est observé globalement sur le terrain, en particulier en 2003 et en 2005 : les cartes mensuelles (non figurées ici) ont fait apparaître la réduction de production dès fin mai par exemple dans la vallée du Rhône et de la Saône, ce qui correspondait aux observations locales. Mais la période estivale non productive semble trop accentuée (toujours longue), et la reprise de végétation après sécheresse est généralement plus tardive. Jusqu'à présent, on n'a pas pu corriger ce défaut.

Les zones touchées par la sécheresse sont assez différentes selon les années. Les intensités de sécheresse sont souvent très différentes selon les régions, et ISOP le montre de façon tout à fait satisfaisante. Les cartes ci-dessous illustrent la différence des zones touchées par la sécheresse en 1989 et 1996, celles de 1996 ayant affecté principalement la moitié Nord de la France, tandis que celle de 1989 a affecté toute la France, mais surtout la moitié Sud-Ouest. Les années 1990 et 1991 ont respectivement affecté la moitié Ouest et le quart Nord- Est de la France.

. *A l'échelle de l'exploitation ou du bassin d'élevage*

Pour les régions fourragères du département de Saône-et-Loire, le dispositif national de prévision de la production de la prairie (ISOP) donne des indications globales sur la variabilité spatiale, saisonnière et interannuelle des productions (Gateau et al., 2006).
La prise en compte de données plus locales du climat et des sols permet une estimation des productions d'herbe, par type de sol et par zone climatique, et permet de construire un référentiel régional pour les conseillers. Appliqué à des cas types réels d'exploitation en prenant en compte la

diversité des sols sur l'exploitation, il permet de déduire les risques encourus par l'éleveur vis-à-vis des aléas climatiques et de proposer des modes de gestion du fourrage selon la nature des sols et le niveau de chargement des exploitations : il est utilisé en temps réel au cours de l'année comme "baromètre herbager" pour suivre le niveau de production par rapport à la normale.

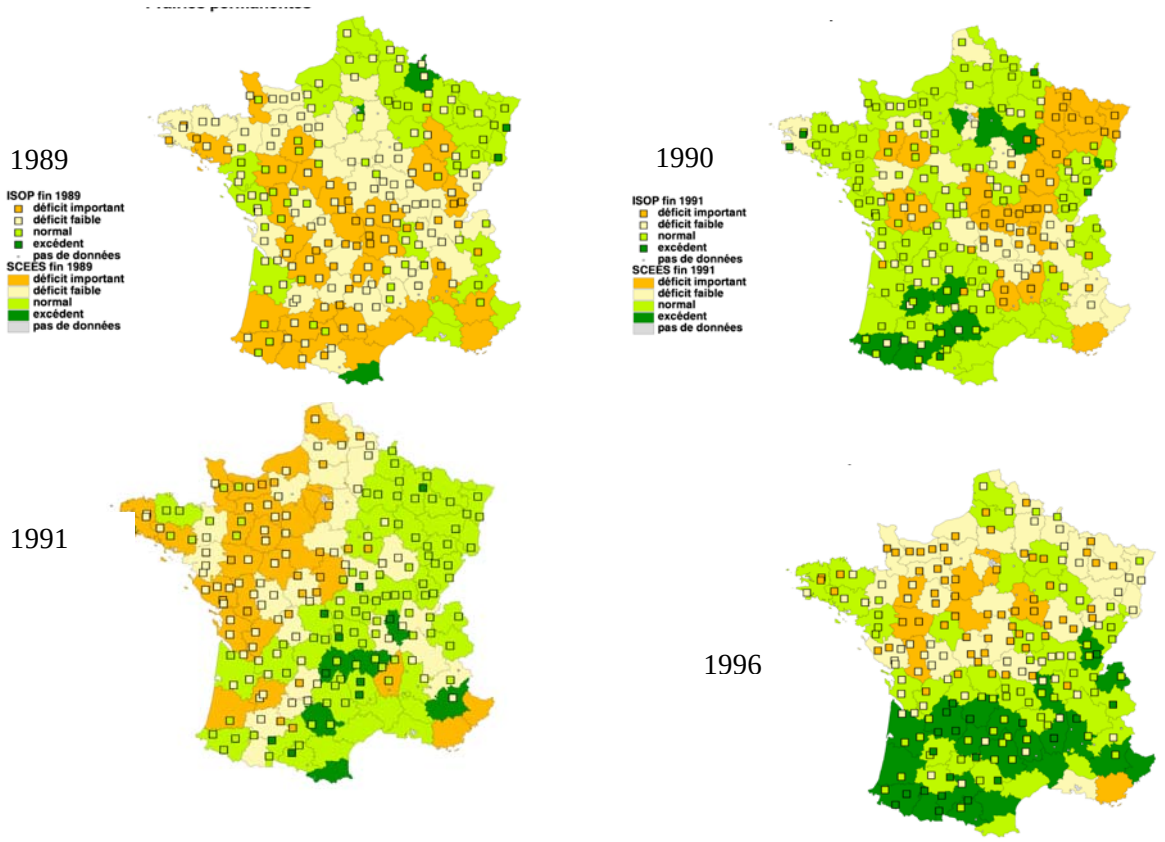


Figure 2. Sécheresse et déficit fourrager dans les régions française

La couleur de fond est celle de l'estimation SAA, le petit carré superposé donne l'estimation ISOP ;

1.1.4.3. L'ajustement à la variabilité du climat fait partie inhérente des systèmes fourragers et des systèmes d'élevage des ruminants

Dans les systèmes d'élevage de ruminants, les fourrages et les prairies sont des produits intermédiaires qui ne sont généralement pas commercialisés. Ils doivent être transformés sur place en produits animaux dans le cadre de systèmes fourragers. Le **système fourrager** est ainsi défini comme l'ensemble des moyens de production, des techniques et des processus qui, sur un territoire, ont pour fonction d'assurer la correspondance entre le ou les système(s) de culture et le ou les système(s) d'élevage. Autrement dit, la fonction du système fourrager est d'alimenter des lots d'animaux en continu malgré les fluctuations de l'offre fourragère associées aux fluctuations annuelles et interannuelles du climat, alors que la demande alimentaire reste relativement stable à effectif animal constant (Duru et al., 1988). Les éleveurs sont donc par essence habitués à gérer la variabilité climatique, à la fois entre années à une même saison, et à l'intérieur d'une même saison. Cette variabilité recouvre à la fois des variations qui restent dans une gamme considérée comme normale, mais aussi des aléas lorsque interviennent des phénomènes d'intensité supérieure ou inférieure à une normale établie sur une longue série d'années (Eldin, 1989 ; Jager, 1998 ; Ingram et al., 2002). Le système fourrager dans sa conception par l'éleveur et dans sa mise en œuvre comporte des éléments d'adaptation qui permettent d'ajuster l'offre fourragère à la demande alimentaire du troupeau grâce à la constitution de stocks fourragers et à leur utilisation reportée.

Dans la plupart des systèmes d'élevage en France, il y a (i) une période d'arrêt ou de quasi arrêt de la croissance de l'herbe et autres plantes fourragères pendant la période hivernale, et (ii) une plus ou moins forte réduction de la croissance d'herbe en été, voire même un arrêt total de la croissance par la sécheresse. Dans ces conditions, des fourrages conservés (principalement foin ou ensilage) sont distribués dans les périodes de trop faible croissance d'herbe. En première approximation, pour un élevage donné, la quantité de fourrages conservés distribuée au cours de l'année est d'autant plus grande que les périodes d'arrêt de croissance de l'herbe sont longues. La sécheresse n'est donc pas le seul élément d'incertitude auquel l'éleveur doit faire face. La variabilité des températures de l'automne, de l'hiver et du début de printemps provoque des variations importantes de la croissance de l'herbe (Lemaire et Salette, 1981) et de certains fourrages qui peuvent augmenter considérablement la durée de la phase d'alimentation hivernale et le besoin en stocks de fourrage. Ainsi, les aléas de sécheresse de printemps et d'été qui peuvent contribuer à augmenter la demande en fourrages stockés à ces saisons peuvent être largement amplifiés lorsqu'ils interviennent après, ou qu'ils sont suivis par, une période hivernale anormalement longue et provoquer ainsi des ruptures d'alimentation du troupeau pouvant remettre en cause le fonctionnement du système d'élevage (Duru et Charpenteau, 1981). L'élevage des ruminants en région herbagère est au premier rang des spéculations agricoles directement touchées par les épisodes de sécheresse prolongés du fait de l'impossibilité dans laquelle ces systèmes se trouvent généralement à constituer des stocks pour plusieurs années. Dans les cas les plus graves, on peut envisager de décapitaliser le cheptel pour faire face à de véritables situations de crise (Terrible, 1993).

Il existe une différence fondamentale entre la perception d'un éleveur et celle d'un agriculteur céréalier vis-à-vis d'un aléa sécheresse. Ce dernier peut s'adapter à une variation de ses rendements en prévoyant un rendement objectif atteignable "en moyenne" une année sur deux et en compensant les bonnes années par les moins bonnes au niveau de sa trésorerie. Cette notion de "rendement moyen" a donc un sens économique en soi. Pour l'éleveur, qui doit assurer chaque année et à tout moment de l'année l'alimentation d'un troupeau donné, un objectif de production fourragère "moyenne" n'a aucun sens et il est obligé de dimensionner et d'organiser son système fourrager en prévoyant sinon le pire, du moins des déficits de production fourragère suffisamment accentués pour être certain d'équilibrer offre et demande dans la grande majorité des situations. Cette politique d'adaptation aux risques climatiques a toujours été intégrée dans les pratiques des éleveurs, notamment dans les régions herbagères.

Ceci conduit à considérer deux types de pratiques au niveau des systèmes fourragers et des systèmes d'élevage face à la sécheresse, selon qu'elle est anticipée ou imprévue :

- **La sécheresse anticipée** est définie par le fait que les conséquences en terme d'offre fourragère ont déjà été intégrées dans la conception du système fourrager. L'éleveur peut alors faire face à ces aléas par la mise en œuvre d'ajustements dans la gestion de ses surfaces fourragères et de ses stocks. Ces processus d'ajustement font donc partie intégrante du système fourrager, et caractérisent sa flexibilité (Andrieu et al., 2006).
- **Une sécheresse imprévue** correspond à une intensité ou une durée qui ne permettent pas d'effectuer les ajustements nécessaires au sein du système fourrager pour réaliser l'adéquation entre l'offre fourragère et la demande alimentaire. Il est nécessaire dans ce cas de mettre en œuvre d'autres types d'actions qui sortent du cadre du système fourrager habituel : achats de fourrages ou de paille à l'extérieur, utilisation à des fins fourragères de cultures de vente (concentrés, céréales immatures…), ou qui sortent du cadre du système d'élevage ; baisse temporaire des performances animales, tarissement précoce, vente d'animaux avec réorientation du type d'animal produit. A l'extrême, des sécheresses sévères et longues peuvent même conduire à une décapitalisation et à une remise en cause du système d'exploitation.

Face aux aléas de sécheresse, le concept de flexibilité du système fourrager devient fondamental. Pour caractériser cette flexibilité, Coléno et Duru (1998) proposent de représenter le système fourrager en un certain nombre d'ateliers de production de ressource fourragère correspondant aux tâches et aux savoir-faire concourant à l'élaboration d'un ou de plusieurs éléments de la chaîne d'alimentation fourragère. Le système fourrager consiste donc en une planification par l'éleveur de ses différents ateliers, ce qui correspond à la détermination des objectifs et des ressources assignés à chacun d'eux :

- *dimensionnement* visant à fixer la production de chaque atelier dans le temps avec les ressources à mobiliser (surfaces et intrants…) ;
- *coordination* assurant l'enchaînement dans le temps des différents ateliers, par exemple pâturage et constitution/consommation de stocks ;

Le caractère récurrent et cyclique des activités d'élevage rend possible leur planification par l'éleveur (Aubry et al ; 1998) et découle d'un processus d'apprentissage. La planification comporte à la fois des décisions générales correspondant au déroulement souhaité des opérations et les adaptations nécessaires pour faire face aux variations de l'environnement comme la sécheresse (Chatelin et al., 1993 ; Duru et al., 1998 ; Fleury et al., 1996).

Les éléments de flexibilité mis en place par les éleveurs pour faire face aux aléas climatiques tels que la sécheresse sont de différentes natures. Hormis le recours à l'irrigation qui ne fait pas l'objet ici de notre analyse, ces adaptations des systèmes fourragers sont directement fonction de la **sécheresse anticipée** par l'éleveur, c'est-à-dire des risques de sécheresse qu'il conçoit comme probables ou possibles en fonction de la connaissance historique qu'il a de son territoire d'exploitation. Les ajustements mis en place au sein du système fourrager conduisent tous à une sous-utilisation certaines années des ressources fourragères produites, notamment au pâturage, puisque l'éleveur est contraint chaque année non pas d'anticiper des ressources fourragères moyennes, mais plutôt un niveau inférieur de ces ressources lui garantissant une adéquation satisfaisante entre offre et demande dans la grande majorité des situations. Ainsi plus le climat est variable et les risques de sécheresse aléatoires, plus le niveau d'utilisation des ressources fourragères devra être "sécuritaire". Le risque que craint l'éleveur n'est donc pas la sécheresse en soi mais davantage son aléa : à quelle saison la sécheresse interviendra-t-elle ? et quelle sera son intensité ?

Une des bases de l'ajustement de l'offre à la demande en cas de sécheresse est de réserver une plus grande part des surfaces en herbe à la constitution de stocks au détriment des surfaces pâturées. Des reports de stocks d'une année sur l'autre permettent d'amortir les variations interannuelles de climat. Mais comme nous l'avons dit, ces reports sont forcément limités car financièrement coûteux. Sachant que l'occurrence d'une sécheresse une année donnée n'est pas prévisible, cet ajustement conduit inévitablement à une sous-utilisation des surfaces, c'est-à-dire à une baisse du chargement animal. En conséquence, les systèmes à chargement trop élevé en régions à sécheresse aléatoire deviennent très rapidement vulnérables ou doivent avoir recours systématiquement à des apports fourragers extérieurs. Dans les régions où l'ensilage de maïs constitue la base essentielle des stocks fourragers, un élément d'ajustement très efficace consiste pour les éleveurs à jouer sur le rapport entre les surfaces de maïs ensilées et celle récoltées en grain. Cette grande flexibilité, que l'on rencontre dans les systèmes laitiers intensifs de l'Ouest, permet de maintenir de forts niveaux de chargement, mais à condition que la production du maïs ne soit pas elle-même soumise à de trop fortes variations de rendement dues à la sécheresse, ce qui est rarement le cas en dehors des systèmes irrigués. Dans un dossier spécial "Sécheresse, gérer les risques. Analyse de deux décennies", Pfimlin et al. (1997) analysent la sensibilité des systèmes d'élevage des herbivores aux aléas de sécheresse. Ils indiquent par exemple qu'en cas d'année dite "sèche", on observe une diminution d'environ 10% des rendements en blé, alors que la baisse de production de la luzerne ou des prairies temporaires comme la fétuque élevée sera de 40 à 50%. Si la sécheresse intervient tôt au printemps comme en 1976, la production annuelle de fourrage pourra être amputée de près de 2/3. Les prairies permanentes sont encore plus touchées par les sécheresse précoces de printemps car en général leur croissance démarre relativement tard.

En conclusion on peut dire que la sensibilité des systèmes fourragers et des systèmes d'élevage aux aléas de la sécheresse est d'autant plus grande que le niveau de chargement animal, c'est-à-dire le nombre d'UGB alimentées sur l'exploitation par unité de surface fourragère, est proche de celui correspondant au niveau moyen des ressources fourragères permises par le climat. La flexibilité des systèmes fourragers et les ajustements qui peuvent être mis en œuvre se traduisent dans la majorité des systèmes d'élevage par une diminution du chargement animal moyen de l'exploitation. L'intensification animale et fourragère, l'accroissement de la taille des troupeaux et leur spécialisation ont rendu les systèmes d'élevage de plus en plus vulnérables (Pfimlin et al., 1997). Les chargements ont généralement été calculés sur la base de ressources fourragères annuelles moyennes, ce qui

entraîne comme nous l'avons dit des systèmes de sécurité souvent coûteux, faisant appel à des fourrages extérieurs à l'exploitation et même à la région.

Un certain nombre de ressources fourragères sont mobilisables occasionnellement en cas de sécheresse :

(i) La paille reste une solution accessible à tous les éleveurs. Le Bureau Commun Paille et Fourrage estime qu'environ 40% des pailles produites sont autoconsommées, 20% sont régulièrement commercialisées, et plus de 30% seraient enfouies, ce qui autorise une importante marge de manœuvre. Sur 20 millions de tonnes de paille de céréales, environ 2 millions sont utilisés normalement pour l'alimentation des ruminants, 10 à 12 millions sont utilisés normalement comme litière, et 5 à 6 millions sont enfouies directement au champ. Cette source est cependant en régression du fait des jachères et de la progression de l'enfouissement des pailles pour le maintien du statut organique des sols. Il reste cependant assez facile pour un éleveur d'acheter de la paille et de la stocker avec peu de pertes.

(ii) Les céréales immatures. Dans un grand nombre de régions d'élevage, sauf dans les systèmes herbagers d'altitude, les céréales sont présentes, sinon dans l'exploitation, du moins localement dans la région, en proportion suffisante pour constituer, le cas échéant, une solution de rattrapage pour pallier un déficit fourrager occasionnel. Elles apportent un élément de flexibilité important car l'éleveur peut ajuster les surfaces de céréales utilisées en ensilage et celles récoltées en grain. Nous reviendrons sur cette technique dans la section 2.2.2. En cas de crise, on pourrait admettre que des éleveurs fassent des achats sur pied de céréales immatures à des voisins céréaliers.

(iii) Le maïs. Comme nous l'avons signalé plus haut, lorsque la culture du maïs est possible, la possibilité d'un ajustement de surface entre maïs récolté en grain et maïs récolté en ensilage est un élément de flexibilité largement utilisé. Là encore, des éleveurs peuvent être amenés à acheter des maïs grains sur pied pour constituer des stocks en cas de pénurie fourragère.

(iv) Les autres fourrages grossiers (foin de luzerne ou de prairies temporaires). Ces ressources sont plus difficilement mobilisables en cas de crise car elles sont elles-mêmes très affectées par la sécheresse. Hormis le "foin de Crau" ou la luzerne déshydratée, qui sont d'un accès très coûteux, il existe peu de ressources fourragères mobilisables sur le marché. Par contre des utilisations alimentaires de résidus de récolte peuvent s'avérer intéressantes dans certaines situations : cannes de maïs grain, fanes de pois. En revanche, les feuilles et collets de betterave sucrière ne peuvent plus être récupérés du fait des techniques de récolte actuelles.

(v) Les friches, parcours, landes et bois. Les systèmes intégrant déjà ce type de surfaces peuvent aisément sécuriser leurs ressources pâturées en profitant du décalage entre la production de la ressource fourragère proprement dite, et son stockage sur pied. Pour le Sud pastoral, les moyennes montagnes, les zones herbagères en déprise, l'intégration de ces surfaces doit pouvoir augmenter considérablement la souplesse et la sécurité des systèmes d'élevage.

Toutes ces possibilités de mobilisation de ressources fourragères externes doivent bien entendu s'apprécier en fonction du contexte régional et surtout du système d'élevage pratiqué, notamment le type de production animale.

1.1.4.4. Les dégâts de la sécheresse sur les prairies naturelles et de longue durée

(Michel Duru, Pablo Cruz, Claire Jouany, Danièle Magda)

. Des observations et des recommandations, mais des questions toujours sans réponse

Outre ses effets sur la production fourragère, la sécheresse est susceptible d'engendrer des changements importants de composition botanique dans les prairies naturelles, mais aussi dans les prairies semées de longue durée. Ainsi, après la sécheresse de 1976, une expertise réalisée au niveau de plusieurs régions françaises (Jeannin et al., 1977) a mis en évidence les points suivants :

- dans de nombreuses situations, les capacités de régénération ont été remarquables dès le retour des pluies à l'automne. Toutefois, des exceptions notables ont été observées lorsqu'un "surpâturage" avait eu lieu avant la sécheresse ;

- la capacité de régénération a été très différente selon les espèces composant la prairie. Le ray grass anglais, la fétuque élevée et le dactyle ont montré une bonne aptitude à redémarrer après une longue période de dormance. D'autres espèces (houlque laineuse, fétuque rouge…) sont apparues plus sensibles ;
- des graminées "médiocres" (agrostis) ou des plantes diverses (achillée millefeuille, capselle, chénopode, amaranthe…) peuvent se développer en profitant des "trous" consécutifs à la mortalité de certaines plantes.

Ce genre de constat est fait de manière récurrente après chaque épisode de sécheresse. La presse agricole fait mention de dégradations de prairies. Le plus souvent elle formule des recommandations pour ressemer ou sursemer. Il est ainsi proposé (Institut de l'Elevage, 2003a) de :
- ne pas pâturer immédiatement la prairie si un reverdissement généralisé est observé à l'automne,
- "regarnir" les trous par un sursemis lorsque les plantes qui reverdissent sont dispersées. Dans ce cas, il est conseillé de sursemer des graminées à installation rapide (fétuque élevée, ray grass hybride),
- ressemer la prairie par retournement ou semis direct si une proportion importante de plantes diverses est observée.

Il est à noter que peu de conseils sont donnés sur les conduites à mettre en œuvre pour éviter de tels "dégâts".

D'une manière générale, les enseignements provenant d'observatoires (suivi des dynamiques sur de longues durées) montrent que les changements dans la nature et l'importance des groupes d'espèces (graminées, légumineuses, espèces diverses) dans les prairies naturelles sont les plus fréquents suite à un épisode de sécheresse (Stampfli et Zeiter, 2004), confirmant bien les observations faites dans les exploitations agricoles. Mais ces suivis *in situ*, ou bien les observations dans les élevages, ne permettent pas de répondre aux questions suivantes posées de manière récurrente :
- les changements de végétation consécutifs à un épisode de sécheresse sont ils réversibles ?
- y a-t-il des différences de sensibilité selon les modes d'exploitation et/ou les types de végétation à l'approche d'un épisode de sécheresse ?
- quelle conduite tenir lorsque des mortalités de plantes sont observées ? faut-il toujours ressemer ? si c'est le cas, faut-il ressemer les espèces souhaitées, ou bien des mélanges comprenant des espèces facilitant l'implantation de ces espèces cibles ?
- les recommandations *ex ante* ou *ex post* épisodes de sécheresse peuvent-elles avoir valeur générale, ou bien dépendent-elles des localisations géographiques, notamment du potentiel floristique régional ?

De fait, la recherche n'a pas (en France) ou peu (en Europe) pris en compte ces questions soulevées de manière récurrente. Les recommandations résumées ci-dessus sont la synthèse d'observations sur le terrain. Elles ne s'appuient pas sur des recherches approfondies, génériques et validées. De telles informations sont à rechercher à l'étranger.

. Enseignements des recherches conduites en Australie et aux Etats Unis

Les recherches conduites notamment en Australie et aux Etats-Unis fournissent des éléments de réponse factuelle aux questions posées. En outre, des cadres théoriques permettant d'orienter les recherches à réaliser ont aussi été proposés.

L'étude des effets de la sécheresse sur les dynamiques de végétation prairiale recouvre deux propriétés des écosystèmes : leur sensibilité (la nature et l'amplitude du changement suite à un stress, hydrique ici) et leur résilience (aptitude à retrouver l'état antérieur au stress). Dans une optique curative, il importe aussi de considérer le rôle de facilitateur de certaines espèces.

Une interaction forte entre la conduite du pâturage et l'état physiologique des plantes
Les effets de la sécheresse se traduisent souvent par des mortalités de plantes entraînant la création de "trous" (surfaces de sol nu) qui sont susceptibles d'être colonisés par d'autres espèces que celles déjà présentes. L'ampleur des trous est très dépendante des pratiques de pâturage. Par exemple, il a été montré qu'un pâturage en rotation occasionne moins de mortalité de plantes qu'un pâturage continu

intensif (Teague et al., 2004). En outre, la mortalité de plantes la plus importante n'a pas forcément lieu pour les sécheresses les plus sévères (Boschama and Scott, 2000). En effet, l'intensité de l'effet de la sécheresse est très dépendant de l'état physiologique des plantes au moment où a lieu un pâturage. Une sécheresse sévère peut se traduire par une mise des plantes en dormance qui les protège en quelque sorte. Une sécheresse modérée peut se traduire par des mortalités de plantes plus importantes si il y a simultanément un niveau de réserve faible et un prélèvement de feuilles par le pâturage.
La réduction du nombre d'espèces suite à un stress marqué semble d'autant plus importante que la prairie est riche en espèces (van Peer et al., 2004). En fait, la stabilité de la végétation en situation de perturbation comme un stress hydrique dépend bien plus du nombre de groupes fonctionnels, c'est-à-dire des ensembles d'espèces ayant des fonctionnement différents, que du nombre d'espèces (Mitchell et al., 2000).

L'établissement et la pérennisation des changements de végétation
Dans un premier temps, la colonisation des trous par de nouvelles espèces dépend plus de la coïncidence spatiale et temporelle de ressources (lumière) et de disponibilités en semences que de caractéristiques particulières des plantes (Davies et al., 2000). Dans certaines situations, cette phase dépend aussi de leur aptitude à la compétition, notamment pour la lumière. Ensuite, la pérennité des espèces qui s'installent dans des trous consécutifs à une sécheresse dépend de leurs caractéristiques démographiques. C'est ainsi que des espèces annuelles peuvent s'installer durablement si elles produisent des graines à durée de vie longue (Buckland et al., 2001).

Faut-il (sur)semer les espèces disparues ?
Nous avons rappelé ci-dessus que nombre de (sur)semis après sécheresse se traduisaient par une absence de pérennité des espèces semées. Une des hypothèses pour expliquer ces échecs est que les espèces cibles ne sont pas compétitives. Dans ces situations, des recherches seraient à conduire pour semer des espèces pionnières ayant une fonction de plantes nurses facilitant l'installation à moyen terme des espèces cibles (Armas et Pugnaire, 2005).

En conclusion, nous pouvons dire si peu de connaissances sont disponibles pour prédire les effets de la sécheresse sur les dynamiques de végétation (semi)naturelles, un cadre théorique permettant d'aborder ces questions complexes est maintenant largement partagé. Le modèle conceptuel propose de représenter les dynamiques de végétation comme une succession d'états dont les transitions sont largement sous la dépendance de facteurs anthropiques (le pâturage), en forte interaction avec des facteurs abiotiques comme des épisodes de sécheresse (Westoby et al., 1989 ; Briske et al., 2003, 2005). Il permet d'aborder les conjonctions de facteurs donnant lieu à des changements importants des états de végétation et à leur degré de réversibilité.

1.1.4.5. La sécheresse chez les herbivores
(Didier MICOL, INRA Theix)

De tout temps, parmi les fléaux climatiques, la canicule est la principale ennemie des herbivores des zones tempérées (Jarrige et al., 1987) et la sécheresse(s) celle des éleveurs d'herbivores. Ces sécheresses au fil des années ont une fréquence et une gravité plus importantes. Cependant, elles prennent des ampleurs différentes selon les zones naturelles de notre territoire et des formes différentes selon leur intensité au cours de la campagne (cf. flexibilité des systèmes fourragers) (Andrieu et al., 2006). Pour mémoire, la sécheresse de 1976 a affecté le Nord de notre territoire et s'est faite sentir avec moins d'ampleur dans les zones herbagères du Centre de la France ; a contrario, celle de 2005 a particulièrement affecté les zones de moyenne montagne humide du Massif Central, en pénalisant les réserves fourragères (-30 à -50%). La pire des sécheresses pour l'éleveur d'herbivores est celle qui s'accroît au fil de la saison : elle sévit dès le début du printemps (voire dès l'hiver), elle peut être renforcée ensuite par des gelées tardives ou des vents froids assez desséchants et enfin durant la période estivale se traduire par un manque accru de précipitations et des températures élevées (canicule), pénalisant les repousses d'automne. C'est au printemps et dans la première moitié de l'été que la croissance maximum des diverses plantes fourragères permet à tous les animaux d'avoir une production maximum au coût le plus bas, qu'il s'agisse de la production laitière, du croît des animaux

d'élevage ou de la finition à l'herbe ou de la reconstitution des réserves corporelles des mères allaitantes, et permet aux éleveurs de récolter la majeure partie des réserves fourragères pour l'hiver suivant, en particulier dans les zones à dominante herbagère.

Pour faire face à une pénurie de ressources végétatives et combler le déficit pour l'hiver, il convient de préciser l'effet de la sécheresse sur la valeur alimentaire des fourrages et de connaître celle de ressources alimentaires de complément à cette pénurie.

1.1.4.5.1. Valeur alimentaire des ressources en cas de sécheresse et utilisation de ressources alimentaires de complément

Suite aux travaux de l'INRA sur les systèmes d'alimentation des herbivores (INRA, 1988), les valeurs alimentaires des ressources alimentaires des herbivores sont bien connues, ainsi que celles des fourrages et aliments de complément, dans une moindre mesure, en cas de sécheresse. Ces valeurs alimentaires sont exprimées : pour l'énergie dans le système des UFL ou UFV, pour les valeurs azotées dans le système des PDI, pour l'ingestion volontaire des animaux dans le système des Unités d'Encombrement (UE) et pour les minéraux. (INRA, 1978).

La sécheresse, en ralentissant la croissance de l'herbe, tend à ralentir également la diminution de sa digestibilité comme cela a été montré sur la luzerne (Lemaire et al., 1989). En effet, la vitesse de diminution de la digestibilité de l'herbe au cours d'une repousse est liée à la vitesse de croissance, ainsi tout ralentissement de croissance quelle qu'en soit l'origine, sécheresse ou baisse de température, permet de récolter un fourrage de meilleure qualité. Ceci explique en grande partie que pendant les périodes sèches où la pousse de l'herbe apparaît très ralentie, on a pu constater que les performances des animaux au pâturage pouvaient se maintenir de manière parfois assez surprenante. Bien entendu, en cas de sécheresse prolongée, le maintien des animaux sur les parcelles oblige ces derniers à consommer la base sénescente des talles au ras du sol, et dans ces conditions la valeur alimentaire de l'ingéré chute. Il est important de noter que la sécheresse provoque un déficit de nutrition azotée aussi bien chez les graminées (Denoix et Lemaire, 1987) que chez les légumineuses (Lemaire et al., 1989). Ainsi, si la digestibilité de l'herbe se maintient relativement bien en situation de sécheresse, il n'en va pas de même de la valeur azotée de l'herbe qui chute fortement dès le début de la sécheresse, bien avant que la croissance de l'herbe ne soit stoppée.

L'utilisation de ressources alimentaires de complément comme l'ensilage de céréales immatures, la paille, les sous-produits de culture, et les drèches et marcs permet de combler le déficit fourrager des systèmes herbagers avec des rations qui ont des qualités très variables. Les tables de valeurs alimentaires de l'INRA permettent de prévoir la valeur alimentaire de ces différents aliments (Tableau 1).

1.1.4.5.2. Plans d'alimentation des animaux

Le but de cette expertise n'est pas de passer en revue les plans d'alimentation des animaux qui peuvent être mis en place dans les conditions de sécheresse. Ils sont par nature encore plus diversifiés que dans des conditions normales, selon l'état des réserves fourragères récoltées, les aliments de complément disponibles et aussi selon les disponibilités que les éleveurs peuvent mobiliser. Dans le cas où le niveau de réserves fourragères est encore satisfaisant, l'ajustement se réalise principalement par l'augmentation des quantités d'aliments concentrés dans les rations selon les règles classiques d'utilisation. Par contre, dans le cas de pénurie importante de réserves, le recours à des aliments extérieurs (pailles, fourrages pauvres) devient nécessaire en particulier pour les animaux à besoins modérés. Cette situation s'accompagne également d'une augmentation des quantités d'aliments concentrés dans les rations selon le niveau de production des animaux. Au fil des récentes sécheresses, ce sont ces deux possibilités d'ajustement (importation de fourrages pauvres disponibles hors exploitation et achat d'aliments concentrés au sens large) qui ont été mises en œuvre et soutenues auprès des exploitations d'élevage.

Tableau 1. Valeur alimentaire et utilisation de ressources alimentaires de complément à la sécheresse (INRA, 2006)

Code INRA	ALIMENT	%	Energie UF/kg		Azote g/kg			Azote % PDIE		Code INRA	Encombrement UE/kg			Constituants organiques g/kg / %					Minéraux g/kg		Energie kcal/kg / %	
		MS	UFL	UFV	PDIA	PDIN	PDIE	LysDI	MetDI		UEM	UEL	UEB	MO dMO	MAT dMA	CB dCB	NDF dNDF	ADF dADF	P P_{abs}	Ca Ca_{abs}	EB dE	EM
Ensilage de plantes immatures																						
FE4800	Blé, Hachage fin sans conservateur laiteux-pateux	**35,0**	**0,64** 0,22	**0,55** 0,19	**21** 7	**60** 21	**60** 21	**6,71**	**1,99**	**FE4800**	**1,36**	**1,01**	**1,01**	**892** 59	**98** 58	**267** 47	**522** 50	**313** 44	**2,6** **1,7**	**4,0** **1,6**	**4280** 56	**1946**
FE4790	Orge, Hachage fin sans conservateur laiteux-pateux	**35,0**	**0,69** 0,24	**0,60** 0,21	**18** 6	**50** 18	**58** 20	**6,67**	**1,96**	**FE4790**	**1,36**	**1,06**	**1,10**	**930** 59	**81** 51	**200** 29	**449** 36	**249** 26	**2,3** **1,5**	**3,4** **1,3**	**4511** 56	**2085**
FV2900	Colza, floraison	**13,5**	**0,76** 0,10	**0,70** 0,09	**34** 5	**94** 13	**82** 11	**7,16**	**2,03**	**FV2900**	**1,71**	**1,23**	**1,47**	**846** 71	**150** 79	**286** 59	**505** 0	**350** 0	**4,5** **3,0**	**18,0** **5,4**	**3960** 68	**2161**
FE4750	Maïs, Hachage fin sans conservateur Temp. été insuff., récolte + de 55 j. après flor.	**24,0**	**0,85** 0,20	**0,73** 0,18	**23** 6	**65** 16	**66** 16	**6,56**	**1,93**	**FE4750**	**1,53**	**1,17**	**1,26**	**944** 68	**105** 59	**226** 61	**477** 61	**274** 57	**1,8** **1,3**	**2,0** **0,8**	**4505** 65	**2417**
FV2860	Choux, cavaliers rouges	**14,9**	**1,04** 0,15	**1,02** 0,15	**39** 6	**108** 16	**100** 15	**7,18**	**1,83**	**FV2860**	**0,95**	**0,98**	**0,97**	**880** 83	**172** 81	**166** 67	**348** 0	**191** 0	**3,0** **2,0**	**15,0** **4,5**	**4250** 80	**2862**
FE5580	Tournesol, Hachage fin sans conservateur graine consistante	**23,0**	**0,73** 0,17	**0,64** 0,15	**24** 6	**65** 15	**56** 13	**6,51**	**2,13**	**FE5580**	**1,63**	**1,05**	**1,10**	**899** 62	**105** 65	**273** 46	**380** 44	**291** 43	**3,0** **2,0**	**13,0** **3,9**	**4590** 59	**2220**
FE5590	Choux, Hachage fin sans conservateur moelliers et 1/2 moelliers	**15,7**	**1,03** 0,16	**0,99** 0,16	**34** 5	**94** 15	**79** 12	**7,12**	**1,80**	**FE5590**	**1,30**	**1,00**	**1,00**	**888** 79	**157** 73	**190** 73	**330** 66	**205** 67	**3,0** **2,0**	**13,5** **4,1**	**4510** 76	**2835**
Pailles																						
FP0020	Paille de Blé, Seule	**88,0**	**0,42** 0,37	**0,31** 0,27	**11** 10	**22** 19	**44** 39	**7,24**	**1,99**	**FP0020**	**2,41**	**1,60**	**1,80**	**920** 42	**35** 0	**420** 50	**0** 0	**0** 0	**1,0** **0,5**	**2,0** **0,0**	**4340** 38	**1335**
FP0060	Paille d'Orge, Seule	**88,0**	**0,44** 0,39	**0,33** 0,29	**12** 11	**24** 21	**46** 40	**7,36**	**2,06**	**FP0060**	**2,47**	**1,60**	**1,80**	**920** 44	**38** 8	**420** 54	**0** 0	**0** 0	**1,0** **0,5**	**3,5** **1,4**	**4300** 40	**1390**
FP0090	Paille d'Avoine, Seule	**88,0**	**0,50** 0,44	**0,39** 0,34	**10** 9	**20** 18	**48** 42	**7,31**	**2,03**	**FP0090**	**2,30**	**1,55**	**1,70**	**910** 48	**32** 0	**420** 61	**0** 0	**0** 0	**1,0** **0,5**	**3,5** **1,4**	**4240** 44	**1509**
FP0100	Paille de Sorgho, Seule	**85,0**	**0,54** 0,46	**0,43** 0,37	**14** 12	**28** 24	**53** 45	**6,67**	**1,94**	**FP0100**	**1,77**	**1,18**	**1,36**	**922** 50	**44** 16	**326** 60	**0** 0	**0** 0	**1,0** **0,5**	**3,5** **1,4**	**4320** 46	**1632**
FP0140	Paille de Graminée fourragère	**88,0**	**0,50** 0,44	**0,39** 0,34	**26** 23	**53** 47	**53** 47	**6,93**	**1,86**	**FP0140**	**1,54**	**1,11**	**1,20**	**926** 48	**84** 49	**400** 53	**0** 0	**0** 0	**1,0** **0,5**	**3,0** **1,2**	**4340** 44	**1543**
FP0150	Paille de Féverole, Seule	**87,0**	**0,45** 0,39	**0,34** 0,30	**15** 13	**31** 27	**51** 44	**7,52**	**1,73**	**FP0150**	**1,74**	**1,17**	**1,33**	**924** 45	**49** 12	**479** 47	**0** 0	**0** 0	**1,0** **0,5**	**5,0** **2,0**	**4200** 41	**1385**
Cannes de Maïs																						
FP0170	Fraîche	**52,4**	**0,60** 0,31	**0,51** 0,27	**15** 8	**30** 16	**60** 31	**7,31**	**1,83**	**FP0170**	**2,07**	**1,30**	**1,30**	**914** 57	**48** 10	**310** 64	**0** 0	**0** 0	**1,5** **0,8**	**3,0** **1,2**	**4160** 53	**1806**
FP0180	Ensilées	**31,0**	**0,61** 0,19	**0,51** 0,16	**15** 5	**38** 12	**46** 14	**7,17**	**1,75**	**FP0180**	**2,50**	**1,00**	**2,00**	**907** 57	**66** 42	**337** 65	**0** 0	**0** 0	**1,5** **0,8**	**3,0** **1,2**	**4200** 53	**1800**
Co produits																						
CF0170	Pulpe de betterave déshydratée	**89,1**	**0,99** 0,89	**0,98** 0,87	**41** 37	**66** 59	**109** 97	**7,98**	**1,99**	**CF0170**				**923** 84	**91** 71	**194**	**454**	**231**	**1,0** **0,9**	**14,8** **3,0**	**4060** 81	**2697**
FR0120	Pulpes de betteraves ensilées	**22,0**	**1,01** 0,22	**0,99** 0,22	**28** 6	**60** 13	**84** 18	**7,95**	**2,00**	**FR0120**	**1,63**	**1,05**	**1,05**	**912** 86	**98** 55	**206** 77	**0** 0	**0** 0	**1,0** **0,9**	**13,0** **2,6**	**4010** 82	**2739**
FR0100	Feuilles et collets de betteraves propres	**13,0**	**0,87** 0,11	**0,85** 0,11	**32** 4	**100** 13	**87** 11	**6,94**	**1,81**	**FR0100**	**0,75**	**0,80**	**0,80**	**803** 82	**164** 72	**95** 75	**0** 0	**0** 0	**2,5** **1,8**	**10,0** **2,0**	**3730** 79	**2514**
CS0200	Drèches d'orge de brasserie déshydratées	**91,9**	**0,82** 0,76	**0,73** 0,67	**137** 126	**194** 178	**171** 157	**5,17**	**1,64**	**CS0200**				**958** 61	**262** 70	**167** 0	**574** 0	**222** 0	**6,3** **4,9**	**2,3** **1,3**	**4900** 62	**2395**
CF0120	Marc de raisin	**91,8**	**0,31** 0,28	**0,19** 0,17	**18** 16	**32** 29	**27** 25	**6,42**	**1,94**	**CF0120**				**909** 30	**142** 49	**244** 0	**622** 0	**524** 0	**3,1** **2,2**	**8,5** **3,4**	**4505** 28	**1004**
Co produit d'origine animale																						
CA0010	Lactosérum	**6,2**	**1,15** 0,07	**1,18** 0,07	**0** 0	**74** 5	**77** 5	**7,76**	**2,10**	**CA0010**				**885** 94	**129** 90	**0** 0	**0** 0	**0** 0	**10,0** **9,0**	**19,0** **14,3**	**3870** 92	**2989**

Les recommandations des différents organismes d'appui aux éleveurs (Institut de l'élevage, Chambres régionales ou départementales d'agriculture…) ont proposé des recommandations d'alimentation adaptées aux systèmes d'élevage rencontrés et aux zones concernées (Institut de l'Elevage, 1997, 2003 ; Réseaux d'Elevage Charolais, 2003). Les tables de la valeur des aliments et des apports recommandés pour les animaux permettent de raisonner ces plans d'alimentation (INRA, 1988, 2006). Les logiciels d'établissement des rations, maintenant disponibles sur différents outils informatiques, facilitent ces calculs et ajustements (INRAtion, 2006).

1.1.4.5.3. Adaptation des animaux et des troupeaux aux conditions de sécheresse

En cas de pénurie des ressources, il est possible de placer l'animal en situation de sous-alimentation ou de sous-nutrition (principalement sur le plan énergétique) par rapport à un niveau de production maximum ou optimum. Cette situation se traduit en général par une baisse à court terme des productions, mais également par la mise en place de processus adaptatifs de la part de l'animal, que l'éleveur peut utiliser dans ces situations de pénurie. Ces processus se manifestent à des pas de temps différents : à court terme, chute des performances, modifications de la nature et de la qualité des produits…, à moyen terme, mobilisation et reconstitution des réserves corporelles de l'animal… et à plus long terme, altération du processus de reproduction, mise en place de phénomènes de compensation (croissance compensatrice), voire modification de la carrière productive de l'animal.

La **sous-alimentation** a des incidences zootechniques et économiques beaucoup plus importantes pour les animaux à fort niveau de production (femelles herbivores en lactation) que pour les autres catégories d'animaux, qui se concrétisent par une baisse de production. L'effet dépressif d'une sous-alimentation va dépendre de la période de lactation, du potentiel de production et de l'état des réserves corporelles de l'animal. L'effet de la sous-alimentation des femelles est plus marqué en début de lactation (Coulon et Rémond, 1991 ; Peyraud, 2003). Dans le cas d'une sous-alimentation modérée (besoins couverts à 80-90%) de 4 à 11 semaines post-partum chez la femelle en lactation (vache, brebis), la diminution d'énergie exportée dans le lait est moindre que la baisse des apports en énergie (Figure 3). En effet, l'énergie des réserves corporelles mobilisée contribue pour plus de 30% aux exportations d'énergie dans le lait. Lorsque la sous-alimentation est maintenue sur une longue période, l'exportation d'énergie diminue et s'ajuste sur les apports énergétiques. Ainsi, les capacités adaptatives permises par les réserves corporelles diminuent au cours de la lactation. Enfin, ces capacités d'adaptation permises par la mobilisation des réserves diminuent lorsque les animaux sont sous-alimentés sur plusieurs lactations successives (Chillard, 1992). Ainsi, à moyen terme, l'impact d'un niveau de sous-alimentation donné va différer selon l'état physiologique de l'animal et selon son état corporel (niveau des réserves) au moment où il subit cette restriction alimentaire.

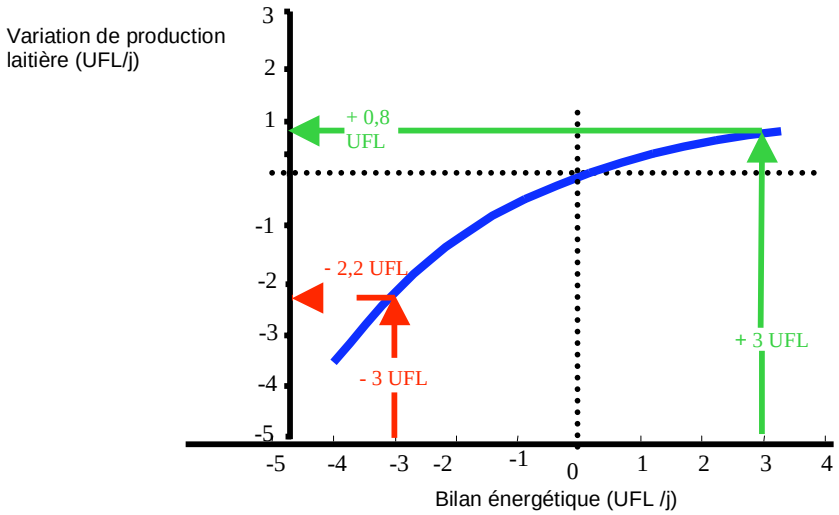


Figure 3. Effet d'une variation des apports énergétiques sur la variation de la production laitière, exprimée en énergie nette (UFL) ingérée et exportée dans le lait chez la vache laitière (Coulon et Rémond, 1991).

Selon le même phénomène, on considère que la femelle herbivore allaitante compense au moins en partie les déficits nutritionnels momentanés, qu'elle récupère ensuite en période d'alimentation libérale. C'est la notion habituelle de "tampon" qui se traduit par des variations repérables de poids, qui peuvent atteindre environ 18-20% du poids moyen de l'animal. Ce volant de réserves corporelles est surtout constitué de dépôts adipeux (lipides) et d'un peu de muscles. Ainsi, pour en situer l'ampleur, la différence de poids des dépôts adipeux atteint environ 110 kg entre une femelle bovine allaitante non gestante très maigre de grand format et le même type d'animal très en état (grasse). Ce sont les dépôts adipeux sous-cutanés et internes, dont les variations relatives sont les plus importantes, qui assurent ce tampon. Ce point indique l'importance de la note d'état corporel (note de 0 à 5), indicateur de l'état des animaux estimé directement sur l'animal par des maniements cutanés. Ainsi, ces variations de composition corporelle correspondent essentiellement à des variations des quantités de lipides atteignant en moyenne environ 30 kg, soit 40 à 45 kg de variation apparente de masse corporelle. Lorsque ces réserves sont mobilisées, elles le sont efficacement, avec un rendement énergétique élevé par rapport à l'énergie alimentaire ingérée. Ainsi on estime, chez les vaches allaitantes adultes, le rendement à 4,5-6 UFL par kg de mobilisation de masse corporelle, soit l'équivalent de 8 à 13 kg d'ingestion par jour d'un fourrage de qualité moyenne (Petit et al., 1993 ; Agabriel et Doreau, 2003).

Par la suite, des réponses d'adaptation de **compensation ou de récupération** sont observées lorsqu'une période de réalimentation relative succède à une phase de restriction plus ou moins durable et sévère. L'exemple le plus classique de récupération est celui de la croissance (fonction prioritaire chez l'animal) compensatrice que l'on observe, par exemple, lors d'un retour à une alimentation non limitante (pâturage…) succédant à une période de restriction alimentaire, le plus souvent hivernale (Figure 4).

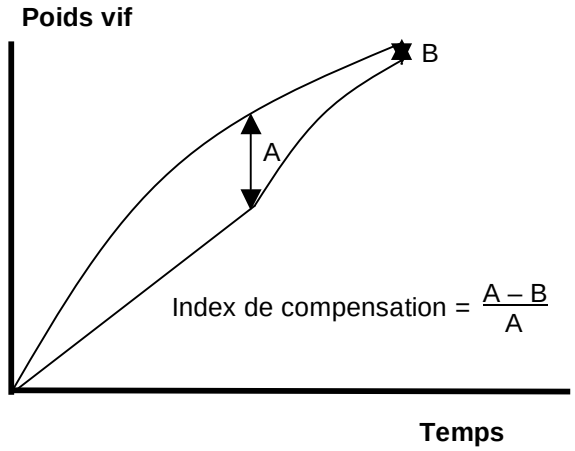


Figure 4. Phénomène de croissance compensatrice :
évolution des poids vifs lors d'une croissance continue ou discontinue.
L'index de compensation est calculé à partir de l'écart de poids
entre les deux types de croissance, avant et après la période de compensation.

Les adaptations digestives et métaboliques mises en jeu dans cette période de récupération sont effectives à très court terme, ce qui témoigne de la réactivité de l'organisme à s'adapter à une pénurie alimentaire ou à mettre à profit un changement du statut nutritionnel. La réponse compensatrice des animaux, à la suite d'une restriction alimentaire, varie principalement selon la durée et la sévérité de la restriction subie et des caractéristiques de l'animal (âge physiologique principalement, précocité…). La compensation s'effectue par le biais de plusieurs mécanismes digestifs, métaboliques et hormonaux (Tableau 2) qui aboutissent à une augmentation du gain de poids et au rétablissement de l'état corporel en comparaison avec un organisme en croissance continue (Hoch et al., 2003). Les dépenses énergétiques réduites pendant la phase de restriction restent relativement basses lorsque les apports alimentaires augmentent. Lorsque le système digestif a retrouvé son potentiel, l'ingestion est accrue par rapport à celle d'animaux ne compensant pas. Sous la dépendance de nombreux signaux

hormonaux synergiques, l'ensemble du métabolisme s'oriente vers une accrétion protéique accrue. Au terme de cette période de croissance compensatrice complète, par exemple à même poids vif pour les bovins en croissance, les animaux présentent les mêmes caractéristiques d'état corporel et de composition du corps entier.

Tableau 2. Adaptations métaboliques et endocriniennes à la restriction alimentaire et à la réalimentation consécutive (croissance compensatrice) chez les ruminants

Métabolites / Hormones	Restriction	Réalimentation	Durée d'adaptation
Acides gras libres	↗	↘	Quelques jours
Corps cétoniques	↗	↘	Quelques jours
Glucose	↘	↗	Quelques jours
Urée	↘	↗	Quelques jours à quelques semaines
Insuline	↘	↗	Quelques jours
Insulin-Growth factor (IGF-1)	↘	↗	Quelques jours
Growth hormone (GH)	↗	↘	Quelques semaines
Glucocorticoïdes	↗	↘	Quelques jours
Hormones thyroïdiennes (T3-T4)	↘	↗	1 à 2 semaines
Métabolismes			
Dépenses énergétiques	↘	↗	Quelques jours à quelques semaines
Synthèse protéique musculaire	↘	↗	Quelques jours à quelques semaines
Protéolyse musculaire	↘	↗	Quelques jours à quelques semaines

Le processus de compensation ou de "rebond" a également été mis en évidence chez les femelles adultes au cours de leur cycle de production : brebis à l'entretien ou en lactation , vaches et chèvres en lactation (Atti et Bosquier, 1999 ; Chillard et al., 1983). Il intervient aussi bien sur les activités lipogéniques du tissu adipeux que sur les quantités de lipides déposés. Il est susceptible d'induire des écarts de bilans alimentaires totaux non négligeables (188 UFL *vs* 156 UFL) entre une stratégie alimentaire stabilisée chez la brebis, correspondant à la satisfaction des besoins des animaux, et une stratégie dynamique, mettant en jeu une période de sous-alimentation (20-40% des besoins) puis une ré-alimentation (130-150%des besoins) (Atti et Bocquier, 1999). Les processus d'épargne et de récupération des tissus musculaires adipeux lors de la sous-alimentation et de la ré-alimentation sont cependant plus ou moins efficaces selon l'espèce, la race ou l'âge de l'animal. Ainsi, la brebis rustique (Barbarine) est capable de moduler très finement la mobilisation des tissus adipeux et leur reconstitution pendant la ré-alimentation. Sa particularité est de pouvoir reconstituer intégralement la perte de masse musculaire. A contrario, chez la vache laitière adulte tarie non gravide subissant des niveaux alimentaires variables au cours du temps, les dynamiques des dépôts lipidiques et protéiques différent lors des phases de ré-alimentation et se caractérisent par un accroissement très important des tissus adipeux alors que la reprise de masse musculaire reste très limitée (Robelin et al., 1990).

Chez la femelle bovine allaitante, des différences adaptatives à la sous-nutrition et à la compensation apparaissent entre génotypes. Par exemple durant la période hivernale, la sous-alimentation n'a pas d'effet sur la production laitière moyenne de vaches rustiques Salers, tandis qu'elle affecte celle des vaches à viande spécialisée Limousines (D'Hour et al., 1995). Les différences de profils de réponse entre ces deux génotypes peuvent s'interpréter par des réserves adipeuses plus importantes (maturité atteinte grâce à une précocité plus élevée) chez les Salers, et encore par des ingestions plus élevées au pâturage permettant de constituer des réserves corporelles conséquentes. Concernant la fonction de reproduction, les vaches Salers apparaissent également moins sensibles à la sous-alimentation. En effet, l'écart d'anoestrus post-partum entre des animaux correctement et sous-alimentés est plus long chez les vaches spécialisées Limousines. Enfin sur le long terme au niveau de la carrière productive de la vache, une différence de capacité adaptative s'amorce. Elle se répercute directement sur le taux de survie des vaches (Figure 3) qui résulte de la politique de réforme basée sur la sortie des femelles vides et pratiquée dans ces systèmes de bovins allaitants (échec à la reproduction pour une période donnée de reproduction).

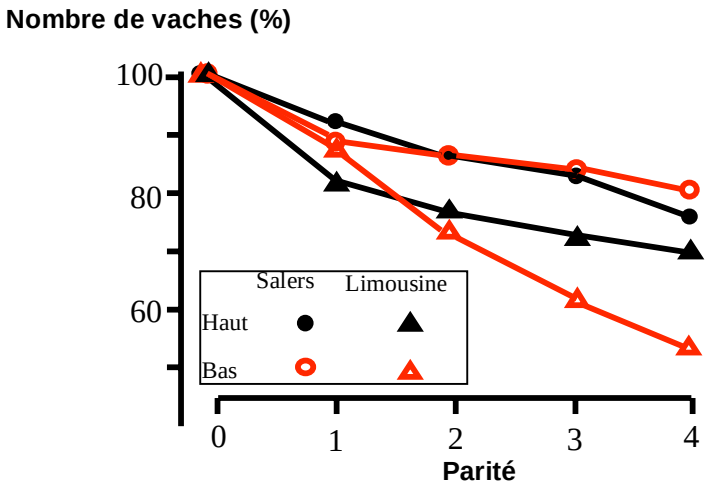


Figure 5. Evolution du taux de survie des vaches Salers et Limousines conduites selon une modalité alimentaire correcte ou de sous-alimentation hivernale (D'Hour et al., 1995).

La fonction de reproduction est la composante animale clé des systèmes d'élevage d'herbivores et une des plus sensibles aux modifications de milieu (sous-alimentation, chaleur…). Les relations entre l'état nutritionnel de la femelle et la fonction de reproduction sont dynamiques. Les besoins pour la reproduction *stricto sensu*, fécondation et ovulation, sont pratiquement négligeables. En revanche, l'initialisation de la gestation est lourde en conséquences pour la survie de la femelle si les apports alimentaires et/ou si les réserves corporelles sont insuffisantes. En effet, ses besoins vont s'accroître au cours de la gestation et, surtout, après l'enclenchement de la lactation.

Ainsi, en pratique, dans les systèmes d'élevage d'herbivores soumis à la sécheresse et à une sous-alimentation notoire non compensée par des apports extérieurs, on peut s'attendre à davantage d'hétérogénéité des performances productives et à un étalement dans le temps de mécanismes de reproduction. On peut ainsi considérer que l'étalement de la reproduction constitue une forme collective d'adaptation puisque des événements nutritionnels sérieux (sécheresse par exemple) n'affecteront pas l'ensemble des individus de la même façon, améliorant ainsi globalement la longévité du potentiel de production considéré à l'échelle du troupeau.

1.1.4.6. Adaptation régionale des systèmes d'élevage d'herbivores aux conditions de sécheresse

1 1461 Les solutions aux crises fourragère au niveau national.

Chaque sécheresse d'ampleur nationale relance la question sur les disponibilités fourragères nécessaires, sinon pour la survie du cheptel, du moins pour le maintien des performances suffisantes des exploitations qui n'entraînent pas des baisses drastiques de revenu (Pflimlin, 1997). En effet, la sécheresse de 1959 avait entraîné une forte baisse de la production avec pour conséquence une importation de lait de consommation, alors que celle de 1976 avait permis de diminuer notablement les excédents de beurre et de poudre de lait au niveau européen (Pflimlin, 1997). La sécheresse de 1976 a été d'une ampleur exceptionnelle du fait qu'elle a débuté relativement tôt au printemps (Marion et al., 1977) ; son impact sur la production d'herbe et donc sur les élevages qui en dépendent le plus a donc été maximisé. Rétrospectivement, une majorité d'éleveurs avaient pu maintenir leur cheptel et leur capacité de production grâce notamment à trois ressources : la paille, les céréales à prix réduit et les concentrés (Pflimlin et al., 1977). Ces auteurs ont estimé les besoins en fourrages au niveau national d'après les effectifs animaux de 1995, soit environ 85 millions de tonnes de MS à raison de 5 tonnes par UGB.

Tableau 3. Surfaces et productions fourragères en année dite "normale" au niveau national (d'après Pflimlin et al. 1997).

	Surfaces (millions ha)	Production totale (Millions t MS)
Surfaces toujours en herbe	10,5	44
Prairies temporaires	3	24
Fourrages annuels (maïs…)	1,65	15
Paille et co-produits		2
Total	15,15	85

Cette fourniture de fourrage grossier implique une complémentation d'environ 10 millions de tonnes de concentrés du commerce ou de céréales autoconsommées. Ainsi pour un besoin en année "normale" de 85 millions de tonnes de matière sèche de fourrage, une sécheresse du type de celle de 1976 aurait impliqué un déficit d'environ 19 millions de tonnes. Les auteurs considèrent que dans de telles conditions de pénurie fourragère, il serait nécessaire de mobiliser environ 10 millions de tonnes de fourrages supplémentaires.

A ces 10 millions de tonnes de fourrages de substitution devrait être alloués environ 5 millions de tonnes de concentrés supplémentaires afin d'équilibrer les rations. Ainsi les 19 millions de tonnes de MS de déficit fourrager pourraient être couverts à hauteur de 15 millions de tonnes, les 4 millions restants, soit 5% du bilan total, correspondant à la marge d'erreur ou au gaspillage habituel. Les auteurs de cette étude notent que les solutions décrites dans le tableau 4 paraissent accessibles tant en tonnage qu'en surface, à condition qu'il y ait une forte mobilisation et une solidarité tant entre céréaliers et éleveurs qu'entre régions qui sont différemment touchées.

Tableau 4. Surfaces et productions fourragères de substitution mobilisable en année de pénurie (d'après Pflimlin et al., 1997).

Ressources	Tonnages (Millions de tonnes)	Surfaces (Millions d'ha)
Paille	4	1
Céréales immatures	1	0,12
Conversion de maïs grain en ensilage	2	0,20
Cannes de maïs	0,5	0,20
Fanes de pois	0,5	0,50
Cultures dérobés	2	1
Total	10	3,02

1.1.4.6.2. Quelques exemples d'adaptation régionale

D'une manière générale, dans **les régions de polyculture-élevage** où la céréaliculture co-habite avec l'élevage, la sécurité fourragère est assurée par les cultures à double fin grain et ensilage sur maïs et céréales d'hiver. Cette sécurité peut être réalisée soit au niveau de l'exploitation d'élevage elle-même, soit au niveau local par contrat avec des exploitations voisines.

Dans les **régions purement herbagères**, l'abandon des cultures céréalières complémentaires ne permet plus d'utiliser cette source de flexibilité. La sécurité de ces systèmes requiert une avance de stock de foin équivalent à un demi hiver (Pflimlin, 1997). En situation de pénurie exceptionnelle, le recours à l'achat de paille devient nécessaire. Des plans d'approvisionnements en paille peuvent se mettre en place au niveau régional.

Dans les **zones pastorales du Sud**, des éléments de flexibilité sont à rechercher dans une exploitation plus ou moins complète de ressources fourragères pérennes dans les parcours, landes et sous-bois.

Cas des systèmes d'élevage intensifs du Grand Ouest

Cette région est soumise à des déficits hydriques estivaux chroniques, notamment à l'intérieur d'un triangle Le Mans, Lorient, La Rochelle. Les systèmes naisseurs-engraisseurs relativement intensifs avec des chargements élevés sont en général fortement impactés par la sécheresse, les rendements du

maïs ensilage étant très fluctuants en absence d'irrigation. La mobilisation des ressources en céréales apparaît donc comme la source de sécurité la plus mobilisable. Pour les élevages laitiers, les systèmes de vêlage d'automne apparaissent comme les plus adaptés, les vaches taries pouvant aisément être alimentées par des rations de paille + concentrés. La solution des ensilages de céréales immatures est cependant souvent préférable. Dans ces conditions, l'implantation de cultures dérobées après les premiers orages d'été peut permettre un pâturage prolongé à l'automne et une économie de stocks. Mais parfois les sécheresses de fin d'été et d'automne ne permettent pas de mettre cette solution en œuvre. Le recours à l'irrigation du maïs apparaît comme une solution d'assurance sécheresse, mais une telle solution ne peut pas être généralisée dans des régions où la ressource est fortement limitée. Des adaptations possibles des systèmes fourragers seront discutées dans le Chapitre 2.2.

Cas des zones herbagères du Centre de la France

La plupart des régions herbagères d'élevage du Centre de la France ont été atteintes par les dernières sécheresses. En 2003, la situation a été particulièrement difficile pour la Bourgogne, le Centre, l'Auvergne et l'Ouest de Rhône-Alpes (Institut de l'Elevage, 2003b). Par contre, 2005 fut plus délicat pour les zones de moyenne montagne du Massif Central, bien que réputées humides, avec de très fortes variations selon la localisation et l'altitude. Dans ces régions, globalement, la première fauche d'herbe peut être notablement réduite (50%) en cas de début de printemps particulièrement froid puis sec ensuite. Dans les zones de plus faibles altitudes, les repousses sont très faibles ou inexistantes et utilisées dans ce cas à l'accroissement des surfaces de pâturage d'été et d'automne. La production de maïs ensilage, où elle est possible, peut être également atteinte par de mauvaises levées et par manque d'eau à la fécondation et ensuite…, sauf irrigation qui demeure limitée dans ces systèmes d'élevage.

L'analyse des données, à partir des Réseaux d'Elevage en 2003, met en évidence des situations et des stratégies d'adaptation des élevages très diverses selon les caractéristiques des troupeaux, de la perception et la réactivité des éleveurs, de leur situation technique et financière… Deux situations extrêmes peuvent être retenues. D'une part, les élevages qui disposent le plus souvent de stocks fourragers de sécurité ou de prévoyance. Ces stocks sont mobilisés dés que besoin en cas de sécheresse (juillet…). Les achats extérieurs ou les réservations sont assurées tôt et l'alimentation des troupeaux est couverte jusqu'au printemps suivant. Les productions animales sont assez peu affectées et les ajustements nécessaires se réalisent sur le type d'animal retenu et sur les ventes (mise en marché de vaches vides ou en surnombre, broutards initialement destinés à la repousse sur l'exploitation). Cette situation est loin d'être généralisée et semble difficile à tenir (agrandissement des exploitations et du nombre d'animaux présents, et surtout effet réitératif et cumulatif de cette situation de sécheresse au fil des ans). A l'opposé, de nombreux élevages ne disposent pas de ces stocks d'avance et leur situation financière ne permet pas d'envisager ou d'anticiper des achats de fourrages ou d'aliments de substitution. Cette situation peut se traduire par une décapitalisation importante à partir d'animaux mal préparés. L'autre possibilité est de conserver le troupeau avec une forte restriction des apports alimentaires qui se traduit, au-delà d'une certaine limite, par des contre-performances de production (reproduction…) et de santé animale. Des propositions ont été formulées dans ce cas, si le déficit fourrager estimé est inférieur à 20% par rapport à des conditions normales de récolte, il peut être couvert par une sous-alimentation du troupeau et par l'apport d'aliments concentrés, prélevés ou achetés pour les animaux les plus exigeants. Si ce déficit est supérieur à cette borne, il est nécessaire d'avoir recours en plus à l'achat de fourrages adaptés à la conduite du troupeau.

Dans ces zones où l'utilisation des fourrages (herbe surtout) par les animaux prédomine, la sécheresse se traduit par une recherche de fourrages de complément puis d'aliments de substitution (céréales, aliments concentrés…). La paille est le fourrage grossier qui est mobilisé en priorité, soit à la place de la litière sur l'exploitation, soit localement (Département…) ou à l'échelle du territoire national ou européen (1976 s'est traduit par la mise en mouvement de 4 millions de tonnes). Pour les éleveurs de ces zones, la paille est réservée aux bovins à forte capacité d'ingestion, vaches et génisse de 2 ans et plus. Les jeunes destinés à l'élevage ne reçoivent des rations à base de paille qu'en dernier recours et compensées par un apport supplémentaire d'aliments concentrés. Enfin dans le cas de bovins en finition, les régimes paille et céréales peuvent être mobilisés, ce qui présente l'avantage de libérer les autres ressources fourragères disponibles pour l'alimentation du troupeau souche (ensilage de maïs,

par exemple si disponible…). Une équivalence pratique a été mise en place sur la zone Charolaise : 10 kg de foin utilisés en année normale sont substitués par 7 kg de paille consommés plus un mélange d'aliments concentrés (céréales, tourteaux ou autres graines…). Ainsi, par exemple, au niveau de l'exploitation, un déficit de 10 tonnes de foin se résorbe par 7 tonnes de paille, 22 quintaux de céréales et 600 kg de tourteau de soja. D'autres fourrages grossiers ont été utilisés marginalement, cannes et spaths de maïs, foins médiocres, pailles de pois, de lin, fanes de lentilles… Dans les zones appropriées, le transfert du maïs grain vers l'ensilage a été une solution mise en oeuvre dans un contexte de sécheresse. Cependant dans ce cas, l'avancement rapide de l'état de végétation du maïs (>35% de MS) limite cette possibilité et les surfaces pouvant être mobilisées (Sud-Ouest). Cette possibilité se raisonne également selon le prix d'achat du maïs grain sur pied en complément des frais de récolte, de transport et les pertes à la conservation. Cette solution concerne principalement les élevages laitiers limitrophes à la culture du maïs. Des transferts de maïs épis ou de maïs grain humide ensilé vers les régions d'élevage sont signalés.

Analyse économique dans le Charolais (P. Veysset, Etude LEE, INRA Theix)

Fortement touchés par la sécheresse printanière et estivale de 2003, les éleveurs de bovins allaitants charolais des zones herbagères et polyculture-élevage des bordures nord et ouest du Massif Central, ont eu massivement recours à des achats de paille et d'aliments concentrés pour alimenter leurs animaux. Les observations réalisées par le Laboratoire d'Economie de l'Elevage (INRA Clermont-Theix) sur un échantillon constant de 83 exploitations sur les années 2002 à 2004 (Veysset et al., 2005), montrent que la sécheresse n'a pas affecté les résultats de productivité des troupeaux. Sur les trois années, les taux de gestation des vaches, de mortalité des veaux et de productivité numérique ne sont pas significativement différents. La productivité en viande, mesurée par le critère kg de viande vive produits par unité gros bovins (UGB), de 2003 est identique à celle de 2002 (305 kg/UGB), on observe même une augmentation de 2% en 2004.

Les éleveurs ont pallié le manque de fourrages par une distribution plus importante de concentrés et par des achats d'aliments grossiers au cours de l'été 2003 et de l'hiver 2003/2004. La consommation de concentrés moyenne des troupeaux a augmentée de 22% entre 2003 et 2002 (+140 kg/UGB) et 7% (+44 kg/UGB) entre 2004 et 2002 ; ces concentrés supplémentaires proviennent pour 65% d'achat et pour 35% d'autoconsommation des céréales de l'exploitation (d'où un moindre volume de vente de céréales). Ces consommations de concentrés et les achats de fourrages représentent une charge supplémentaire de 34 €/UGB en 2003 et 12 €/UGB en 2004, comparé à 2002. Les autres charges du troupeau varient peu, alors que les charges de la surface fourragère progressent de 15% (+11 €/ha) en 2004, pour maximiser les récoltes de fourrages et reconstituer les stocks fourragers. Cet évènement climatique ne semble pas avoir eu d'incidence sur le profil de vente des animaux, les broutards ont été vendus à un âge identique aux années précédentes (mais les contraintes d'âge pour l'attribution de la prime spéciale bovins mâles obligent les éleveurs à conserver les animaux 9 mois), il n'y a pas eu d'anticipation des ventes afin de décharger l'exploitation ; le pourcentage d'animaux engraissés (mâles et femelles) a régressé en 2004, mais ceci est à mettre en relation avec une conjoncture de prix favorable au maigre fin 2003 et 2004.

Globalement la sécheresse 2003 s'est traduite par une augmentation des charges du troupeau de 22% (+40 €/UGB) en 2003 et de 7% (+13 €/UGB) en 2004. A ce chiffrage économique il faudrait rajouter le travail supplémentaire pour affourager et abreuver (la canicule a eu un effet sur les disponibilités en eau) les animaux. Des aides exceptionnelles sécheresses ont permis aux éleveurs d'absorber cette hausse de charges ; ces aides ont même plus que compensé les dépenses supplémentaires puisqu'elles se montent en moyenne à 88 €/UGB. Cette sécheresse, couplée aux fortes gelées de janvier 2003, a entraîné une chute de 32% du rendement des céréales, non compensée par des aides spécifiques, d'où une baisse de 10% de la marge brute des cultures par hectare. Au final, les aides sécheresses n'ont pas entièrement compensé les charges alimentaires supplémentaires et la baisse de marge des cultures, le revenu moyen par travailleur a baissé de 8% en 2003 par rapport à 2002. Cette baisse de revenu est plus importante pour les exploitations ayant une plus forte part de culture dans leur surface (-15% pour les exploitations à plus de 30% de culture). Les exploitations à faible chargement (inférieur à 1,05 UGB/ha de surface fourragère), n'ont pas subi de baisse de revenu. Ces exploitations ont eu recours à

une distribution de concentrés supplémentaire dans les mêmes proportions que les autres, mais elles n'ont quasiment pas acheté de fourrages en 2003/2004 ; leur faible chargement leur a permis de stocker de l'herbe sur pied et d'être autosuffisantes en fourrage. Cette herbe sèche de mauvaise qualité explique le recours aux concentrés, mais globalement les charges du troupeau n'augmentent que de 15% en 2003 et de seulement 3% en 2004 par rapport à 2002.

Face à une sécheresse ponctuelle, les éleveurs du bassin allaitant charolais ont pallié le manque de fourrage par des achats afin de maintenir la productivité du troupeau, le produit bovin est maintenu au prix de charges supplémentaires, il n'y a pas eu d'adaptation du système de production. Cependant, après une bonne année fourragère 2004, 2005 a été marquée par une nouvelle sécheresse estivale et automnale. Si les sécheresses ne deviennent plus des événements ponctuels, certains éleveurs réfléchissent à une adaptation du système en profondeur. Une première réponse serait une baisse du chargement pour adapter la taille du troupeau aux ressources fourragères de l'exploitation, cette extensification se fera certainement par agrandissement de la surface totale pour ne pas pénaliser la production de viande. D'autres voies seront à explorer telles que la modification des dates de vêlages, la gestion des stocks fourragers (report), les cultures fourragères et/ou dérobées à pousse rapide sur une courte période, le type d'animaux produits (avec le découplage de la prime bovins mâles, l'âge à la vente ne sera plus une contrainte), mais les rapports de prix et donc l'orientation du marché restent des signaux forts pour la décision des éleveurs.

Références bibliographiques

Agabriel J., Doreau M., (2003). Sécheresse 2003 : Conséquences sur les performances ; cas des troupeaux allaitants. Unité de Recherche sur les Herbivores, INRA. 5p.

Andrieu N., Duru M., Coléno F., Osty P.L. (2006). Flexibilité de la gestion des ressources fourragères et pastorales permises par l'organisation du système fourrager. In: *Flexibilité et changements dans les exploitations d'élevage*. B. Dedieu, E. Chia, C. Moulin, M. Tichit (Eds), à paraître.

Armas C. et Pugnaire L. (2004). Plant interactions govern population dynamics in a semi-arid plant community. *Journal of Ecology*, 92, 568-576.

Atti J., Bocquier F., (1999). Adaptation des brebis Barbarine à l'alternance sous-nutrition et réalimentation : effets sur les tissus adipeux. *Annales de Zootechnie*, 48, 189-198.

Aubry C., Papy F., Capillon A. (1998). Modelling decision making processes for annual crop. Management. *Agricultural Systems*, 56, 45-65.

Borneman J., P.W. Skroch, K.M. O'Sullivan, J.A. Palus, N.G. Rumjanek, J.L. Jansen, J. Nienhuis, and E.W. Triplett (1996). Molecular microbial diversity of an agricultural soil in Wisconsin. *Applied and Environmental Microbiology,* 62: 1935-1943.

Briske D.D., S.D. Fuhlendorf, and F.E. Smiens (2003). Vegetation dynamics on rangelands : a critique of the current paradigms. *Journal of Applied Ecology,* 40: 601-614.

Briske D.D., S.D. Fuhlendorf, and F.E. Smiens (2005). State-and-transition models, thresholds, and rangeland health: a synthesis of ecological concepts and perspectives. *Rangeland Ecology & Management,* 58:1-10.

Buckland S.M., and J.P.Grime (2000). The effects of trophic structure and soil fertility on the assembly of plant communities: a microcosm experiment. *Oikos,* 91: 336-352.

Chatelin M.H., Aubry C. (1993). Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, 28 : 119-138.

Chiller Y., Rémond B., Sauvant D., Vermorel M. (1983). Particularités du métabolisme énergétique des vaches à haut potentiel de production. *Bulletin Technique CRZV de Theix,* 53, 37-64.

Chillard Y. (1992). Physiological constraints to milk production: factors which determine nutrient partitioning, lactation persistency and mobilization of body reserves. *World Review of Animal Production*, 19-26.

Coléno F.C., Duru M. (1998). Gestion de production de systèmes d'élevage utilisateurs d'herbe : une approche par atelier. *Etudes et Recherches sur les Systèmes agraires et le Développement rural*, 31: 45-61.

Coulon J.B., Rémond B., (1991). Variations in milk output and milk protein content in response to the level of energy supply to the dairy cow : a review. *Livestock production Science,* 29, 31-47.

Cros M.J., Duru M., Garcia F., Martin-Clouaire R. (2004). Simulating management strategies: the rotational grazing example, *Agricultural Systems*, 80, 23-42.

Davies M.A., Grime P., Thompson K. (2000). Fluctuating resources in plant communities : a general theory of invisibility. *Journal of Ecology*, 523

D'Hour P., Petit M., Pradel P., Garel J.P., (1995). Evolution du poids et de la production laitière de vaches Salers et Limousine dans deux milieux. *Rencontres Recherches Ruminants,* 2, 105-108.

Duru M., Charpenteau J.L. (1981). Working on the farming systems in the Pyrenees. Elaboration of a model of constitution and utilization of hay stock. *Agricultural Systems,* 7, 137-156.

Duru M., Coléno F.C., Gibon A. (1998). Systèmes d'élevage et aléas climatiques : une approche par modélisation. *Symposium Systèmes d'Elevage et Aléas Climatiques en Milieu méditerranéen.* Agadir (Maroc) 11/98, 329-338.

Duru M., Nocquet J., Bourgeois A. (1988). Le système fourrager : un concept opératoire ? *Fourrages*, 115: 251-272.

Eldin M. (1989). Analyse et prise en compte des risques climatiques pour la production végétale. In : *Le risque en Agriculture*. ORSTOM : 47-62.

Fleury P., Duboeuf B. (1996). Forage management in dairy farms: a methodological approach. *Agricultural Systems,* 52:199-212.

Gateau C., Novak S., Kockmann F., Ruget F., Granger S. (2006). Evaluation du potentiel herbager et de sa variabilité en élevage allaitant. Régionalisation de la démarche ISOP en Saône-et-Loire. *Fourrages*, 186, 257-269.

Hoch T., Begon C., Cassar-Malek I., Picard B., Savary-Auzeloux I., (2003). Mécanismes et conséquences de la croissance compensatrice chez les ruminants. *INRA Productions Animales,* 16, 49-59.

Ingram KT., Roncoli MC., Kirshen PH. (2002). Opportunities and constraints for farmer of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural Systems*, 74:331-349.

INRA (1978). Alimentation des ruminants. R. Jarrige (ed). INRA, Actualités scientifiques et agronomiques. INRA Editions, Versailles. 597p.

INRA (1988) Alimentation des bovins, ovins et caprins. R. Jarrige (ed). INRA, Paris. 471p.

INRA (2006). Alimentation des bovins, ovins et caprins. Principes de rationnement. Besoins des animaux. Tables des aliments. INRA (sous presse).

INRAtion 4.0 (2007). Logiciel de rationnement pour bovins, ovins et caprins. Educagri éditions.

Institut de l'Elevage (2003a). *Sécheresse : gérer les risques*, Etude, 124 p.

Institut de l'Elevage (2003b). Gérer l'après sécheresse : les solutions techniques pour faire face au déficit fourrager. Institut d'Elevage. Bulletin – septembre 2003. 20 p.

Jacobsen B.H., Petersen B.M., Berntsen J., Boye C., Sorensen C.G., Soogard H.T., Hansen J.P. (1998). An integrated economic and environmental farm simulation model (FASSET , Report N° 102). Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, Copenhagen, Denmark.

Jager W. (1998). *Quelles relations entretenons-nous avec nos modèles ?* Edition CIRAD.

Jarrige R. (ed). Alimentation des ruminants en période de pénurie. *Bulletin Technique CRZV de Theix*, INRA, 25, P-65.

Jeannin B., Humbert L., Teilhard de Chardin B., Lemaire G., Laissu R. (1977). Le comportement des prairies et des cultures fourragères vis à vis de la sécheresse de 1976. *Bulletin Technique d'Information*, 324-325

Lemaire G., Salette J. (1982). The effects of temperature and fertilizer nitrogen on the spring growth of tall fescue and cocksfoot. *Grass and Forage Science*, 37:191-198.

Lemaire G., Denoix A. (1987). Croissance estivale en matière sèche de peuplement de Fétuque élevée et de Dactyle dans l'Ouest de la France. II) Interaction entre les niveaux d'alimentation hydrique et de nutrition azotée. *Agronomie*, 7 :381-389.

Lemaire G., Durand J.L., Lila M. (1989). Effet de la sécheresse sur la digestibilité in vitro, la teneur en ADF et la teneur en azote de la luzerne. *Agronomie*, 9 :841-848.

Marion R., Humbert M., Mourier C., Pflimlin A. (1977). Des conséquences de la sécheresse de 1976 sur l'alimentation des ruminants. *Bulletin Technique d'Information*, 324-325.

Mitchell R.J., M.H.D. Auld, M.G. Le Duc, and R.H. Marrs (2000). Ecosystem stability and resilience: a review of their relevance for the conservation management of lowland heaths. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics,* 3/2:142-160.

Moore A.D., Donnelly J.R., Freer M., (1997). GRAZPLAN: Decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS. *Agricultural Systems*, 55, 4, 535-582.

Petit M., Agabriel J., (1993). Etat corporel des vaches charolaises : signification, utilisation, reproduction. *INRA Production Animales*, 6, 311-318.

Peyraud J.L., (2003). Sécheresse 2003 : conséquences sur les performances des vaches laitières. Dossier sécheresse, Unité de Recherche sur les Herbivores, INRA. 4p.

Pfimlin A. (1997). *Sécheresse : gérer les risques. Méthodes et exemples de scénarios d'adaptation par grandes zones d'élevage*. Dossier spécial Institut de l'Elevage, 111 p.

Réseaux d'Elevage Auvergne et Lozère (2003). *Situation et perspectives dans les élevages suite à la sécheresse de l'été 2003*. 24 août 2003. 4 p.

Réseaux d'Elevage Charolais (2003). *Sécheresse : des pistes pour agir en fonction de sa situation*. Chambres d'Agriculture, Institut de l'Elevage. 1 juillet 2003. 10 p.

Riedo M., Grub A., Rosset M., Fuhrer J. (1998). A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy, *Ecological Modelling*, 105, 141-183.

Robelin J., Agabriel J., Malterre C., Bonemaire J. (1990). Changes in body composition of mature dry cows of holstein, Limousin and Charolais breeds during fattening. *Livestock Production Science*, 25, 199-215.

Ruget F., Delécolle R., Le Bas C., Duru M., Bonneviale N., Rabaud V., Donet I., Pérarnaud V., Paniagua S. (2001). L'estimation régionale des productions fourragères. Colloque Ager-Mia, 31 août 2000, in : *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision,* ed. Cirad-INRA, Montpellier, Collection Repères, Malézieux, Trébuil, Jaeger ed., 263-282.

Ruget F., Novak S., Granger S., (2006). Adaptation du modèle STICS à la prairie. Valorisation dans le dispositif ISOP pour l'estimation des productions fourragères. *Fourrages*, 186, 241-256

Schapendonk A.C.H.M., Stol W., van Kraalingen D.W.G., Bouman B.A.M. (1998). LINGRA, a source/sink model to simulate grassland productivity in Europe. *European Journal of Agronomy*, 9, 87-100.

Stampfli A., M. Zeiter (2004). Plant regeneration directs changes in grassland composition after extreme drought: a 13-years study in southern Switzerland. *Journal of Ecology*, 92:568-576.

Teague W.R., S.L. Dowhower (2001). Do life history traits predict responses to defoliation in co-occurring prairie grasses ? *Applied Vegetation Science* 4:267-276.

Van Peer L., I. Nijs, D. Reheul, and B. Cauwer de (2005). Species richness and susceptibility to heat and drought extremes in synthesized grassland ecosystems: compositional *vs* physiological effects. *Functional Ecology* 18:769-778.

Veysset P., Lherm M., Bebin D., (2005). Evolutions, dispersions et determinants du revenue en élevage bovin allaitant charolais. *INRA Productions Animales,* 18, 265-275.

Westoby M., Walker B., Noy-Meir I. (1989). Opportunistic management for rangelands not at equilibrium. *Journal of Range Management,* 42, 266-274.

Wight J.R., Skiles J.W. (1987). In : Wight J.R., Skiles J.W., Eds. SPUR : Simulation of production and utilization of rangelands. Documentation and User Guide (ARS 63). US Department of Agriculture, Agricultural Research Service. USDA, Fort Collins, CO.

1.1.5. Impacts des modes d'occupation des sols par l'agriculture sur la recharge des aquifères et la gestion des ressources en eau

Gilles Lemaire (INRA Lusignan) ; Nadine Brisson, Frédéric Huard et Anne-Isabelle Graux (INRA Avignon) ; Christine Lebas (INRA Orléans)

1.1.5.1. Problématique territoriale de la gestion des ressources en eau

A l'échelle territoriale, l'agriculture détermine fortement la nature de la couverture végétale des sols aussi bien spatialement (types d'assolements) que temporellement (rotations) en déterminant la proportion et la fréquence de sols nus par rapport aux sols couverts par une végétation. Ainsi on peut distinguer les surfaces toujours végétalisées que sont les forêts, prairies permanentes, landes, parcours, garrigues, etc. des surfaces cultivées qui selon les systèmes de culture pratiqués présentent une proportion de sols nus plus ou moins importante aux différentes périodes de l'année. Ainsi même en dehors de tout prélèvement pour l'irrigation, l'agriculture en modifiant localement le taux de couverture végétal des sols participe directement aux bilans hydrologiques locaux ou régionaux et a donc un impact sur le renouvellement des ressources hydriques qui peuvent être disponibles pour l'ensemble des activités humaines. Il convient donc, avant d'étudier les problèmes posés par les prélèvements d'eau par l'agriculture pour l'irrigation des cultures, de déterminer l'impact de l'activité agricole dans son ensemble sur la constitution des ressources en eau.

En effet, comme nous l'avons vu précédemment, le bilan hydrique au niveau local peut s'écrire selon la formule suivante :

$$P+I = ETR + \Delta S + D + R$$

avec P = pluies, I = irrigation, ETR = évapotranspiration réelle, D = drainage et ΔS = variation de stock d'eau du sol. En négligeant en première approximation le terme ruissellement R qui dépend très fortement de conditions topographiques locales, on obtient :

$$P+I = ETR + \Delta S + D$$

On peut admettre qu'à l'échelle annuelle et en moyenne le terme ΔS s'annule. Il est alors possible d'estimer la quantité d'eau qui peut alimenter chaque année les aquifères :

$$D-I = P-ETR$$

La réalimentation des nappes dépend donc du terme Drainage. Celui-ci est amputé du prélèvement par l'irrigation lorsque ces prélèvements sont réalisés au niveau de la ressource locale (cas de la nappe de Beauce et du Poitou-Charentes). Cependant il existe des situations où les prélèvements d'irrigation peuvent provenir de ressources exogènes (cas du canal de Provence, du Bas-Rhône, de la Neste…) où le terme Irrigation ne doit pas être retranché du Drainage local. Quoiqu'il en soit, à l'échelle d'un territoire, le terme D-I (ou D) dépend tout naturellement de la pluviométrie locale et de l'évapotranspiration moyenne de l'ensemble des surfaces agricoles et non agricoles. Or ce terme ETR dépend (i) du degré de couverture du sol par la végétation aux différentes saisons, et notamment en été pendant la période de plus forte demande climatique, (ii) de la réserve hydrique du sol (réserve utile), et (iii) de la profondeur d'enracinement de la végétation qui dépend des espèces végétales et de la nature même du sol. Sachant que l'évaporation directe du sol est rapidement ralentie par le dessèchement des premiers centimètres qui constituent alors un écran (effet mulch), l'agriculture en limitant plus ou moins le taux de couverture du sol par la végétation contribue à limiter le terme ETR à l'échelle locale, donc à augmenter le terme D-I. Cette contribution de l'agriculture peut s'estimer par rapport à ce que serait le terme ETR si toutes les surfaces restaient en permanence végétalisées (prairies, forêts...). De plus cette contribution peut être très différentes selon les systèmes de culture mis en place : proportion de sols nus pendant la période estivale, proportion de couverts pérennes (prairies, luzernes…). Enfin la localisation spatiale des systèmes de culture en fonction de la distribution spatiale des sols au niveau local revêt une grande importance, compte tenu de l'interaction entre types de sol et systèmes de culture sur le terme ETR.

Ainsi la contribution de l'agriculture à la gestion des ressources en eau doit être abordée à l'échelle locale voire régionale. Cependant ces études, du fait de leur caractère spatialisé et de la complexité des interactions entre les propriétés hydrodynamiques des sols, la variation interannuelle et spatiale du climat, et la végétation, sont peu accessibles à l'expérimentation directe. En effet, les combinaisons entre facteurs spatiaux et temporels sont quasi infinies et toute expérimentation menée localement sur un petit nombre de situations sol-climat-système de culture reste très difficilement extrapolable à une échelle territoriale. L'expérimentation directe a cependant permis d'analyser l'effet des différents facteurs affectant les composantes du terme ETR : (i) évaporation du sol nu en fonction des propriétés intrinsèques du sol (Brisson et Perrier, 1992) ; (ii) transpiration de la végétation en fonction du développement de ses surfaces foliaires (Brisson et al., 1992 ; Brisson, 1998) ; (iii) dynamique de prospection du sol par les racines et potentialités d'extraction de l'eau du sol par les différentes cultures ; (iv) régulation stomatique des plantes et ajustement de leur transpiration en fonction de l'adéquation entre l'offre et la demande en eau (Brisson et al., 1998) ; (v) rétroactions entre l'évapotranspiration et les températures de surface qui déterminent la vitesse de développement des couverts végétaux.

L'ensemble de ces travaux de recherches a permis de formaliser les processus physiques et biologiques qui sont à la base de la dynamique de l'eau dans les sols, de son évaporation directe par le sol nu et de sa transpiration par les couverts végétaux selon leur stade de croissance. Il est donc possible à l'heure actuelle de proposer des simulations réalistes du terme ETR et donc du bilan D-I dans un certain nombre de situations, afin d'étudier les conséquences de modifications des modes d'occupation des sols par l'agriculture sur les ressources en eau à l'échelle régionale ou locale. Pour cela il était nécessaire :

(i) de concevoir un modèle mathématique et informatique permettant de simuler les processus physiques et biologiques qui déterminent l'ETR dans des conditions de sol et de climat donnés et pour différents systèmes de culture ;
(ii) de calibrer et valider ce modèle à partir de jeux de données expérimentales obtenues dans des conditions données ;
(iii) de spatialiser sur un territoire donné les variables d'entrée nécessaires au fonctionnement du modèle : types de sols, climat, systèmes de culture, végétation naturelle… sur des surfaces élémentaires dites "homogènes" ;
(iv) de simuler le bilan hydrique D-I sur chacune des surfaces "homogènes" ainsi définies.

Et pour arriver à réaliser des études spatialisées à l'échelle territoriale, il serait nécessaire :

(v) de simuler l'effet de la variabilité climatique inter-annuelle en introduisant des séries climatiques réelles passées ou en introduisant un forçage représentant l'évolution prévisible du climat en fonction du changement global en cours ;
(vi) de spatialiser les sorties du modèle sous forme d'analyses fréquentielles et d'en calculer une intégration locale ou régionale donnant accès à une estimation de la ressource hydrique potentiellement disponible à l'échelle du territoire considéré.

Cette estimation de la ressource disponible n'est qu'une estimation potentielle. En effet, il faudrait être certain que toute l'eau drainée à l'échelle d'un territoire reste bien stockée et donc disponible à l'échelle de ce territoire. Il convient donc de coupler à cette approche des études hydrogéologiques qui seules permettent de savoir quelle part du bilan D-I peut rester disponible pour des usages anthropiques. Il n'en reste pas moins vrai que, à situation hydro-géologique donnée, la connaissance du bilan D-I à l'échelle locale reste un préalable indispensable à toute gestion raisonnée des ressources en eau sur ce même territoire.

1.1.5.2. Des tentatives de simulation de l'Infiltration Efficace

Le terme drainage (D) est souvent appelé Infiltration Efficace (IE) en ce sens qu'il représente la quantité des eaux de pluies qui s'infiltrent dans le sol et qui échappent à la reprise par l'évaporation du sol et la transpiration des plantes. Le problème de la simulation de IE (ou D) est donc celui de la

modélisation suffisamment réaliste de ETR, puisque le terme P est accessible à la mesure grâce au réseau météorologique même si les valeurs locales doivent être extrapolées. Diverses études ont été menées à l'échelle régionale en utilisant des modèles de calcul de l'ETR plus ou moins sophistiqués et en callant ces modèles sur des données de bilans hydriques mesurés *in situ*. Nous relaterons deux de ces études réalisées en France. Nous en montrerons les limites et les insuffisances. Puis nous relaterons un exemple de ce qu'il serait possible de réaliser à partir de modèles plus élaborés de l'estimation de l'ETR. Ce dernier exemple n'étant pas encore publié dans la littérature scientifique il n'aura qu'un statut probatoire et ses résultats ne sont présentés dans le cadre de cette expertise que pour illustrer l'intérêt qu'il y aurait à réaliser ce type d'études.

1.1.5.2.1. Etude de l'alimentation naturelle de la nappe de Beauce. Elaboration d'un modèle de calcul de l'infiltration efficace *(Nathalie Schnebellen, INRA Orléans)*

Cette étude a été menée dans le cadre d'une convention entre les Agences de l'Eau Loire-Bretagne et Seine-Normandie et l'INRA d'Orléans. Le travail concernait l'alimentation naturelle de la nappe de Beauce et l'étude du terme d'infiltration efficace. Il présente une approche méthodologique qui a permis l'élaboration d'un modèle de calcul de recharge de la nappe, prenant en compte la diversité des sols, des systèmes de culture et du climat. Dans un premier temps, le modèle a été conçu et testé au niveau stationnel par comparaison avec des mesures, puis de façon temporelle et spatiale au niveau de quatre cantons en Beauce, Petite Beauce et Gâtinais. La démarche a permis de mieux comprendre l'influence des pratiques culturales.

La quantification de l'alimentation naturelle de la nappe de Beauce avait fait déjà l'objet de travaux antérieurs. Un calcul des pluies efficaces avait été proposé (DIREN, 1995) en utilisant le modèle Agronoé de Météo-France, en faisant les hypothèses suivantes : (i) une réserve en eau des sols uniforme de 100 mm, (ii) un épuisement systématique de cette réserve au 1er septembre, et (iii) une couverture végétale permanente du sol de type prairie. Une étude du BRGM (1998) a repris les deux premières hypothèses mais en tenant compte des différents modes d'occupation du sol par les cultures par l'intermédiaire de coefficients culturaux. Ces méthodes ne sont pas totalement satisfaisantes en raison de l'importante variabilité spatiale des capacités de stockage en eau des sols et de la non prise en compte de différents facteurs qui déterminent la quantité d'eau présente dans les sols au 1er septembre lors de l'initialisation du modèle. Divers travaux (Bruand et al ; 1997 ; Chéry, 1995 ; Vautier et al., 1998) ont montré que l'état hydrique des sols en début d'automne est très variable, et fonction des types de cultures précédentes et des pratiques culturales associées (irrigation notamment).

Le modèle adopté dans cette étude est un bilan hydrique de type "réservoir", modèle déterministe basé sur une explicitation des phénomènes observés par des lois physiques simples. Il existe plusieurs façons de représenter le modèle "réservoir", notamment selon le nombre de réservoirs qui constituent le sol. Dans cette étude, deux modèles ont été testés en parallèle. Un premier modèle où le sol est constitué d'un seul réservoir constitué par la totalité du volume de sol au sein duquel toute l'eau constituant la réserve utile (RU) est disponible pour satisfaire la demandes évapo-transpiratoire de l'atmosphère. Un second modèle où l'eau du sol est répartie en deux réservoirs. Un premier réservoir est constitué par l'eau contenue dans les premiers centimètres du sol qui, lorsqu'ils sont desséchés, empêchent l'évaporation directe par le sol de l'eau contenue dans les horizons plus profonds (effet mulch). Cette distinction entre les deux modèle est essentielle car si le premier a l'avantage de la simplicité, il ne permet pas de prendre en compte de manière satisfaisante l'effet du mode d'occupation du sol sur le terme ETR, alors que le second modèle permet de bien reproduire l'effet mulch qui conduit à une réduction de l'ETR en fonction de la proportion de sol nu dans les surfaces agricoles. L'estimation de l'ETR maximum ou ETM des différentes cultures a été réalisée à partir des estimations climatiques de l'ETP Pennman pondérée par un coefficient cultural Kc qui tient compte (i) de la culture en place et (ii) de son stade de développement. Ainsi :

$$ETM = Kc\ ETP\ Penmann$$

L'utilisation des coefficients culturaux représente une approximation de la réalité. Selon Robelin (1984) : "il s'agit de cotes mal taillées par suite, d'une part de l'approximation inhérente à la formule,

d'autre part de la variabilité de l'évapotranspiration maximale pour une même espèce cultivée selon le contexte cultural". Cependant leur utilisation est pratique et fréquente pour des calculs de bilans hydriques simplifiés. Ces coefficients Kc ont été estimés expérimentalement par différentes études pour la plupart des cultures en fonction des stades de développement. Ils ont été fournis dans ce cas précis par la Chambre d'Agriculture d'Eure et Loir (sources Ailliot et Bouthier, 1993 ; plaquette IRRIGUER MIEUX, 1995 ; données CETIOM pour colza et tournesol). La prise en compte des surfaces boisées (conifères ou feuillus) a été réalisée en utilisant les coefficients publiés par Granier, (1996) et Granier et al. (1999) : 0,5 en automne-hiver et 1,2 en printemps-automne pour les feuillus, et 1,0 en automne-hiver et 1,2 en printemps-été pour les résineux. Pour les sols nus, ce coefficient est en moyenne de 0,5 du fait de l'effet mulch. Pour les différentes cultures, la valeur de Kc évolue de 0,5 en début de cycle après le semis jusqu'à 1,1-1,2 au maximum d'indice foliaire de la culture pour redescendre à des valeurs de 0,5 lors de la maturation de la plante. On peut voir, selon ces chiffres, que les couverts forestiers, qui sont totalement couvrants au printemps et en été, saison de plus forte évapotranspiration, consomment plus d'eau que les systèmes cultivés qui laissent une proportion de sols nus plus ou moins importante à ces mêmes saisons et qui baissent nettement leur consommation dans les phases de maturation. Pour les prairies, la valeur de Kc est constante et égale à 1 par définition, le calcul de l'ETP Penman ayant été calé sur l'évapotranspiration maximale d'un couvert de fétuque élevée.

La prise en compte du stress hydrique de la plante dans la réduction de l'évapotranspiration du couvert végétal est réalisée par l'introduction d'un deuxième coefficient dit de "stress" Ks permettant d'accéder à l'évapotranspiration réelle :

$$ETR = KsETM$$
$$ETR = Ks\ Kc\ ETP\ Penmann$$

La valeur de Ks est maintenue égale à 1 tant que la réserve hydrique du sol est maintenue égale à au moins 1/3 de la réserve utile, soit RDU = 1/3 RU (RDU = réserve en eau du sol difficilement utilisable). En dessous de ce niveau de réserve, Ks diminue linéairement avec le niveau de la réserve en eau du sol Ri selon la formule :

$$Ks = Ri/RDU$$

Les modèles ainsi construits ont été calés et validés sur quatre sites expérimentaux dans lesquels des mesures de profils hydriques ou/et des cases lysimétriques étaient disponibles. Ces validations confirment la meilleure adéquation du modèle à 2 réservoirs qui limite l'évaporation du sol nu. Cependant, l'existence d'une barrière totale à l'évaporation de l'eau du sol lorsque celui-ci s'est desséché sur 5 cm est apparue trop abrupte. Un effet tampon plus progressif a été ajouté dans le modèle afin de reproduire plus fidèlement la dynamique de dessèchement du sol nu.

En conclusion, cette étude de l'alimentation naturelle de la nappe de Beauce a permis d'élaborer, à l'échelle stationnelle, un modèle simplifié de calcul de l'infiltration efficace. Ce modèle a été calibré et validé à partir de suivis de parcelles expérimentales et de cases lysimétriques. Les options retenues ont été l'utilisation d'un modèle à pas de temps journalier avec double réservoir en eau du sol permettant de prendre en compte l'effet "mulch". Les données d'entrée de ce modèle sont les pluies, l'ETP Penman et l'état hydrique du sol initial en début de simulation. La validation montre qu'un tel modèle ainsi élaboré au niveau stationnel prévoit les quantités d'eau drainées à + ou – 8,5% en comparaison avec les quantités mesurées à la base des cases lysimétriques. Le modèle a ensuite été spatialisé sur quatre cantons sur une période de 20 à 28 ans. Pour cela les modes d'occupation des sols ont été reconstitués dans le temps ainsi que les principales rotations culturales. La simulation a pris ainsi en compte pour chacun des cantons, une station météorologique représentative, tous les types de sols et 32 combinaisons culture-précédent au prorata de leurs surfaces respectives. Ces simulations font apparaître une très forte variabilité inter-annuelle avec une succession de cycles d'années dites "sèches" et "humides", et une variabilité spatiale importante due à un gradient climatique.

Le modèle simplifié utilisé comporte deux limitations. La première est que l'utilisation des coefficients culturaux empiriques Kc pour estimer l'ETR des cultures reste trop approximative. D'une part du fait que la littérature donne des valeurs assez différentes à ces coefficients pour une même

culture, et d'autre part parce que l'évolution des valeurs de Kc au cours du développement de la culture n'est pas décrit de manière suffisamment réaliste. La seconde limitation est que le modèle en l'état actuel doit être réinitialisé chaque année en re-estimant la quantité d'eau stockée dans le sol, un enchaînement des simulations d'une année sur l'autre conduisant à des dérives assez vite irréalistes.

Malgré ses imperfections et ses limites, cette étude a permis de dégager certaines conclusions sur l'effet des modes d'occupation des sols par l'agriculture sur la réalimentation d'une nappe à l'échelle d'un territoire :

(i) les surfaces soumises à des systèmes de cultures annuelles permettent une infiltration efficace en moyenne plus élevée que les surfaces qui sont en permanence couvertes par la végétation : prairies, forêt. La mise en culture, par le fait qu'elle maintient des sols nus en plus ou moins grande proportion notamment au printemps et en été, contribue à limiter les pertes en eau par évapotranspiration et à augmenter ainsi la reconstitution de la nappe ;

(ii) cet effet des systèmes de culture est d'autant plus important que l'on a un assolement qui est essentiellement constitué de culture d'hiver (céréales, colza…) laissant le sol nu pendant la période estivale ;

(iii) l'irrigation, si elle prélève des quantités importante d'eau dans la nappe laisse en moyenne des sols ayant un stock d'eau plus important en fin d'été, ce qui se traduit par une hauteur d'eau drainée plus importante. Mais cet effet est bien entendu très inférieur aux prélèvements correspondants.

Ainsi cette étude a permis de montrer que le choix des systèmes de culture et leur répartition spatiale à l'échelle d'un territoire en fonction des types de sols pouvait constituer une marge de manœuvre tout à fait réelle pour la gestion collective d'une ressource hydrique du type nappe.

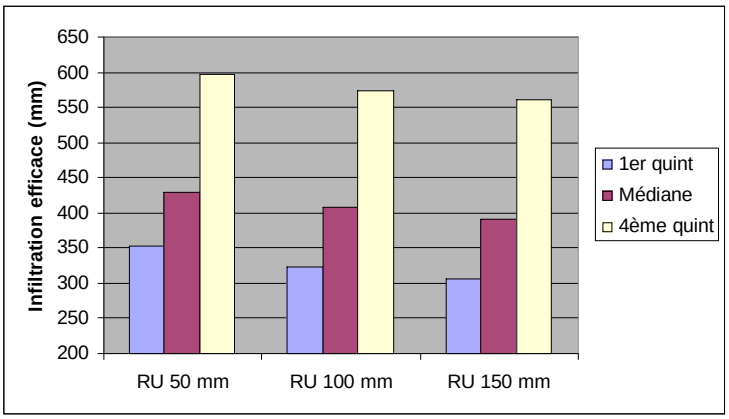
1.1.5.2.2. L'infiltration efficace en Poitou-Charentes : influence du climat, de l'occupation du sol et de la réserve utile des sols. Etude par simulation *(Frédéric Levrault, AGRO-TRANSFERT Poitou-Charentes, 2002)*

En région Poitou-Charentes, malgré les efforts faits sur l'irrigation (gestion volumétrique) et les pratiques agricoles en lien avec la qualité de l'eau (fertilisation, protection phytosanitaire, cultures intermédiaires), les enjeux de la gestion quantitative et qualitative de l'eau restent très présents. Dans ce contexte, l'impact de l'activité agricole sur les mouvements d'eau vers les aquifères (infiltration efficace) est important à étudier. En particulier, l'influence du type de sol, du climat (variation spatiale et temporelle) et de l'occupation du sol par les systèmes de culture doit être mieux comprise dans la gamme de situations rencontrées dans la région. Agro-Transfert Poitou-Charentes a donc entrepris une étude visant à mettre en évidence la variation de l'infiltration efficace engendrée par des combinaisons différentes de types de sols et de modes d'occupation des sols soumises à la variabilité climatique locale.

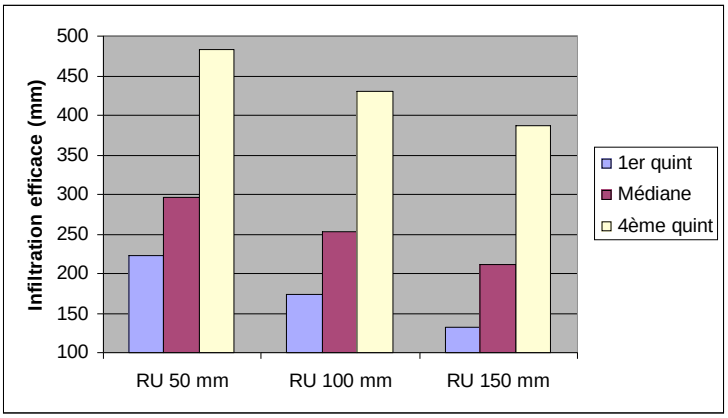
Cette étude s'est appuyée sur la méthodologie développée dans l'étude sur la nappe de Beauce (voir ci-dessus). Elle a permis de croiser ; (i) trois zones climatiques contrastées de la région du point de vue pluviométrique : Loudun, Ruffec et Saintes ; (ii) trois types de sols caractérisés par leur réserve utile : 150, 100 et 50 mm, et (iii) trois modes d'occupation du sol permettant de maximiser l'effet sur le bilan hydrique : sol nu en permanence, prairie permanente, rotation maïs blé conduite sans irrigation. Chaque année climatique, les simulations ont été initialisées le 1er août en appliquant pour chaque mode d'occupation du sol la médiane interannuelle de remplissage de la réserve utile du sol, à savoir 85% pour le sol nu, 15% pour la prairie, et 25% pour la rotation blé-maïs. La simulation de l'infiltration efficace était alors effectuée annuellement du 1er août au 31 mai.

Un des résultats les plus intéressants obtenus dans cette étude, en dehors de l'effet attendu climat et type de sol, est l'ampleur de l'effet des modes d'occupation des sols sur l'infiltration efficace. Les figures ci-dessous montrent que, pour le climat de Ruffec recevant environ 800 mm de pluies par an, un sol nu restitue environ 400 mm à la nappe, une rotation maïs blé en restitue environ 350 mm tandis qu'un couvert végétal permanent en restitue seulement 250 mm. Ce résultat confirmé sur les deux autres sites montre que l'occupation des terres par l'agriculture par des systèmes de culture annuels,

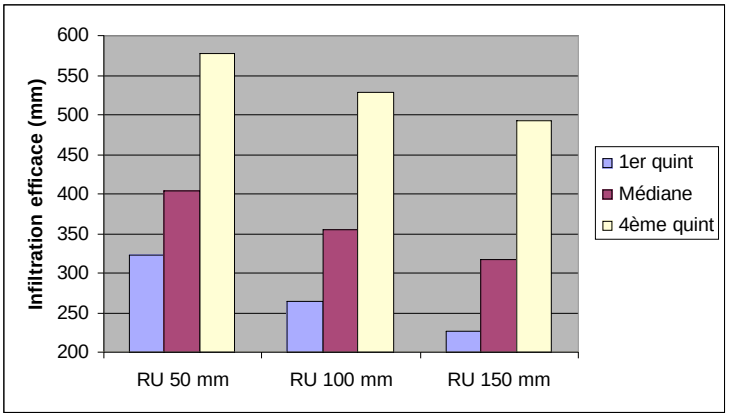
par rapport à une couverture végétale permanente du sol que représente une prairie, contribue à fournir à la nappe environ 100 mm d'eau supplémentaire et seulement 50 mm de moins que le maximum possible qui est représenté par le sol nu en permanence. L'effet mode d'occupation des sols est plus important que l'effet type de sol.



(a) Sol nu



(b) Blé-Maïs



(c) Prairie

Figure 1. Simulation de l'infiltration efficace cumulée du 1er août au 31 mai pour trois types de sol sous climat de Ruffec (Charentes) – Années 1971-2000.

La différence entre surfaces cultivées (blé-maïs) et surfaces végétalisées en permanence pourrait être encore être amplifiée (i) d'une part si on comptabilisait les forêts qui ont un coefficient Kc de 1,2 comparé à celui des prairies de 1 (ce qui indiquent qu'elles consomment potentiellement 20% de plus

d'eau) et qui ont un enracinement plus profond leur permettant d'avoir accès à des stocks d'eau du sol plus importants, et (ii) d'autre part si l'on considérait des systèmes de culture à base de cultures d'hiver ayant une moindre couverture du sol en été.

1.1.5.3. L'utilisation des systèmes de fonctionnement de culture

Les termes du bilan de l'eau ETR et Drainage peuvent être directement simulés à partir des modèles de développement de culture. Par rapport à l'approche empirique présentée ci-dessus, cette approche plus mécaniste a l'immense avantage de prendre en compte les rétroactions existantes entre le niveau d'épuisement de la réserve hydrique du sol par les plantes et la réduction de leur consommation d'eau, c'est-à-dire la régulation stomatique et la croissance foliaire. De plus, les rétroactions entre la diminution de la transpiration des plantes et leur température peuvent aussi être prises en compte, ce qui a pour effet de raccourcir les durées de cycle des cultures. Ces modèles, une fois calés et validés, permettent de simuler le comportement de différentes espèces cultivées dans des scénarios de sol et de climat différents en fonction d'itinéraire techniques déterminés. Au-delà de leur utilisation pour simuler le rendement des cultures en fonction des contraintes du milieu, ces modèles permettent également de simuler les différents termes du bilan hydrique d'une culture. Appliqués sur une portion d'espace traitée de manière homogène au niveau agricole (système de culture), ils permettent de simuler ces bilans hydriques sur de longues périodes, les variables de sorties de l'année N devenant les variables initiales de l'année N+1. La représentation spatiale des différents systèmes de culture à l'échelle d'un territoire permet par agrégation d'envisager de réaliser des études sur l'effet des systèmes et de leur répartition spatiale sur les bilans d'eau à l'échelles d'aquifères de taille plus ou moins vaste, et d'envisager ces outils comme aide à la gestion collective des ressources en eau au niveau local. En effet, comme cela a été souligné ci-dessus, la principale limitation de ces études tenait à l'estimation assez frustre des coefficients culturaux Kc permettant d'estimer l'évapotranspiration maximale d'une culture en fonction du calcul de l'ETP. Les modèles de fonctionnement de cultures qui sont aujourd'hui disponibles permettent de simuler de manière plus fine l'évolution du terme ETR des cultures, grâce notamment à une simulation plus réaliste du développement des surfaces foliaires des plantes qui détermine le partage entre l'évaporation du sol et la transpiration des plantes (Brisson et al., 1992 ; Brisson et al., 1998). Il nous a paru alors important d'illustrer les possibilités offertes par ces outils de simulation en explorant de manière assez large les différents facteurs qui concourent à faire varier localement le bilan entre la quantité d'eau qui retourne vers les nappes et les prélèvements pour l'irrigation, afin d'analyser la marge de variation qui est imputable à l'agriculture dans différentes conditions pédo-climatiques.

1.1.5.3.1. Le modèle de fonctionnement de culture

Les modèles de culture sont des outils mathématiques et informatiques qui simulent le fonctionnement dynamique d'une culture (système sol-plantes) en interaction avec le climat et les pratiques agricoles. Ils sont nés au début des années 70 à partir des travaux fondateurs des écoles hollandaise (de Wit, 1970) et américaine (Baker et Meyer, 1966 ; Duncan, 1971). Le modèle français STICS, développé à l'INRA depuis 1996 en collaboration avec des partenaires scientifiques et techniques, s'appuie sur des principes largement admis dans la communauté (Brisson et al., 1998, 2003). Il incarne les préoccupations environnementales de l'agronomie par une approche générique permettant de simuler de nombreuses espèces cultivées prenant en compte l'effet des pratiques agricoles.

STICS réalise des simulations à l'échelle des rotations en continu sur une série climatique, faisant se succéder des phases de culture et d'interculture. La dynamique est journalière, imposée par le pas de temps climatique, le climat constituant avec le sol et l'itinéraire technique l'ensemble des données d'entrée du modèle. Les données de sorties sont agronomiques (date de récolte, rendement, qualité, consommation d'eau et d'azote) ou environnementales (infiltration profonde, lixiviation de nitrates, température de la surface). STICS simule le fonctionnement carboné (croissance des plantes et élaboration du rendement), énergétique (interception du rayonnement solaire, températures du couvert et du sol), hydrique (évaporation du sol, transpiration des plantes, drainage) et azoté (minéralisation de

la matière organique, transport des nitrates, fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses) de l'agrosystème.

Il existe des interactions fortes entre le fonctionnement hydrique et les autres composantes : l'état de croissance de la plante définit ses besoins en eau mais rétroactivement l'insatisfaction de ces besoins pénalise la croissance de la plante ; en réduisant l'évapotranspiration, le déficit en eau augmente la température de la surface par le biais du bilan d'énergie ; en s'infiltrant l'eau entraîne avec elle les nitrates tandis qu'en situation de pénurie ces nitrates ne sont plus véhiculés jusqu'aux racines provoquant ainsi un déficit azoté pour la plante (stress azoté induit par le déficit hydrique) ; enfin dans un sol sec les processus de minéralisation sont considérablement ralentis.

Le modèle fait un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ainsi les remontées capillaires qui pourraient provenir du compartiment de sol sous-racinaire sont négligées, la parcelle est supposée plane de façon à pouvoir négliger les phénomènes de ruissellement de surface et parfaitement contrôlée au plan phytosanitaire. En particulier l'impact du régime hydrique sur les dynamiques d'infestation de maladies ou d'adventices n'est pas pris en compte.

STICS a été adapté à des cultures variées (Figure 2). La stratégie spécifique d'une culture vis-à-vis de son économie en eau repose sur divers éléments du fonctionnement et de la morphologie de la plante renseignés par un paramétrage approprié aux niveaux de son développement phénologique, des dynamiques respectives de son feuillage et de son système racinaire, de la fermeture stomatique et de sa réactivité aux stress.

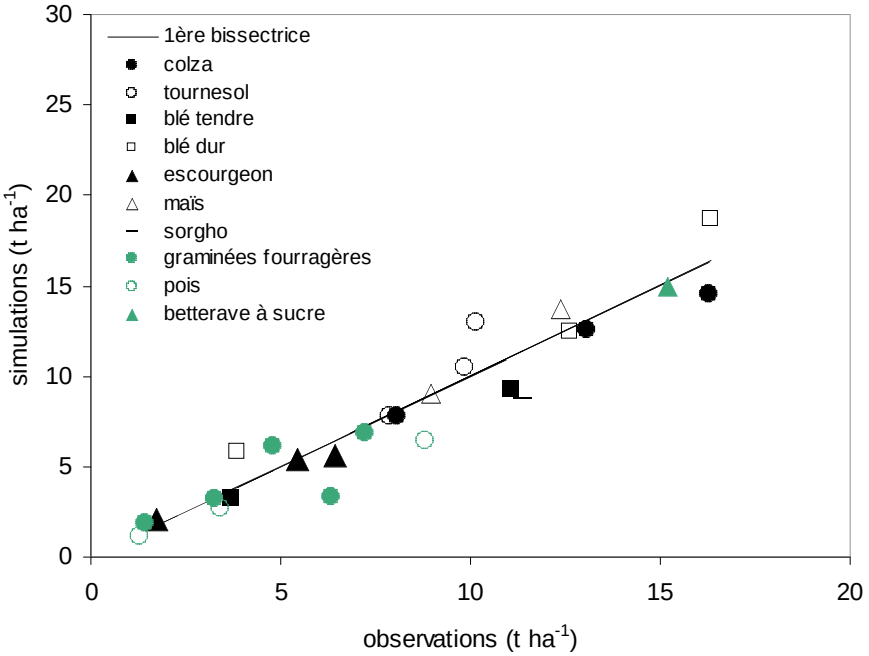


Figure 2. Comparaison entre mesures et simulations par STICS de la biomasse accumulée par des cultures très diversifiées

Les variables calculées utilisées dans cette étude sont essentiellement les variables du bilan hydrique : transpiration du couvert végétal, évaporation du sol (cumulée dans la variable évapotranspiration), infiltration profonde et ruissellement par débordement (qui se produit dans le cas de sols à très faible infiltrabilité). Sont également analysées les variables microclimatiques liées au bilan hydrique : température de surface et humidité des couverts, ainsi que les variables d'intérêt agricole (rendement) et environnemental (lixiviation des nitrates). Infiltration profonde (ou drainage) et ruissellement par débordement seront cumulés car ces deux entités représentent une estimation de la contribution à la recharge des nappes.

1.1.5.3.2. Analyse de l'effet des modes d'occupation des sols sur les bilans hydriques. Approche par modélisation mécaniste *(Rapport INRA pour le MAP, N. Brisson et al., 2006)*

Cette analyse a été entreprise afin de montrer comment l'état actuel des connaissances en matière de modélisation pouvait permettre de conduire à des études plus complètes et plus exhaustives que les études présentées ci-dessus.

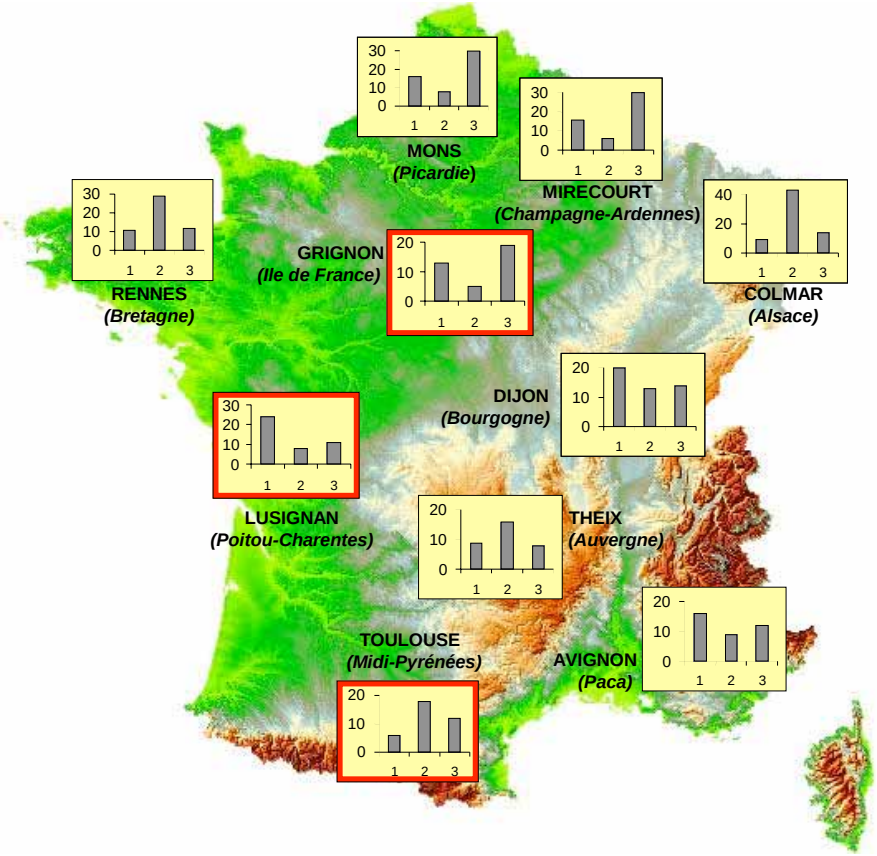


Figure 3. Carte des régions sélectionnées (chacune étant représentée par une station climatique) et choix des sols par gamme de réserve utile (1 : 40 à 100mm, 2 : 100 à 160 mm, 3 : >160 mm) et représentativité dans la région en %. Les régions encerclées de rouge ont été choisies pour l'étude agricole

1.1.5.3.2.1. Choix des contextes pédoclimatiques

L'étude repose sur une sélection de milieux pédoclimatiques permettant d'appréhender la variabilité des configurations de sécheresse d'origine climatique et/ou édaphique à l'échelle du territoire français. Cette sélection a été opérée au niveau régional, échelle assurant le meilleur compromis entre les décisions relatives à l'eau et le découpage naturel du territoire français. Ainsi 10 régions ont été choisies, chacune étant caractérisée par une station climatique pourvue d'une série de 25 ans de données au minimum et de trois types de sol.

Les climats choisis représentent les tendances océanique (Rennes, Lusignan, Grignon, Mons), continentale (Colmar, Dijon, Mirecourt), montagnarde (Theix à 800 m d'altitude) et méditerranéenne (Avignon, Toulouse) de l'hexagone, combinées du nord au sud avec la zonation latitudinale du climat global.

Le choix des sols s'est fait à partir de la carte pédologique au 1/1 000 000e sur la base de leur réserve utile, caractérisant leur capacité de stockage l'eau, et de leur représentativité significative dans la région. Ainsi, pour chaque région, ont été retenus un sol à faible réserve utile (entre 40 et 100 mm), un sol à forte réserve utile (supérieure à 160 mm) et un sol intermédiaire (réserve utile entre 100 et 160 mm). L'hétérogénéité des régions en terme de potentiel édaphique est bien illustrée par la Figure 3 sur laquelle est, par exemple, mise en évidence l'importance des sols à faible réserve utile en Poitou-

Charentes et en région PACA, alors que la région Ile-de-France ou la Picardie sont majoritairement dotées de sols à forte capacité de rétention en eau. Cependant la réserve utile n'est pas le seul critère de qualification de potentialité agricole des sols et, selon les régions, les autres caractères permanents, en particulier ceux relatifs à leur fertilité (teneur en matière organique), peuvent modifier le classement des réponses attendues par la seule variation de la réserve utile.

Deux niveaux d'étude ont été menés. Le premier, de nature uniquement pédoclimatique, concerne l'ensemble des régions. Il vise à cerner le poids relatif des sols et des climats, dans leurs variabilités à la fois spatiale et temporelle, sur les flux d'eau infiltrés et évaporés, les périodes de crise ainsi que les conséquences attendues sur le microclimat. Sur un sous-ensemble de trois régions, sélectionnées pour l'acuité des problèmes liés à l'usage de l'eau (Ile-de-France, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes), a été introduite, de manière aussi réaliste que possible, la dimension agricole.

1.1.5.3.2.2. Les protocoles de simulation retenus

Deux types de protocoles ont été retenus, correspondant aux deux niveaux d'études mentionnés.

Le protocole "pédoclimatique" correspond à des situations de couverture du sol extrêmes :

(i) permanence de sol nu sans aucune couverture végétale correspondant à une minimisation des pertes par évapotranspiration et une maximisation de la reconstitution des nappes par le drainage ;

(ii) couvert de prairie de graminées afin d'estimer l'ampleur maximale du déstockage de l'eau du sol par une végétation permanente puisant uniquement dans les réserves "naturelles" et ses répercussions sur les volumes d'eau drainés réalimentant les hydrosystèmes. Ce mode d'occupation des sols permet de représenter le bilan hydrique des espaces non cultivés : prairies permanentes, forêts, landes… La différence avec le sol nu indique alors l'amplitude des bilans d'eau qui sont générés par les différents modes d'occupation des sols du fait de l'activité agricole ;

(iii) couvert de prairie irrigué pour couvrir la totalité des besoins en eau des plantes. Deux coupes sont effectuées, au printemps et en été et à chacune de ces coupes, la prairie est fertilisée à raison de 50 kgN/ha, ce qui correspond à une conduite raisonnée permettant de couvrir en moyenne de 70 à 85% des besoins en azote et limite les pertes par lixiviation. Ce système permet de simuler le besoin maximum d'eau d'irrigation et les conséquences de tels apports d'eau sur la quantité d'eau drainée qui retourne à la nappe.

Le protocole "agricole" a été construit avec l'aide d'experts régionaux de façon à évaluer trois systèmes de culture réalistes par région. Ces systèmes de culture sont matérialisés par des rotations au plus quadriennales. Les systèmes "A", les plus consommateurs en eau, sont à base de cultures entièrement irriguées (tableau 1). A l'opposé, les systèmes "C" sont les plus économes, avec des cultures conduites sans irrigation (appelées aussi cultures pluviales). En position intermédiaire, les systèmes "B" utilisent l'irrigation d'appoint, qui ne couvre qu'une partie des besoins en eau des plantes (évaluée à 50%). Les systèmes "B" et "C" tendent à privilégier des stratégies d'évitement en n'occupant pas le sol systématiquement pendant la période sensible de l'été. Les systèmes retenus ne sont pas forcément des systèmes très représentés dans les régions étudiées, mais ils concrétisent une stratégie agri-environnementale que l'étude souhaitait tester.

Les itinéraires techniques correspondants à ces systèmes, dont les éléments essentiels sont synthétisés dans le tableau 1, sont différents d'une région à l'autre mais identiques pour les trois types de sol. Les précédents culturaux jouent un rôle sur l'état hydrique et minéral du sol au semis et fournissent des résidus qui sont enfouis lors des opérations de travail du sol supposées conventionnelles (déchaumage, labour, façons superficielles avant semis). Les densités de semis varient peu entre régions et le fractionnement des apports d'azote repose sur la phénologie des cultures. En ce qui concerne l'irrigation (pour les systèmes A et B), les apports d'eau, en date et quantité, sont calculés en fonction du niveau de satisfaction des besoins en eau recherchée. Ainsi, pour les systèmes A, les besoins sont supposés satisfaits à 100% et donc l'irrigation est déclenchée dès que la transpiration réelle s'éloigne de la transpiration potentielle. Pour les systèmes B, l'irrigation est déclenchée plus tardivement, quand la transpiration réelle est inférieure à 50% de la transpiration potentielle.

Région	Rotation	Culture (variété)	Irrigation (satisfaction des besoins en eau)
Ile de France	**A** Maïs Blé dur Betterave Blé tendre	Maïs (DK300)	100%
		Blé dur (Lloyd)	100%
		Betteraves (Laser)	100%
		Blé tendre (Appache)	100%
	B Colza Blé tendre Escourgeon	Colza (Aviso)	-
		Blé tendre (Shango)	50%
		Escourgeon (Alaska)	-
	C Tournesol Blé tendre Pois de printemps Blé tendre	Tournesol (Albena)	-
		Blé tendre (Appache)	-
		Pois (Baccara)	-
		Blé tendre (Appache)	-
Midi Pyrénées	**A** Maïs	Maïs (Cécilia)	100%
	B Blé dur Blé dur Sorgho	Blé dur (Nefer)	50%
		Blé dur (Nefer)	50%
		Sorgho (DK18)	50%
	C Blé dur Tournesol	Blé dur (Nefer)	-
		Tournesol (Mélody)	-
Poitou Charentes	**A** Maïs	Maïs (Furio)	100%
	B Colza Blé tendre Escourgeon	Colza (Aviso)	-
		Blé tendre (Shango)	50%
		Escourgeon (Alaska)	-
	C Tournesol Blé tendre Escourgeon	Tournesol (Mélody)	-
		Blé tendre (Appache)	-
		Escourgeon (Alaska)	-

Tableau 1. Détail des rotations et techniques associées retenues pour les trois régions test.

Pour les deux protocoles, les simulations ont été réalisées en continu sur l'ensemble de la période climatique disponible de façon à tenir compte des effets cumulatifs. Si l'on exclut la monoculture de maïs, les systèmes de culture analysés s'appuient sur des rotations pluriannuelles, ce qui nécessite d'exécuter le protocole agricole 2, 3 ou 4 fois pour que les relations culture/année soient aussi exhaustives que possible et s'approcher ainsi de résultats à l'échelle de l'assolement. Une année culturale comprend une période de sol nu, précédant le semis, et une période de végétation. La proportion entre ces deux périodes est plus élevée pour les cultures d'été comme le maïs ou le tournesol que pour les cultures d'hiver comme le blé ou le colza.

1.1.5.3.2.3. Sol nu et couvert végétal permanent, deux extrêmes pour encadrer l'impact de l'agriculture sur le bilan hydrique et le microclimat

Le tableau 2 montre les valeurs simulées des termes ETR et Drainage pour les différents types de sols dans les différentes régions d'étude. Le rapport ETR/ETM indique le degré de satisfaction de la demande climatique par chacun des deux systèmes d'occupation du sol.

Région	Système	Sol	Irrigation (mm)	Drainage (mm)	ETR (mm)	ETR / ETM
Picardie	Sol nu	rendzine	0	256	347	0.55
		alluvial calcaire sableux	0	261	375	0.52
		lessivé limoneux	0	232	351	0.55
	Prairie irriguée	rendzine	249	242	630	1
		alluvial calcaire sableux	249	231	621	1
		lessivé limoneux	94	90	619	1
	Prairie sèche	rendzine	0	166	442	0.77
		alluvial calcaire sableux	0	152	457	0.78
		lessivé limoneux	0	52	566	0.94

Ile de France	Sol nu	rendzine	0	292	368	0.57
		brun calcaire	0	390	269	0.42
		limoneux lessivé	0	311	348	0.54
	Prairie irriguée	rendzine	195	271	588	1
		brun calcaire	128	261	531	1
		limoneux lessivé	87	184	568	1
	Prairie sèche	rendzine	0	199	460	0.82
		brun calcaire	0	198	461	0.88
		limoneux lessivé	0	131	531	0.95
Bretagne	Sol nu	brun acide limoneux	0	330	369	0.56
		brun limoneux	0	324	378	0.57
		Lessivé	0	339	369	0.54
	Prairie irriguée	brun acide limoneux	252	326	623	1
		brun limoneux	170	261	637	1
		Lessivé	112	200	621	1
	Prairie sèche	brun acide limoneux	0	259	455	0.78
		brun limoneux	0	196	518	0.89
		Lessivé	0	152	562	0.93
Poitou Charentes	Sol nu	fersiallitique calcaire	0	440	369	0.53
		rendzine argileuse	0	440	369	0.53
		rendzine argileuse sur craie	0	442	366	0.53
	Prairie irriguée	fersiallitique calcaire	205	405	777	1
		rendzine argileuse	159	369	766	1
		rendzine argileuse sur craie	73	289	782	1
	Prairie sèche	fersiallitique calcaire	0	331	477	0.81
		rendzine argileuse	0	299	510	0.87
		rendzine argileuse sur craie	0	238	574	0.96
Midi Pyrénées	Sol nu	brun calcaire argileux	0	291	417	0.45
		alluvial calcaire	0	274	398	0.47
		brun calcaire	0	274	417	0.47
	Prairie irriguée	brun calcaire argileux	306	223	771	1
		alluvial calcaire	265	191	766	1
		brun calcaire	218	130	752	1
	Prairie sèche	brun calcaire argileux	0	146	544	0.77
		alluvial calcaire	0	122	566	0.80
		brun calcaire	0	69	622	0.85
Champagne Ardennes	Sol nu	rendzine peu profonde	0	498	388	0.60
		alluvial calcaire sableux	0	503	383	0.59
		rendzine profonde	0	492	395	0.60
	Prairie irriguée	rendzine peu profonde	155	451	603	1
		alluvial calcaire sableux	151	439	595	1
		rendzine profonde	81	378	596	1
	Prairie sèche	rendzine peu profonde	0	387	499	0.87
		alluvial calcaire sableux	0	374	513	0.88
		rendzine profonde	0	332	555	0.95
Alsace	Sol nu	brun acide sableux	0	134	384	0.52
		brun calcaire argileux	0	127	370	0.52
		alluvial	0	116	373	0.53
	Prairie irriguée	brun acide sableux	269	134	651	1
		brun calcaire argileux	203	100	653	1
		alluvial	171	38	624	1
	Prairie sèche	brun acide sableux	0	83	455	0.75
		brun calcaire argileux	0	0	478	0.80
		alluvial	0	22	517	0.83
Bourgogne	Sol nu	brun calcaire limoneux	0	373	390	0.57
		brun argileux	0	402	357	0.52
		lessivé hydromorphe	0	333	374	0.55
	Prairie irriguée	brun calcaire limoneux	192	308	623	1
		brun argileux	188	335	603	1
		lessivé hydromorphe	82	213	600	1
	Prairie sèche	brun calcaire limoneux	0	266	503	0.85
		brun argileux	0	0	492	0.84
		lessivé hydromorphe	0	0	561	0.95
Auvergne	Sol nu	brun acide sableux	0	380	381	0.66
		andosol	0	341	399	0.64
		brun hydromorphe	0	342	397	0.66
	Prairie irriguée	brun acide sableux	187	380	579	1
		andosol	62	241	580	1
		brun hydromorphe	25	167	573	1

	Prairie sèche	brun acide sableux	0	241	470	0.96
		andosol	0	319	550	0.85
		brun hydromorphe	0	0	575	0.99
Paca	Sol nu	brun calcaire	0	337	359	0.35
		fersiallitique	0	338	357	0.35
		alluvial calcaire	0	326	368	0.36
	Prairie irriguée	brun calcaire	489	301	888	1
		fersiallitique	433	259	874	1
		alluvial calcaire	349	176	875	1
	Prairie sèche	brun calcaire	0	194	499	0.65
		fersiallitique	0	167	526	0.69
		alluvial calcaire	0	106	590	0.76

Tableau 2. Valeurs moyennes des diverses composantes du bilan d'eau par type de sol et par région, sur sol nu et couvert de prairie permanente

On note que pour un sol maintenu sans végétation toute l'année, les pertes d'eau par évaporation sont comprises entre 300 et 400 mm selon les régions. L'effet du type de sol pour un même climat à l'intérieur d'une région est assez faible, de l'ordre de 20 mm, sauf pour la région Ile-de-France où le sol brun calcaire a un comportement nettement différent des deux autres se traduisant par une réduction de près de 100 mm d'évaporation. La réduction de consommation d'eau du sol par l'effet mulch est traduite par le rapport ETR/ETM. Dans la majorité des cas cette réduction est d'un peu moins de 50%. On peut cependant noter, qu'en région PACA où les sol restent secs tout l'été car rarement humectés par les pluies, cette réduction est de 75%, tandis qu'en Auvergne et en Champagne-Ardennes, où il y a sans doute plus de pluies estivales cette réduction n'est que de 40% environ. Le drainage sous sol nu varie de environ 125 mm en Alsace à environ 500 mm en Champagne-Ardennes, avec peu d'écart au sein d'une même région en fonction du type de sol.

Les pertes d'eau par évapotranspiration par un sol couvert de végétation permanente sont bien entendu supérieures à celle du sol nu, de 420 à 590 mm environ selon les régions et les types de sols. L'effet type de sol devient prépondérant puisqu'au sein d'une région il peut engendrer une différence allant de 30 à 110 mm environ. Ainsi les différences d'ETR entre régions ne reflètent qu'imparfaitement les différences de climat. La fourniture d'eau par les pluies et les réserves du sol permettent de couvrir une proportion variable des besoins de la végétation (rapport ETR/ETM). Comme on pouvait s'y attendre, c'est dans la région PACA que la végétation souffre le plus de la sécheresse puisque selon les sols leur demande en eau n'est couverte qu'à 55 à 66% ; elle est suivie par la région Poitou-Charentes, avec une couverture des besoins de 62 à 70%.

Cette consommation supplémentaire d'eau par la végétation entraîne donc une diminution du drainage par rapport au sol nu. Les quantités moyennes d'eau drainées sont les plus faibles en Alsace (de 20 à 95 mm seulement selon les types de sols) et les plus élevées en Champagne-Ardennes (de 320 à 400 mm). Par rapport au sol nu, un couvert végétal permanent entraîne donc une diminution du terme drainage. Cette diminution du drainage est très variable : de 40 mm seulement dans les sols bruns acides en Alsace, jusqu'à 205 mm dans les sols alluviaux calcaires de PACA, la moyenne se situant autour de 120-130 mm.

On peut noter la situation très "sèche" de l'Alsace qui ne reconstitue ses réserves qu'à raison de moins de 100 mm par an, et la situation plus "confortable" de Poitou-Charentes qui a un drainage annuel moyen de l'ordre de 300 à 400 mm. Ces derniers chiffres confirment, en les précisant, les résultats de l'étude précédente (voir ci-dessus).

Dans le tableau 2 est indiquée la quantité d'eau drainée simulée sous un couvert de prairie qui serait irrigué pour que sa consommation en eau soit maximum. Ceci représente donc une situation extrême correspondant à une irrigation maximale. On s'aperçoit que dans ces conditions d'irrigation on améliore en moyenne le terme drainage de 50 mm environ en moyenne. Bien entendu, en regard de ce petit effet de l'irrigation sur le terme drainage, qui n'est en somme qu'un retour à la nappe d'une petite partie de l'eau d'irrigation, il convient de comptabiliser les hauteurs d'eau prélevées. Le tableau 3 permet d'estimer la différence entre le drainage et l'irrigation pour les différentes régions (moyenne

des trois sols). Cette différence permet d'estimer en quelque sorte le degré d'autonomie hydrologique de la région pour une irrigation maximale. La moyenne des trois types de sols est justifiée par le fait que la capacité de rétention en eau du sol agissant à la fois sur le terme Irrigation et sur le terme Drainage, elle a finalement peu d'influence sur le terme D-I.

Picardie	Ile de France	Bretagne	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées	Champagne-Ardennes	Alsace	Bourgogne	Auvergne	PACA
-9	102	84	209	-82	161	-124	131	171	-178

Tableau 3. Différences moyenne entre le drainage D et l'irrigation I (en mm) pour une prairie irriguée

On fait ainsi apparaître des régions "déficitaires" (Midi Pyrénées, Alsace, PACA) pour lesquelles une généralisation de l'irrigation conduirait à un épuisement des réserves, et des régions à bilan positif. Parmi ces dernières on voit apparaître la région Poitou-Charentes pourtant réputée pour ses contraintes en matière de ressources en eau. Cette contradiction apparente tient au fait que ce bilan ne tient pas compte de la nature hydrologique des réserves en eau. En effet, dans certaines situations, l'eau drainée ne reconstitue pas réellement une réserve mais contribue à alimenter les rivières et est donc peu disponible en terme de réserve pour les différents usages anthropiques. Ce classement entre régions est donc purement indicatif et illustratif de la variété des situations régionales et locales qui empêche toute approche normative au niveau national. Cette variété de situations doit donc être prise en compte par des études locales à l'échelle d'aquifères parfaitement délimités et caractérisés.

1.1.5.3.2.4. Impacts des systèmes de cultures sur les bilans hydrologiques

L'analyse n'a été entreprise que sur trois régions à titre d'exemple illustratif : Ile-de-France, Poitou-Charentes, Midi-Pyrénées. L'objectif de cette partie est d'approcher le comportement hydrique de véritables surfaces agricoles. Selon le nombre de cultures constituant le système, la surface est représentée par 1, 2, 3 ou 4 cultures et les synthèses annuelles présentées correspondent à une moyenne de cet ensemble.

Comme attendu, dans chacune des régions analysées, les trois systèmes de culture A, B et C correspondent à des niveaux de satisfaction de besoin en eau décroissants (Figure 4), les systèmes irrigués assurant presque 100% des besoins alors que les systèmes non irrigués les plus déficitaires assurent 85% des besoins, ce qui permet une consommation additionnelle des eaux météoriques par rapport au sol nu de l'ordre de 35% au minimum.

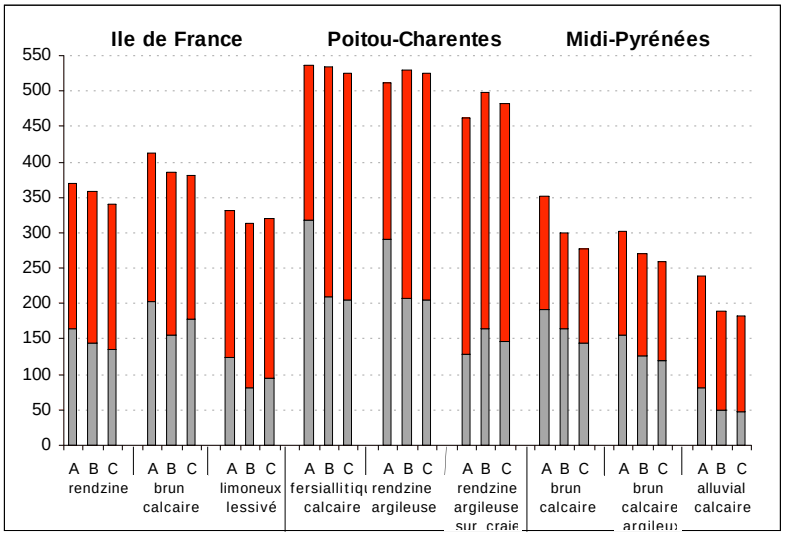


Figure 4. Variabilités interannuelles du drainage.

Les valeurs minimales atteintes 8 années sur 10 sont en gris et celle atteintes 2 années sur 10 sont en rouge.
L'ampleur de la différence entre ces deux grandeurs indique la variabilité interannuelle

Les apports d'eau d'irrigation ne sont pas dans les mêmes proportions et les systèmes B n'utilisent que de 25 à 45% de l'eau apportée aux systèmes A, alors qu'ils permettent de couvrir 95% des besoins. Par ailleurs, bien que le maïs n'occupe pas le sol en permanence, les apports d'eau d'irrigation sont semblables (parfois même supérieurs) aux apports potentiels estimés pour la prairie irriguée. Ceci s'explique par le fait que l'ETM du maïs atteint environ 1,2 fois l'ETM de la prairie pendant la période estivale.

La différence de drainage (Figure 5) entre systèmes de culture est relativement constante de l'ordre de 50 mm, avec les systèmes irrigués A en tête puis un niveau équivalent pour les systèmes B et C. Cela démontre l'efficacité hydrique de l'irrigation d'appoint pratiquée dans les systèmes B. Le tableau 4 permet de comparer les chiffres de drainage sous couvert végétal permanent issus du tableau 2 avec la moyenne du drainage annuel sous les systèmes de culture C dans chacune des trois régions.

Région	Type de sol	Prairie en sec	Système C
Ile de France	Rendzine	199	238
	Brun calcaire	198	278
	Limoneux lessivé	131	206
Poitou-Charentes	Fersialitique calcaire	331	372
	Rendzine argileuse	299	369
	Rendzine argileuse sur craie	238	322
Midi-Pyrénées	Brun calcaire argileux	146	218
	Alluvial calcaire	122	200
	Brun calcaire	60	138

Tableau 4. Comparaison du drainage pour des couvertures du sol par une prairie sans irrigation et par un système de culture de type C (non irrigue).

Ce tableau montre que par rapport à un sol constamment recouvert par une végétation, la mise en place de systèmes de culture de type C, c'est-à-dire basé sur des culture à cycle hivernal qui laissent un maximum de sol nu pendant la période estivale, conduit à une augmentation substantielle du terme de drainage de 50 à 80 mm d'eau, ce qui est loin d'être négligeable puisque cela peut représenter jusqu'à 20-25% des volumes d'eau drainés annuels moyens. Ainsi cette étude confirme que la mise en culture des surfaces agricoles contribue localement à la réalimentation des nappes et qu'à ce titre dans son ensemble l'agriculture doit être considérée non seulement comme une consommatrice d'eau mais comme un gestionnaire des ressources. Des conclusions concordantes ont été obtenues expérimentalement par Zhang et Schilling (2005) qui ont montré qu'à l'échelle d'un bassin versant la concentration de surfaces de prairie sur une partie du bassin se traduisait par un abaissement significatif du niveau de la nappe par rapport à la surface laissée en culture. Ces résultats de simulation confirment également ceux obtenus par Rodriguez-Iturbe (1999) avec une approche hydrologique qui montre qu'une végétation pérenne (prairie ou forêt) consomme globalement plus d'eau que des systèmes de culture annuels.

La Figure 5 illustre le bilan D-I pour les trois régions, les différents types des sols et les différents systèmes de culture. On note que ce bilan est largement positif en Poitou-Charentes confirmant ainsi les données du Tableau 3. Dans cette région, les systèmes de culture non irrigués de type C permettent de drainer entre 300 et 350 mm d'eau en moyenne. Mais la Figure 4 illustre la grande variabilité de cette restitution entre années. Or comme nous l'avons signalé plus haut il ne s'agit pas réellement, compte tenu du contexte hydrologique régional, à proprement parler d'une reconstitution de réserve. On voit cependant que même avec une irrigation du maïs (système A) le bilan reste largement positif. Dans ces conditions, les volumes d'eau pouvant être consacrés à l'irrigation du maïs (donc les surfaces qui peuvent être implantées en maïs irrigué) doivent être raisonnés au niveau local en fonction de la nature exacte des aquifères quant à leur possibilité de stocker une partie de cette eau drainée pour une utilisation ultérieure. Dans la région Midi-Pyrénées on obtient avec le maïs irrigué un bilan D-I qui est négatif de l'ordre de 100 mm, alors que les systèmes de type C aboutissent en moyenne à un bilan positif de 100 à 150 mm. Ainsi, si l'on raisonnait en simple bilan de masse, en supposant que toute l'eau restituée au milieu est stockée, il faudrait en moyenne 1 hectare de système de culture en sec de

type C pour fournir l'eau d'irrigation de 1 ha de système A et 1 ha de système B, si l'on raisonne bien entendu en dehors de tout autre usage de l'eau.

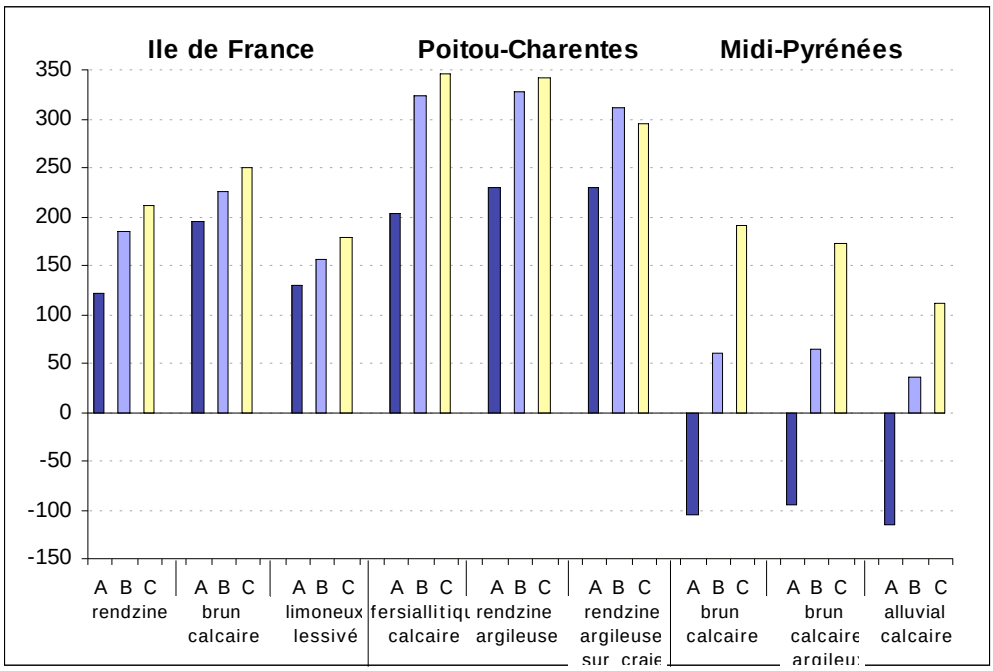


Figure 5. Différences moyennes entre l'irrigation et le drainage (en mm) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région.

Nous voyons là toute la puissance qu'une telle approche pourrait avoir à l'échelle locale afin d'analyser l'impact des systèmes de culture sur la ressource en eau en essayant de rendre compte des deux modes d'action de l'agriculture dans la gestion de la ressource en eau : (i) d'une part comme consommatrice de la ressource par ses prélèvements pour l'irrigation et (ii) d'autre part comme contribution à cette même ressource locale du fait de ses modes d'occupation des sols.

Cette contribution de l'agriculture à la reconstitution des ressources en eau au niveau des aquifères est rarement prise en compte. Le maintien de surfaces cultivées présentant une proportion de sols nus plus ou moins importante en été, par rapport à des surfaces de végétations naturelles, contribue à augmenter globalement les ressources en eau à l'échelle territoriale. A ce titre, il existe donc une sorte "d'interdépendance" de fait qui s'établit entre les surfaces agricoles non irriguées occupées par des systèmes de culture "économes" en eau et les surfaces en agriculture irriguée, les premières contribuant de fait à fournir des ressources en eau nécessaires aux deuxièmes. La gestion durable des ressources en eau à l'échelle des territoires doit prendre en compte cette interdépendance entre systèmes et non les opposer.

1.1.5.4. Conclusion

Ces trois exemples d'études illustrent l'intérêt d'une approche par simulation de l'effet des modes d'occupation des sols et des pratiques culturales sur les bilans hydriques et donc sur la reconstitution des ressources en eau au niveau territorial. L'approche par simulation est incontournable puisque ces données sont totalement inaccessibles à l'expérimentation. A part le premier exemple sur la nappe de Beauce, il ne s'agit pas à proprement parler d'études spatialisées à l'échelle territoriale mais plutôt des illustrations de ce que pourrait être ce type d'étude lorsque la simulation est effectuée à l'échelle du territoire d'un aquifère particulier et qu'elle est alors couplée à l'analyse spatialisée de la répartition des systèmes de culture en fonction de celle des types de sols.

Ces trois études permettent cependant de mettre en relief un certain nombre de processus importants. Premièrement, les surfaces cultivées consomment moins d'eau que les surfaces constamment couvertes par la végétation (forêts, prairies…) et, en conséquence, elles contribuent de manière non négligeable à la reconstitution des ressources en eau au niveau local. Ceci est dû au fait que les systèmes de culture laissent une proportion de sols nus plus ou moins importante spatialement et temporellement et que le sol nu limite ses pertes par évaporation par effet "mulch" une fois sa surface desséchée. En deuxième lieu, les différences dans les capacités de rétention des sols se traduisent, pour une même climat régional, par des variations assez significatives des quantités d'eau drainées, les sols les plus profonds et à plus forte réserve utile donnant lieu à de moindres quantités d'eau drainée. Il existe donc potentiellement une interaction entre type de sol et système de culture qui doit permettre à l'échelle territoriale de raisonner la répartition spatiale de ces derniers en fonction de celle des premiers dans le but d'optimiser la gestion de l'eau à l'échelle territoriale. Bien entendu, la répartition spatiale des systèmes de culture en fonction de la potentialité des sols obéit à d'autres critères, notamment économiques, qu'il convient de prendre en compte. Enfin, la gestion durable des ressources en eau au niveau territorial implique que les prélèvements d'eau par l'irrigation n'excèdent pas les quantités d'eau que le climat, les types de sols et les modes d'occupation des sols permettent de retourner vers les nappes. Les simulations font apparaître des situations régionales très contrastées, avec le Poitou-Charentes très excédentaire en apparence mais qui ne possédant pas de réservoirs hydrologiques pour stocker l'eau qui draine de ses sols se trouve en situation de ressource difficile malgré un bilan très favorable, et avec la région Midi-Pyrénées dont le système irrigué est en déficit mais se trouve réalimenté par des ressources en eau exogènes qui proviennent des barrages pyrénéens. Une analyse similaire en PACA ou en Languedoc-Roussillon aurait conduit à mettre en évidence que l'irrigation dans ces régions n'est durable qu'au prix d'importation massive de ressources externes.

Ceci nous amène donc à considérer l'importance du type de ressource hydrique dans toute approche de la gestion de l'eau à une échelle territoriale et de ses implications pour l'agriculture. Ainsi, comme cela a été analysé par Lemaire (2000) si, pour un territoire donné, on imagine une ressource en eau quantitativement définie de type réservoir, comme par exemple la nappe de Beauce, dont on doit assurer le renouvellement, c'est-à-dire ne pas prélever plus qu'elle ne reçoit, la problématique consiste à estimer quelle est la part de la ressource annuelle disponible pour la réalimentation de la nappe (D = P-ETR) qui peut être prélevée pour l'irrigation sans que le renouvellement de cette ressource soit affecté sur le moyen-long terme, compte tenu des autres usages de l'eau. Cette quantité d'eau ainsi définie permettra de définir la surface agricole maximum irrigable sur le territoire correspondant à la réalimentation de la nappe. Dans un tel cadre, la problématique sera essentiellement celle de la répartition des cultures irriguées et non irriguées à l'échelle du territoire, tandis qu'une politique de restriction de l'irrigation à l'échelle de la parcelle est peu pertinente. En effet une irrigation excédentaire se traduisant par une augmentation du terme drainage n'a que très peu d'effet sur la recharge de la nappe à moyen terme, le seul inconvénient étant une moindre rentabilité économique au niveau de l'exploitation agricole. En revanche, dans un tel système, une mauvaise estimation du poste ETR de l'ensemble des parcelles agricoles et des surfaces non agricoles à l'échelle du territoire, du fait d'une mauvaise analyse de la répartition spatiale des systèmes de culture et des modes d'occupation des sols en fonction des types de sols, peut avoir des conséquences importantes en conduisant les décideurs à surestimer ou sous-estimer les volumes d'eau qui peuvent être prélevés pour l'irrigation. Dans ce cas, l'analyse agronomique doit porter en priorité non pas sur les surfaces irriguées, mais sur les surfaces non irriguées dont le comportement détermine en réalité les volumes d'eau qui retournent à la nappe. Dans ces conditions, une fois déterminées les surfaces irrigables, il convient de valoriser au mieux les volumes d'eau qui y sont apportés, et le maïs qui permet d'avoir la meilleure efficience pour l'eau a ainsi toute sa place.

A l'opposé de cette situation, dans un territoire où le ressource en eau est de type "ouvert", cas de pompages en rivières ou dans les nappes d'accompagnement du réseau hydrographique, le facteur qui limite la disponibilité à cette ressource n'est plus de l'ordre d'un bilan, mais de celui du maintien d'un débit d'étiage (cas majoritaire de la région Poitou-Charentes). Dans ce cadre de contrainte, toute irrigation excédentaire est immédiatement pénalisante et correspond à un véritable gaspillage non récupérable de la ressource, contrairement à l'exemple précédent pour lequel le gaspillage de l'année

N pouvait correspondre à un gain l'année N+1. Une problématique de restriction des apports en fonction de la dynamique des besoins en eau des différentes cultures doit alors être recherché. Dans ce cas, la question de la temporalité des prélèvements est au moins aussi importante que celle des volumes prélevés.

On voit à travers ces deux exemples que la problématique de l'analyse du fonctionnement des systèmes de culture et du pilotage de l'irrigation ainsi que l'approche de la gestion durable des ressources en eau dépend étroitement du type de ressource hydrique à laquelle on a à faire localement. A ces deux exemples extrêmes on pourrait rajouter les territoires qui utilisent des ressources en eau exogènes comme Midi-Pyrénées, PACA ou Languedoc-Roussillon. Dans ces situations, il y a séparation spatiale entre reconstitution de la ressource et prélèvement pour l'irrigation. Il n'y a donc plus d'interdépendance entre les surfaces agricole non irriguées et les surfaces agricoles irriguées, puisque la ressource est assurée par la fonte des neiges et des glaciers sur des territoires non agricoles. On se trouve alors devant le problème de l'affectation d'une part déterminée de cette ressource pour l'irrigation compte tenu des autres usages. Une fois cette quantité négociée et fixée, il convient de déterminer les surfaces irrigables correspondantes en choisissant les systèmes de culture les plus aptes à assurer une valorisation économique de la ressource.

Face à cette diversité de situations hydrologiques, il s'avère qu'il ne peut y avoir de réponse unique dans la détermination des systèmes de cultures les mieux adaptés pour valoriser les ressources en eau. D'une manière un peu rapide, les agronomes ont eu tendance à se contenter d'un seul critère d'évaluation basé sur l'efficience de l'eau, c'est-à-dire sur la capacité d'une culture à apporter un supplément de production par unité de quantité d'eau supplémentaire consommée. Si ce critère demeure pertinent d'un point de vue écophysiologique pour classer des espèces entre elles, il apparaît peu opératoire dans le domaine de la gestion des ressources en eau. Ainsi, dans le cas d'une ressource de type "réservoir" ou de type "exogène" où il s'agit de valoriser une quantité connue d'eau chaque année, le choix d'une espèce à forte efficience de l'eau comme le maïs est tout à fait justifié, et avec le même volume d'eau il vaut mieux irriguer à l'optimum une surface restreinte de maïs que d'en irriguer "à moitié" une plus grande surface. Par contre dans le cadre d'une ressource de type "ouvert" où la problématique n'est pas de gérer une quantité d'eau connue mais de maintenir un débit d'étiage dans l'hydrosystème, le maïs, malgré son excellente efficience, présente le défaut de prélever de l'eau justement lorsque la ressource est la plus limitée. Il peut alors être préférable de choisir des irrigations de complément sur des cultures moins exigeantes (sorgho ou tournesol) ou sur des cultures qui ont des besoins à des périodes moins critiques (blé).

Ainsi les modèles de simulation du fonctionnement des cultures doivent fournir des outils d'étude pour la gestion des ressources en eau par l'agriculture à l'échelle des hydrosystèmes. Nous avons pu monter sur ces exemples que les contextes climatiques, pédologiques et hydrologiques locaux étaient prépondérants dans les décisions de gestion de l'eau et qu'il n'était donc pas possible d'avoir une approche normative en la matière et que seules des études au cas par cas réunissant les acteurs de l'agriculture, les autres acteurs de la société et les décideurs locaux permettraient d'élaborer une véritable politique concertée de gestion des ressources en eau en considérant l'agriculture comme agissant en même temps sur la reconstitution de la ressource en eau et sur son utilisation.

Références bibliographiques

Ailliot B., Bouthier A., 1993. Outils de pilotage. A chaque stratégie d'irrigation, sa méthode de pilotage. In: *Gérer l'irrigation en grandes cultures*, Optim'Eau. ITCF. 50-54.

AGPM, CETIOM, ITB, ITCF, Chambres d'Agriculture, Région Centre, 1995. Plaquette Irriguer Mieux, Valoriser l'eau en grandes cultures. 7 pages.

Baker, D.N., Meyer, R.E. 1966. Influence of stand geometry on light interception and net photosynthesis in cotton. Crop Sci. 6:15-19.

BRGM, 1998. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines en Eure-et-Loir. rapport BRGM R 39518. 94 pages + annexes + 1 carte murale.

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Nicoullaud, B., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delécolle, R. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. Agronomie 18: 311-346.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi , P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. Eur. J. Agron. 18: 309-332.

Brisson N., Itier B., L'Hotel J.C., Lorendeau J.Y., 1998. Parameterisation of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models. *Ecological Modelling* 107, 159-169.

Brisson N., 1998. An analytical solution for the estimation of the critical soil water fraction for the water balance under growing crops. *Hydrology and Earth System Science* 2, 221-231.

Brisson N., Seguin B., Bertuzzi P., 1992. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology* 59, 267-287.

Brisson N., King D., Nicoullaud B., Ruget F., Ripoche D., Darthout R., 1992. A crop model for land suitability evaluation : a case study of the maize crop in France. *European Journal of Agronomy* 1, 163-175.

Brisson N., Perrier A., 1991. A semi-empirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water Resources Research* 27, 719-727.

Brisson N., Huard F., Graux A.I., Lebas C., Debaeke P., Lemaire G., Itier B., , 2006. Evaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique. Rapport d'Etude INRA, Unité Agro-Clim. Avignon. 19 pages.

Bruand A., Creuzot G., Quétin P., Darthout R., Raison L., Courtemanche P., Gaillard H., 1997. Variabilité de la recharge de la nappe de Beauce. Rôle de l'irrigation et des caractéristiques du sol. *Etude et Gestion des Sols*, 4 (4):229-245.

DIREN Centre, 1995. Calcul des pluies efficaces par Météo-France Bricy.

Duncan, W. G., 1971. Leaf angles, leaf area, and canopy photosynthesis. Crop Sci. 11 : 482-485.

Chéry P., 1995. Variabilité de l'épaisseur de la couverture de sol. Conséquences pour le bilan hydrique hivernal d'un secteur de Petite Beauce. Thèse Univ. Nancy I. 286 pages.

Granier A., 1996. Evaporation des forêts. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 82: 119-132.

Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*. 116(2-3): 269-283.

Lemaire G., 2000. Plantes, peuplements cultivés et territories. OCL, 6 :494-498.

Levrault F., 2002. L'infiltration efficace en Poitou-charentes : influence du climat, de l'occupation du sol et de la réserve utile. Etude par simulation. AgroTransfert Poitou-Charentes, Rapport interne, 39 pages.

Nouzille C., Nicoullaud B., Duval O., Golaz F., Couturier A., Bruand A., 1999. Etude de l'alimentation naturelle de la nappe de Beauce. Elaboration d'un modèle de calcul de l'infiltration efficace. INRA Orléans. 78 pages + annexes.

Robelin M., 1984. Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse. In: *Physiologie du maïs*, A. Gallais (ccord.). INRA, Paris. 445-476.

Rodriguez-Iturbe I., D'Odorico P., Porporato A., Ridolfi L., 1999. On the spatial and temporal links between vegetation, climate and soil moisture. *Water Resources Research*, 35:3709-3722.

Vautier A., Cousin I., Bruand A., Nicoullaud B., Duval O., 1998. Fonctionnement hydrique des sols et recharge de la nappe de Beauce (sites de Villamblain, Trancrainville, Batilly-en-Gâtinais – suivi 97-98). INRA Orléans. 53 pages + annexes.

de Wit, C.T., Brouwer, R., Penning de Vries, F.W.T., 1970. The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 47-50.

Zhang Y.K., Schilling K.E., 2006. Effects of land cover on water table, soil moisture, evapotranspiration and ground water recharge: a field observation and analysis. Journal of Hydrology, 319: 328-338.

1.2. Usages agricoles et ressource en eau

Jean-Pierre Amigues et **Alban Thomas** (INRA, Toulouse), Sophie Allain (INRA Paris - ENS de Cachan), Isabelle Doussan (Université de Nice), Stéphane Ghiotti (CNRS, Montpellier)

L'augmentation de la fréquence et/ou la sévérité accrue des épisodes de sécheresse devraient se traduire par des inflexions de la politique de l'eau en France mais aussi, peut-être, dans d'autres pays européens, modifiant ainsi les conditions de mise en place de la Directive Cadre sur l'Eau. En ce qui concerne l'agriculture, on le verra, les évolutions en cours de la politique de l'eau ne sont pas sans conséquences sur la sévérité ressentie par le secteur agricole des épisodes de sécheresse.

L'irrigation s'inscrit dans un contexte récurrent de conflits d'usage localisés d'intensité variable mais naturellement plus importants en périodes de sécheresse. Le législateur, les pouvoirs publics comme les acteurs locaux n'ont pas attendu les sécheresses récentes pour se préoccuper de cette situation, et de nombreuses initiatives ont été ou sont aujourd'hui engagées, en vue d'atteindre une gestion équilibrée de la ressource satisfaisant au mieux les besoins des usagers. L'objectif premier de cette partie est donc de resituer l'usage agricole de la ressource en eau dans le contexte général de la gestion de l'eau en France, dans ses dimensions économiques, juridiques, territoriales et socio-politiques.

Mais, s'agissant de l'usage agricole de l'eau, on ne saurait se contenter d'une approche purement "hydraulique" de la question, sans faire intervenir les relations complexes qui relient les pratiques agricoles d'irrigation avec les milieux physiques et les conditions agronomiques dans lesquelles elles s'insèrent. Cette insertion s'opère sur deux niveaux d'organisation étroitement interdépendants : celui du système sol-plante-climat, qui régule les pratiques d'irrigation vis-à-vis du milieu physique "immédiat" de la culture, et l'organisation spatiale de l'agriculture irriguée, qui met en jeu l'adéquation entre orientations de production et potentialités hydriques du milieu.

La gestion de l'eau d'irrigation doit donc être abordée **à différentes échelles d'espace** : la parcelle agricole (en considérant ou non sa variabilité interne), l'exploitation et la région[1]. Si l'on considère la variabilité intra-parcellaire, on se situe alors dans le cas d'une agriculture de précision.

A l'échelle d'une **région,** la **gestion quantitative** de l'eau consiste à allouer l'eau nécessaire aux divers usages en temps et lieux utiles. Les questions posées sont les suivantes :
- Quelle quantité d'eau est nécessaire à chacun des usages exprimés ?
- Où et quand ces besoins s'expriment-ils ?
- En cas de conflit d'usages, comment partager la ressource ?

Et si l'on se focalise sur **l'usage agricole de l'eau**, les questions se déclinent en :
- Quelle est la demande en eau d'irrigation sur l'ensemble de la région ?
- Quelle est la participation des grandes cultures irriguées et non irriguées au bilan hydrique de la région (par rapport à d'autres activités comme la forêt, les haies, les jachères et friches ou d'autres types de culture comme les vergers par exemple) ?
- Quel est l'effet d'une restriction en eau (sécheresse ou limitation d'irrigation) sur la production ?
- Où et quand se situent les déficits hydriques naturels (et donc la demande en eau d'irrigation par les agriculteurs) ?
- Comment établir, par bassin ou région, des règles de gestion de l'eau pour l'irrigation ?

A l'échelle régionale, l'usage agricole correspond à l'agrégation des demandes individuelles en eau d'irrigation émanant d'exploitations agricoles aux assolements et systèmes de culture variés. Ces questions de gestion quantitative de la ressource en eau concernent toutes les régions où, à une période de l'année au moins, la ressource est déficitaire, par exemple l'Europe du Sud ou l'Afrique du Nord.

A l'échelle du territoire de l'**exploitation** ou même à l'échelle d'une **parcelle** en agriculture de précision, les questions qui se posent concernent, comme à l'échelle territoriale, le lieu et le moment auxquels l'eau est ou devrait être utilisée. Toutefois, dans ce cas, les usages à arbitrer sont tous des usages "agricoles" : il s'agit de répartir la ressource entre différentes parcelles ou portions de parcelles dont le sol, l'occupation du sol et les itinéraires techniques (incluant les modalités d'application des intrants) varient. Dans ce cas, il n'y a pas de conflit entre agriculteurs : les décisions sont prises par un seul agriculteur. Par contre, il y a compromis entre objectifs et contraintes.

1. Le terme "région" est ici utilisé comme terme générique désignant un espace géographique renfermant une multitude de parcelles agricoles. Il peut aussi bien correspondre à une région administrative qu'à une autre entité administrative (par exemple un département) ou à une unité physique (bassin versant, périmètre irrigué).

Pour tenter d'apporter des éléments de réponse à l'ensemble de ces questions, on procède de la manière suivante. En premier lieu, on présente un état des lieux succinct des usages agricoles de la ressource en eau en France. Après une période de croissance rapide des superficies irriguées durant la deuxième partie de la décennie 90, la tendance actuelle est orientée vers une stabilisation des superficies et même une légère réduction du rapport surface/volumes d'eau apportée. Cette tendance touche en particulier le maïs irrigué. Mais cette évolution générale recouvre en fait une grande diversité de problèmes locaux. Nous complétons donc l'approche globale par un examen régional plus détaillé par grands systèmes de production. Cette hétérogénéité géographique des problèmes se retrouve également lorsqu'on considère l'impact local d'épisodes de sécheresse, un point illustré clairement par l'historique de sécheresses passées depuis 1976, historique auquel on procède ensuite.

La rentabilité économique des systèmes irrigués peut être également impactée par la répétition de sécheresses. Ce point sera abordé plus en détail par la suite, lorsqu'on traitera des effets potentiels de la réforme actuelle de la PAC sur l'évolution de l'agriculture irriguée. On se bornera ici à présenter l'état actuel des connaissances en matière de coûts et de bénéfices de l'irrigation et de différentiel de rentabilité du maïs irrigué vis-à-vis d'autres cultures. Les propositions de recours à des instruments dits "économiques" (redevances, taxation de l'eau), souvent avancées dans le débat public comme un moyen de régler les conflits d'usage, sont source de très nombreuses confusions quant à des notions comme la "valeur" de l'eau ou son "juste prix". Il nous a semblé opportun d'annexer à ce chapitre un exposé succinct des principes essentiels de l'évaluation économique de la ressource en eau, tant pour ce qui concerne l'agriculture que pour la ressource dans son ensemble.

L'examen des options ouvertes à la décision publique en matière de gestion des sécheresses agricoles suppose de resituer l'exercice dans le contexte plus général de la politique de l'eau. Les enjeux associés aux évolutions législatives récentes seront examinés dans la partie suivante. On a tenté dans cette partie d'en résumer le cadre d'ensemble. Ce cadre est tout d'abord juridique, et fait l'objet d'une section consacrée au droit de l'eau, à l'organisation légale et réglementaire de son accès aux usagers, et à l'examen de la jurisprudence et du règlement des contentieux en la matière. L'eau est éminemment un objet de gestion "local" et l'on abordera cette question sous deux angles complémentaires. Après un rappel rapide de la multiplicité des acteurs et parties prenantes intervenant dans la gestion de la ressource en eau dans notre pays, on conduit une analyse territoriale de la gestion de l'eau mettant en lumière les interactions entre les acteurs, la complexité des enjeux auxquels ils doivent faire face, ainsi que le poids des contingences, tant historiques que géographiques ou socio-politiques, qui pèsent sur leurs marges de manœuvre et de décision. Enfin, on procède à une analyse détaillée des modalités de la gestion collective et/ou participative de la ressource en eau.

1.2.1. Eau et usages agricoles en France

Cette section présente un aperçu des aspects économiques factuels de l'économie de l'irrigation en France, en insistant sur l'hétérogénéité des situations régionales en regard des cultures pratiquées. Un survol des travaux disponibles concernant le coût de l'eau d'irrigation est présenté, en insistant sur le rôle majeur joué par les paiements compensatoires de la Politique Agricole Commune dans les choix de systèmes de culture de la part des irrigants. Nous discutons enfin des impacts des sécheresses passées (1976, 1989, 2003 et 2005) sur la situation économique des exploitants. Il apparaît alors que les conséquences d'un épisode de sécheresse sur l'agriculture sont de nature très différente selon que le contexte économique est favorable ou non (situation des marchés et politique agricole notamment). De plus, les impacts sont très différents selon les orientations de production (grandes cultures, élevage, vigne et horticulture), ce qui milite en faveur d'une analyse sectorielle plutôt qu'au niveau agrégé.

1.2.1.1. Etat des lieux de l'usage agricole de l'eau en France

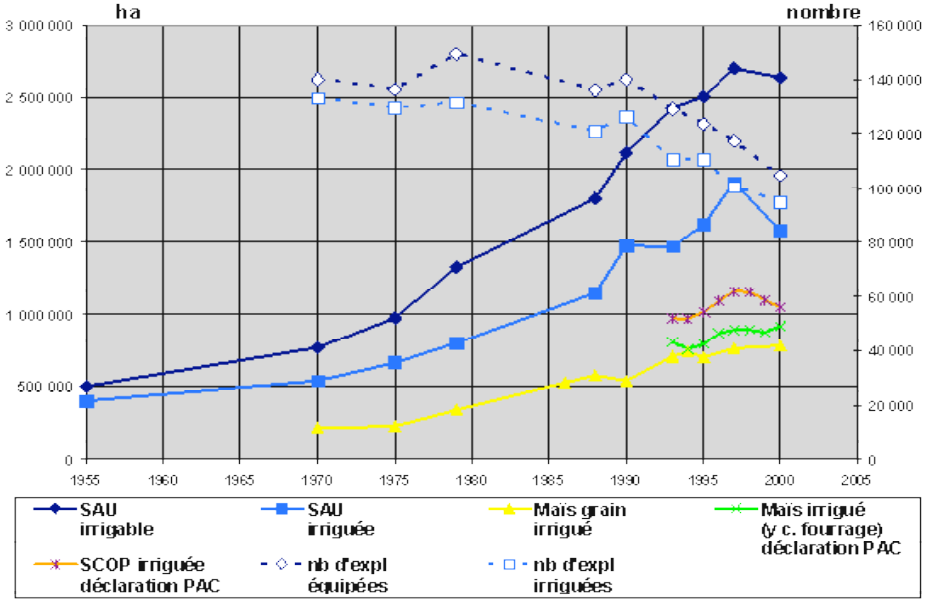
Sur un total d'environ 38 milliards de m^3 prélevés pour les activités humaines chaque année en France, 14% concernent les usages agricoles. Le développement accru de l'irrigation depuis les années 1980 entraîne des problèmes nouveaux en certains points du territoire. En particulier, la plus grande partie des prélèvements à des fins d'irrigation n'est pas restituée au milieu (dans le Sud-Ouest, environ 80% des volumes d'eau consommés sont imputables à l'irrigation en été). Les surfaces irrigables représentaient en 2000 environ 2,6 millions d'hectares pour 1,6 millions d'hectares de surfaces irriguées, essentiellement par aspersion, avec près de 80% des prélèvements sujets à l'évapotranspiration, soit environ 2000 m^3 à 3000 m^3 par hectare et par an. Dans la mesure où le Sud-Est est une zone ancienne d'irrigation, le développement très rapide des surfaces irriguées a concerné essentiellement le Sud-Ouest (Aquitaine, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes), avec un triplement des surfaces en 10 ans, soit 600 000 ha (30% de la sole irriguée). On estime à plus de 800 millions de m^3 d'eau les prélèvements nets en période d'étiage dans cette région, correspondant à un débit supérieur à ceux de la Garonne, l'Adour et la Charente.

Barbut et Poux (2000) évoquent par exemple plusieurs facteurs explicatifs du fort développement du maïs irrigué dans le bassin de l'Adour :

- les facteurs pédoclimatiques ; les sols sableux filtrants ont une capacité de rétention de l'eau faible, rendant donc l'irrigation nécessaire, et les risques de sécheresse sont élevés ;
- la facilité d'accès à la ressource en eau : existence d'une nappe à faible profondeur et absence de relief rendant le pompage aisé ;
- l'évolution des systèmes de production : les cultures "sous contrat" (maïs semence et maïs doux) ont une rémunération avantageuse, rendant l'irrigation quasi-obligatoire, l'intégration très forte entre les producteurs et les acteurs de la transformation se traduisant par de fortes exigences en matière de qualité et de régularité des rendements. Mentionnons également l'importance du capital immobilisé dans les exploitations agricoles, ainsi que du taux d'endettement, qui incite à la "sécurisation" du rendement ;
- les politiques publiques de développement agricole : le développement de l'irrigation est ainsi clairement affiché comme un choix stratégique dès le milieu des années 1980, pour conserver notamment les marchés de cultures "sous-contrats" et pousser à l'intensification de certaines cultures.

Le graphique suivant illustre les grandes tendances d'évolution des superficies irriguées en France.

Figure 1. Evolution de l'irrigation en France

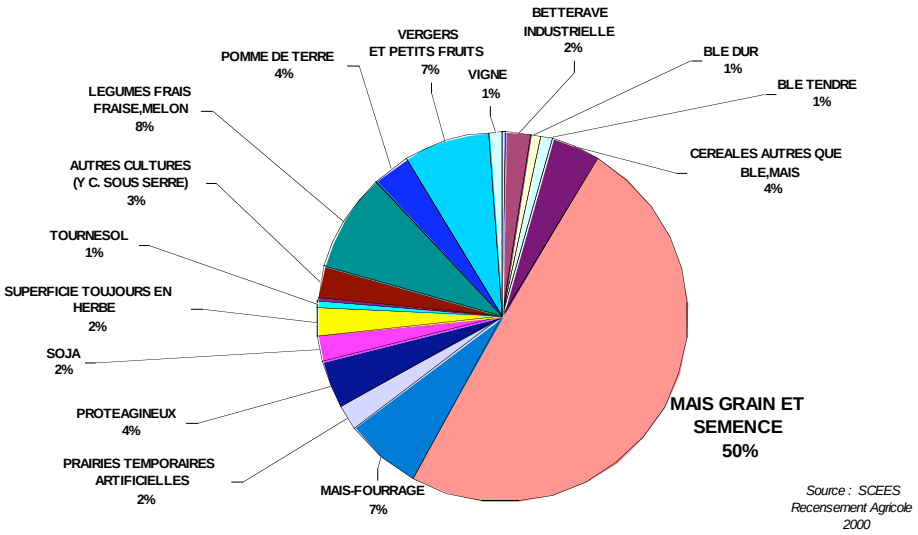


Source : AGPM 2006

Concernant les productions, le maïs (grain et semence) représente 50% de la sole irriguée en France, soit environ 781 000 ha (66% dans le Sud-Ouest), suivi de l'horticulture (18%) et des oléagineux (10%). Environ 60% des vergers irrigués en France se situent dans les régions PACA, Languedoc-Roussillon et Rhône-Alpes. Sur la période 1988-2000, la moitié de l'accroissement de la surface irriguée totale en France est associée au développement du maïs irrigué (plus de 36% de progression sur la période ; Buisson, 2005). D'après l'ONIC, on comptait en France environ 41 700 producteurs de maïs (grain) irrigué en 2000, dont environ 10 500 en Aquitaine et autant en Midi-Pyrénées, et 4 800 en Poitou-Charentes. Ces trois régions représentaient, toujours d'après l'ONIC (sur la base des déclarations PAC en 2000), respectivement 221 462 ha irrigués pour l'Aquitaine, 185 114 ha pour Midi-Pyrénées et 129 546 ha pour cette culture, sur un total d'environ 865 480 ha en France.

La répartition des irrigations est illustrée sur la figure 2.

Figure 2. Répartition des cultures irriguées en surface en 2000



Le tableau 1 donne les statistiques de superficies irriguées, de volumes d'eau consommés et de la part d'irrigation dans la consommation totale, pour les régions françaises dans lesquelles cette part dépasse

70% (Buisson, 2005). Comme on le voit, la consommation en eau d'irrigation par hectare est beaucoup plus importante dans les régions où l'horticulture est prépondérante (PACA et Languedoc-Roussillon), que dans celles où la maïsiculture domine (Poitou-Charentes, Aquitaine et Midi-Pyrénées).

Tableau 1. Statistiques régionales pour l'irrigation, 2002

Région	Volumes consommés pour irrigation (million m^3)	Part irrigation dans la consommation totale (%)	Superficie irriguée (1000 ha)	Volume consommé par hectare irrigué (m^3/ha)	Part du maïs dans les surfaces irriguées (%)	Part des vergers et horticulture dans les surfaces irriguées (%)
Poitou-Charentes	234,66	79	169,02	1388,35	79	3
PACA	616,86	77	114,95	5366,33	6	33
Aquitaine	408,96	77	278,69	1467,43	74	17
Midi-Pyrénées	361,96	71	269,26	1349,28	70	8
Languedoc-Roussillon	238,76	71	64,76	3686,84	8	44

Source : IFEN (2003) et Recensement Agricole (2000)

Il est intéressant de comparer ces données, qui recensent l'usage agricole de l'eau par grands bassins de production avec les prélèvements mesurées à l'échelle des grands bassins versants, c'est-à-dire des territoires gérés par les Agences de l'Eau. Ces prélèvements sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2. Prélèvements pour l'irrigation en 2001 (en millions de m^3)

Bassin hydrologique	Rhône-Méditerranée-Corse	Adour-Garonne	Loire-Bretagne	Seine-Normandie	Rhin-Meuse	Artois-Picardie	Total
Prélèvements totaux (Mm^3)	3 009	1 032	505	116	80	25	4 867
dont : eaux superficielles,	2 813 (93%)	671 (65%)	154 (30%)	9	9	1	3 657
eaux souterraines (*)	196 (7%)	361 (35%)	351 (70%)	107	71	24	1 110

Source : IFEN 2004 (données 2001)

La destination de l'eau apparaît comme nettement différente selon les bassins de production, l'horticulture dominant le Sud-Est et la maïsiculture le Sud-Ouest dans l'affectation de la ressource. Le contexte pédo-climatique et l'orientation de production influent naturellement beaucoup sur les volumes consommés par hectare, relativisant beaucoup les raisonnements basés sur la progression des superficies irriguées pour expliquer la pression croissante de l'agriculture sur la ressource en eau. Une augmentation de 10% des superficies irriguées en PACA (forte demande climatique et spécialisation horticole) aurait ainsi des effets 4 fois supérieurs sur les volumes d'eau consommés que le même accroissement de superficie en Midi-Pyrénées.

Selon Redaud (2002), les besoins en eau d'irrigation pour le maïs représentent de 1500 à 2500 m^3/ha/an. Cependant, en comparant les apports en eau d'irrigation et les besoins théoriques de la plante suivant différents scénarios climatiques, on constate (Teyssier, 2005) un écart systématique d'environ 2/3. Ces résultats, sur la base des enquêtes "Pratiques culturales" du SCEES et des enquêtes TERUTI, indiquent par conséquent que l'optimum économique (lié aux apports réellement observés) est en deçà de l'apport optimal d'un point de vue agronomique.

1.2.1.2. Diversité régionale des problèmes de sécheresse, de pénurie d'eau et de gestion quantitative de la ressource

La fréquence et l'intensité des sécheresses sous leurs manifestations climatiques, édaphiques ou hydrologiques doivent être modulées selon les régions, en relation avec l'accès à la ressource pour

l'irrigation et la nature des systèmes de culture. Ce n'est pas là où le besoin est le plus fort (climat, systèmes de culture) que les pénuries d'eau sont les plus marquées. Pour **5 régions françaises** (PACA, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, Centre/Beauce, Picardie) **variant par les contextes pédoclimatiques, agronomiques et hydrologiques,** nous présentons ici un état synthétique des problèmes posés par l'irrigation.

La région PACA : les premiers aménagements hydrauliques en France

La pluviométrie annuelle est de 600 à 850 mm mais le nombre de jours de pluie est inférieur à 100, le sud étant plus arrosé et le nord plus sec. La région présente une agriculture très diversifiée : de l'agriculture très spécialisée comme l'horticulture, l'arboriculture fruitière et les cultures maraîchères, de l'agriculture de montagne, de la polyculture-élevage, des grandes cultures (céréales), de la viticulture et de l'oléiculture.

Les surfaces occupées par les cultures (RGA 2000) :
Grandes cultures : 84 400 ha soit 12% de la SAU, dont 70% de blé dur.
Vignobles : 102 000 ha soit 14 % de la SAU

Les cultures irriguées : surtout des cultures spéciales et des prairies
Grandes cultures : 32 000 ha soit 28% des surfaces irriguées, dont 14 000 ha de riz.
Surfaces toujours en herbe et prairies : 32 000 ha soit 28% des surfaces irriguées.
Vergers, légumes et vigne : 43 000 ha soit 37% des surfaces irriguées.

Au total, la région PACA est une des régions les plus irriguées. La surface irriguée représente presque 17% de la SAU (près de 17 000 ha pour 5 800 exploitations).

La ressource en eau : de grands barrages et peu de problèmes de ressource

De grands travaux d'aménagements hydrauliques réalisés à partir des années 60 (barrage de Serre Ponçon sur la Durance en 1961, barrage de Sainte-Croix sur le Verdon dans les années 70) permettent d'alimenter des réseaux collectifs. Les réseaux collectifs sont dominants : 78% des exploitations irriguées. Les irrigants sont souvent regroupés en Associations Syndicales Autorisées. La Société du Canal de Provence est un acteur important du développement de l'irrigation : élaboration de projets, construction et exploitation. Les unités de gestion les plus importantes sont la vallée de la Drôme (1640 km^2, système mixte nappe-rivière, pas de retenues), la plaine de la Crau (600 km^2), la nappe de la Vistrenque (390 km^2).

Les conflits d'usage sont limités. L'accroissement du prélèvement dans les karsts du Vercors devrait réduire les tensions en vallée de la Drôme. Jusqu'à présent, l'irrigation de la Crau à partir de la Durance n'était pas soumise à restriction. La production de foin bénéficiait de doses proches de 20 000 m^3/ha, le drainage intense permettant de réalimenter la nappe à hauteur de 12 000 m^3/ha. La question des économies d'eau se pose suite à la baisse du niveau du barrage de Serre Ponçon par défaut d'enneigement.

Midi-Pyrénées : irrigation du maïs surtout à partir de l'eau des Pyrénées et du Massif Central

La région Midi-Pyrénées est au carrefour de l'influence atlantique fraîche et de l'influence méditerranéenne plus sèche. La pluviométrie moyenne est de 650 à 700 mm dans le bassin central et croît jusqu'à 1500 mm sur les reliefs.

Les surfaces occupées par les cultures (RGA 2000) :
Les grandes cultures occupent plus du tiers de la SAU et se situent dans la partie centrale de la région ; les surfaces fourragères et les exploitations d'élevage se situent en périphérie dans le Massif Central et dans le Piémont Pyrénéen.

Les cultures irriguées : surtout le maïs

11,4% de la SAU était irriguée en 2000 (RGA 2000), soit près de 270 000 ha sur environ 15 000 exploitations. Les cultures les plus irriguées sont les grandes cultures (81% de la surface irriguée en 2000) et très majoritairement le maïs.

Les ressources en eau : les Pyrénées et le Massif Central

Les ressources en eau proviennent pour l'essentiel des eaux superficielles : des rivières réalimentées ou non et des nappes d'accompagnement.

Deux massifs montagneux alimentent principalement les rivières :
- Les Pyrénées : la Garonne, l'Ariège et le canal de la Neste, aménagement structurant créé il y a un siècle, permettent d'alimenter les rivières gasconnes.
- Le Massif Central : le Tarn, l'Aveyron et le Lot. Depuis les années 1970, la création de ressources a été conséquente (150 millions de m^3), mais un déséquilibre entre les prélèvements et les ressources est fréquemment préjudiciable à la salubrité et à l'équilibre écologique des rivières.

Environ la moitié des exploitations agricoles irriguées utilise un réseau collectif, l'autre moitié utilise une ressource individuelle. L'aspersion est très largement représentée (97% de la surface irrigable).

Périodiquement, mais pas chaque année, des problèmes de ressources existent. Par exemple, la succession de plusieurs étés et de plusieurs hivers secs a été problématique de 1989 à 1991. Ce déséquilibre entre besoins et ressources a provoqué des modifications d'assolement (baisse de la surface en maïs) et des délocalisations de production (maïs semences) dans certains secteurs. Plus récemment, en 2003 puis en 2005, des bassins ont été touchés par des restrictions.

Le système Neste géré par la CACG réalimente 1300 km de rivières et permet l'irrigation de 4 400 ha. De nombreuses retenues permettent le stockage de 100 HM^3. Aux marges de la région, on trouve le système Lauragais-Audois à l'Est (3 retenues soit 100 HM^3, 17 000 ha équipés, 4 000 ha irrigués) et le bassin de l'Adour à l'Ouest (système nappe+rivière, unité de gestion de 9 400 km2, nombreuses retenues soit 55 HM^3)

Poitou-Charentes : irrigation du maïs surtout, à partir de nappes et des problèmes de ressources récurrents

Les sols de groies (argilo-calcaires), à réserve en eau faible à moyenne, dominent.

Les surfaces occupées par les cultures (RGA 2000)
Les grandes cultures occupent près de 45% de la SAU.

Les cultures irriguées : surtout les grandes cultures
9,6% de la SAU ont été irrigués en 2000 soit près de 170 000 ha, sur presque 6 000 exploitations.
Les cultures les plus irriguées sont les grandes cultures (86% de la surface irriguée en 2000) et très majoritairement le maïs.

La ressource en eau :

Elle provient essentiellement des forages (50% des ressources) et des pompages en rivière (30% des ressources) ; les retenues ne représentent que 10% des ressources (sources IRRIMIEUX).

On note actuellement une volonté forte de développer des réserves de substitution bâchées réalimentées l'hiver à partir des cours d'eau. Les 2 unités de gestion principales sont le bassin de la Charente (système rivières alimentées par barrages – nappes, unité de gestion de 10 000 km², 2 barrages soit 20 HM^3) et la Sèvre Niortaise (unité de gestion de 1250 km², 1 retenue de 15 HM^3).

La région Poitou-Charentes se caractérise par une pénurie d'eau chronique. L'insuffisance de la ressource en eau se traduit par des "assecs" de rivières importants lors des étés secs précédés d'hiver peu pluvieux. Lors de ces années, de nombreuses nappes présentent des remplissages hivernaux insuffisants.

Face à ces problèmes, les départements ont mis en place depuis les années 90 des procédures réglementaires visant à adapter les consommations à l'état des ressources. Les hauteurs d'eau des aquifères sont mesurées (piézomètres) et les débits des rivières contrôlés. Suivant les niveaux, il y a interdiction pendant une partie de la journée, de la semaine (1-2 jours), voire interdiction totale. Dans certains secteurs, des gestions volumétriques ont été développées par les irrigants et l'administration. Ce principe de gestion volumétrique est intéressant pour les irrigants : le fait d'allouer un volume d'eau annuel à chaque exploitation permet une bonne visibilité et facilite la gestion. Il permet aussi

probablement une gestion plus efficace de la ressource en eau. Par contre, la difficulté principale réside dans l'évaluation du volume disponible chaque année avant la campagne d'irrigation, notamment dans le cas des nappes. Par ailleurs, la mise en œuvre d'une gestion volumétrique ne garantit pas une irrigation sans problème même dans le cas d'une bonne gestion individuelle, car dans le cas d'une baisse trop importante de la ressource en eau, des interdictions d'irriguer peuvent malgré tout être promulguées. Ainsi le besoin est évalué à 25 HM^3 pour la Charente ; à l'horizon 2009, la gestion volumétrique devrait être réajustée pour parvenir à une consommation de 22 HM^3.

La région Centre : irrigation des céréales et du maïs principalement à partir de nappes

Hormis quelques reliefs (le Perche), l'ensemble de la région ne bénéficie que d'une faible pluviométrie (640 mm en moyenne à Orléans).

Les surfaces irriguées : céréales puis maïs et cultures spéciales

8,4% de la SAU ont été irrigués en 2000 soit près de 200 000 ha, sur environ 6 700 exploitations agricoles. Notons cependant que la surface irriguée peut être plus importante les années à sécheresse printanière durant lesquelles une partie de la surface en céréales d'hiver et de printemps est irriguée.
Les cultures les plus irriguées sont les grandes cultures (81% de la surface irriguée) et parmi elles les céréales (blé tendre, blé dur, orge brassicole), le maïs et les protéagineux.

C'est principalement pendant les années 80, après la sécheresse de 1976, que l'irrigation s'est développée. Les principales ressources en eau sont les nappes souterraines et principalement la nappe de Beauce (unité de gestion de 9 000 km²). En 1995, 70% des surfaces irriguées des départements d'Eure-et-Loir, Loir-et-Cher et Loiret ont été irrigués à partir de la nappe de Beauce (source IRRIMIEUX). Cependant, dans certains départements, la ressource en eau est plus variée :
- Indre et Loire : 45% des prélèvements en nappe, 30% en rivière et 25% en retenues collinaires ;
- Cher : 80% des prélèvements en rivière et 60% en nappe (source IRRIMIEUX).

Seules 30% des exploitations irriguées sont raccordées à un réseau d'irrigation collectif. Plus de 80% utilisent un réseau individuel. L'aspersion est très largement représentée (99% de la surface irrigable).

Depuis 1999, la nappe de Beauce fait l'objet d'une gestion volumétrique. Périodiquement, des problèmes de ressource se manifestent en bordure de nappe avec un tarissement des résurgences responsables d'"assecs". Des conflits se cristallisent le plus souvent sur ces assecs bien qu'ils soient limités en linéaire. L'Agence de l'Eau Loire-Bretagne s'intéresse au sujet comme en témoigne l'étude qu'elle vient de lancer afin d'estimer la consommation mensuelle et de quantifier les pics d'utilisation en période d'étiage.

Picardie : irrigation des cultures légumières à partir de nappes

La moyenne des précipitations annuelles est de 740 mm. Les pluies estivales et la réserve en eau des sols, moyenne à élevée, suffisent généralement pour la majorité des grandes cultures. Cependant, la forte présence de cultures légumières a entraîné le développement de l'irrigation surtout à partir des années 90.

Les cultures irriguées : les légumes de plein champ

2,6% de la SAU ont été irrigués en 2000 (RGA 2000) soit 35 200 ha, sur environ 1 100 exploitations agricoles. Les cultures les plus irriguées sont les légumes, qui représentent 86% de la surface irriguée. Les légumes irrigués sont surtout les pommes de terre puis des cultures sous contrats (haricots, épinards, carottes, salsifis…). Les pommes de terre irriguées sont écoulées sur le marché de l'industrie (frites, chips…) et sur le marché du frais. Ce sont les industries agro-alimentaires, soucieuses d'un approvisionnement en quantité et en qualité constant, qui ont imposé l'irrigation dans cette région.

La ressource en eau principale est représentée par des nappes souterraines particulièrement la nappe de la Craie. 75% des exploitations irriguées utilisent un réseau d'irrigation individuel et l'aspersion est majoritaire (98% des surfaces). Notons cependant la présence de micro-irrigation de plein champ sur moins de 1 000 ha.

Peu de mesures pour limiter les prélèvements avaient été prises jusqu'en 2005. En 2005, suite à un hiver particulièrement sec, des mesures d'encadrement de la ressource ont été instaurées : allocations d'un volume d'eau par hectare de culture présente (gestion volumétrique) dans l'Aisne et la Somme en début de campagne d'irrigation, ou irrigation non autorisée certains jours de la semaine dans l'Oise et la Somme en fin de campagne d'irrigation. L'Agence de l'Eau Picardie-Artois a prévu de consacrer 2,5 M d'euros à une meilleure valorisation de la ressource (économies d'eau, pose de compteurs, adduction, amélioration des techniques d'irrigation : canon-enrouleur, micro-irrigation, création de retenues pour l'irrigation).

L'impact des prélèvements d'eau d'irrigation semble limité (5% des consommations d'eau du bassin). Cependant, dans la Somme, ce prélèvement atteint 20% des prélèvements annuels totaux. En 1998 (année sèche), les volumes d'eau mesurés (compteurs) dans le bassin dépassaient 26 HM^3. En ce début d'année 2006, les débits moyens des rivières étaient globalement inférieurs à la normale. Les niveaux des nappes étaient également inférieurs à la normale et à la situation observée en 2005 à la même époque.

L'implication des usagers non agricoles est faible pour la plupart de ces systèmes, sauf en Sèvre Niortaise (Marais Poitevin), Vistrenque (eau potable), Plaine de Crau (pour raison étatique), Plaine de la Drôme où elle est importante de même qu'en Beauce. Le cas de la Drôme est assez spécifique de ce point de vue et mérite d'être décrit plus précisément.

Encadré 1. Le cas de la Drôme

Les différentes ressources

Les eaux souterraines sont représentées par les réserves karstiques et par les nappes molassiques. Ce sont des nappes profondes n'ayant aucune relation directe avec les écoulements de surface. Les eaux de surface sont constituées de la Drôme (à Saillans, la réserve mobilisable à l'étiage est très faible, correspondant à 300 l/s), de ses affluents et des nappes d'accompagnement de ces cours d'eau. Le Rhône et sa nappe d'accompagnement sont aussi intégrés dans ces ressources au niveau de la confluence Drôme-Rhône.

Gestion des prélèvements agricoles

Objectifs fixés par le SAGE :

- Sur l'ensemble du périmètre, le gel de l'irrigation de manière à gérer de façon optimale la situation actuelle et d'éviter toute accentuation du problème.
- Sur la Drôme aval de Crest, compte tenu de l'importance des déficits, des prescriptions spécifiques sont prises :

  Le débit objectif est fixé à 2,4 m^3/s au niveau des Pues, soit à l'aval des principaux prélèvements agricoles.

  Dans un premier temps (horizon 5 ans) :
  - 1 année sur 4 : pas de problèmes.
  - 2 années sur 4 : trouver 2 millions de m^3 d'eau supplémentaires, de manière à annuler le déficit.
  - 1 année sur 4 : mettre en place une gestion de crise.

A terme l'objectif est d'annuler le déficit 4 années sur 4. Le SAGE préconise l'approfondissement de la connaissance de réserves en eau souterraine (nappe de la basse Drôme et Karst). Selon l'étude réalisée par le bureau d'étude C2i (2005)[2], les déficits en eaux en retenant les hypothèses les plus défavorables (besoins en eau, estimation des débits non influencés) et les plus favorables sont respectivement de 22 et de 4 millions de m^3. Les solutions préconisées pour pallier ces déficits sont les suivantes :

- **Exploitation du massif karstique de la Gervanne** permettant de soutenir les débits d'étiage de la Drôme (conservée toutefois prioritairement pour subvenir aux besoins en AEP).

2 C2i : 2005. Etude d'incidence des prélèvements d'eau à usage agricole dans le département de la Drôme, rapport d'étude, 51p + annexes.

- **Retenue des Juanons** (700 000 m^3). Située en extrémité des canaux de la Bourne, elle permettrait de diminuer les prélèvements dans la Drôme par son rôle tampon. Sa localisation près de Crest permettrait de réinjecter de l'eau là où les besoins sont les plus élevés.
- **Importation d'eau du bassin versant de l'Isère**. Lorsque la retenue des Juanons sera devenue opérationnelle, les syndicats d'irrigation prévoient d'importer de l'eau et ce, de façon automatique du 01/07 au 15/08 ; le volume alors disponible passerait à 1,4 millions de m^3.
- **Pompage de l'eau du Rhône**. Les canaux d'amenée du Rhône sont une source d'eau importante et de bonne qualité. Une possibilité envisagée est le pompage de cette eau jusqu'à Crest afin de permettre de diminuer la pression des prélèvements agricoles sur la Drôme et de soutenir dans une moindre mesure son étiage.

1.2.1.3. La petite hydraulique agricole : les retenues collinaires

Ces ouvrages sont construits sur les cours d'eau et constitués de digues en terre. Un bon nombre d'entre eux stockent certaines années la totalité des écoulements, surtout lorsque l'hiver affiche une pluviométrie déficitaire. Ils ont une capacité très variable, pour la plupart comprise entre 10^5 et 10^6 m^3. Ils ont été construits à partir des années 70 pour faire face à la demande en eau croissante pour l'irrigation du maïs, demande exacerbée par les sécheresses apparues fin des années 80. Le tableau 3 (Gleyses, 2004) donne un aperçu de l'évolution de ces réserves artificielles entre 1998 et 2000 pour la région de Gascogne sous influence du système Neste[3]. En 2004, un chiffre de 47 retenues sous la tutelle d'un réseau collectif d'irrigants (dont 29 gérées par les ASA) peut être avancé pour cette région. Ces réservoirs représentent un volume disponible de 21,4 Mm^3, soit 12% du total (un total de 176,3 Mm^3 pour ces réserves artificielles dont 95,8 Mm^3 sont relatifs aux réservoirs de soutien d'étiages gérés par la CACG). Le nombre de retenues individuelles, plus élevé, est quant à lui difficile à préciser.

Sur la base des chiffres présentés, le volume d'eau disponible par hectare irrigué est passé de 1658 m^3/ha à 1965 m^3/ha. Plus de la moitié de l'augmentation du volume disponible (56% = 34,5/63,2) est due à celle des réservoirs de réalimentation des rivières. Le volume disponible dans les réservoirs de réseaux collectifs a très fortement augmenté (+81%), mais leur importance reste la plus faible. Le volume disponible des retenues collinaires individuelles a connu une croissance nettement plus modérée (+30%)

Tableau 3. Evolution des réserves d'eau disponibles pour l'irrigation et le soutien d'étiage, et des superficies irriguées entre 1988 et 2000 sur l'ensemble de la zone du système Neste

	années		Evolution	
	1988	2000	Valeur	%
Réservoirs de réalimentation des rivières gérés par la CACG (Mm^3) [4]	61,3	95,8	+ 34,5	+56%
Réservoirs des réseaux collectifs (Mm^3)	11,8	21,4	+ 9,6	+81%
Retenues collinaires individuelles (Mm^3)	40,0	59,1	+ 19,1	+30%
Ensemble des réserves artificielles d'eau (Mm^3)	113,1	176,3	+ 63,2	+56%
Superficie irriguée (ha)	68 202	89 730	+ 21 528	+32%

(Gleyses, 2004)

Une expertise de ces ouvrages, menée par le Cemagref au début des années 90, dans le cadre d'une convention Cemagref-Environnement (SRETE), montre qu'un certain nombre d'entre eux sont dans un état médiocre, leur digue ne faisant pas l'objet d'entretien (celles-ci sont envahies par la végétation

3 Gleyses G., 2004. Eléments quantitatifs sur l'irrigation dans la zone d'influence du système Neste. Cemagref, UR Irrigation, Rapport interne, 21p.+ annexes.

4 Incidemment, on notera que deux DUP ont été signées en 2002 pour deux réservoirs ($5{,}15.10^6$ m^3 en tout) situés sur le Lizet et sur l'Auzoue, rivières qui traversent l'Astarac et le Haut Armagnac, dans la partie la plus à l'ouest du Système Neste. Le conseil Général du Gers en est maître d'ouvrage.

arborée et se dégradent). En outre, l'expertise recommande pour certains ouvrages une étude d'impact, avec notamment une étude hydraulique qui permettrait d'analyser l'importance des risques encourus par la population située en aval de ces digues.

Le cas des "bassines" en région Charente

Les réserves de substitutions nommées communément "bassines" ont été construites pour faire face aux interdictions de prélever l'eau dans les affluents de la Charente ou leur nappe d'accompagnement durant la pleine saison d'irrigation. On en dénombre actuellement 9 (totalisant 1 538 400 m^3) construites entre 1998 et 2003 dans le bassin de l'Osme-Couture. Les premières ont été construites par des individuels, les autres l'ont été par des ASA.

Elles sont l'équivalent d'immenses piscines creusées au moyen d'engins de terrassement et rendues étanches par la pose d'une bâche en plastique (ou matériau géotextile). La terre déblayée sur une profondeur limitée pour réduire certes les effets de la poussée d'Archimède, sert à accroître leur capacité de stockage. En conséquence, certaines sont entourées de digues dont la hauteur varie entre 3 et 10 m de hauteur, ce qui n'est pas sans risque pour les populations situées en aval de ces ouvrages. La "bassine" est remplie d'eau par prélèvements dans les nappes (majoritairement nappes d'accompagnement des cours d'eau) entre le 1er novembre et le 30 avril. Comme pour les retenues collinaires, leur capacité est très variable. Certaines peuvent atteindre le million de m^3 ce qui est somme toute colossal pour un ouvrage de ce type. La durée de remplissage varie selon l'importance, par exemple il faut 2 mois pour une bassine de 250.10^3 m^3. Ces bassines sont l'objet de polémiques car, même soutenues par l'Etat, leur projet de construction (en 2003, 2 arrêtés préfectoraux autorisent la construction de 4 nouvelles totalisant 2 millions de m^3) font l'objet de recours devant le tribunal administratif par des associations de défense de l'environnement .La plus virulente est l'APAPPA (Association Protection et Avenir du Patrimoine en Pays d'Aigre). Le motif en est qu'elles sont ruineuses, subventionnées à 80% (2 millions d'euros pour 900.10^3 m^3), profitant à 2 ou 3 irrigants seulement par bassine (caractère injuste également dénoncé, vis-à-vis des autres systèmes de production qui n'en profitent pas), peu esthétiques (implantées après déboisement d'une zone importante) et l'eau puisée dans les nappes l'est parfois de façon illégale durant les périodes interdites selon Rosalyne Bottrel (Journal La Croix du 14-02-2006). Enfin l'APAPPA met en avant l'argument relatif à l'absence d'étude d'impact des prélèvements hivernaux.

1.2.1.4. Impacts des sécheresses passées

"*Pour l'agriculture française, on peut se demander si pour certaines productions ou pour certaines régions, on n'est pas arrivé à une certaine limite où le coût de la vulnérabilité mesuré par les conséquences en cas de crise, dépasse les avantages retirés des accroissements de productivité.*" P. Byé et F. Pernet (1978).

Il existe peu, dans la littérature scientifique, d'études économiques détaillées des impacts des sécheresses sur la situation financière des exploitations agricoles : les épisodes de 2003 et 2005 sont trop récents, alors que la sécheresse de 1989 a peut-être été perçue comme moins dramatique. Par contre, l'épisode de 1976 a fait l'objet d'une recherche bien mieux documentée, bien qu'essentiellement descriptive. Nous reprenons les différents épisodes dans un ordre chronologique inverse.

Sécheresse 2005

Une première estimation est fournie par le SCEES et commentée par l'AGPM (AGPM, 2005), dans le cas du maïs seul. Un transfert des grains vers l'ensilage a été opéré sur 67 000 hectares, et la récolte totale est de 12,7 millions de tonnes. Par rapport à l'année 2004, le rendement estimé est en baisse de 10%. Les superficies en maïs irrigué diminuent de 8%, signe d'une anticipation de sécheresse pour la campagne 2005, un effet probable des alertes précoces sur le mauvais remplissage des réserves largement diffusées par les pouvoirs publics auprès des professionnels. Les pertes de revenus des maïsiculteurs se sont situées entre 30 à 40% dans les régions les plus exposées. Trois régions sont

particulièrement touchées : Poitou-Charentes, Aquitaine et Midi-Pyrénées. Les maïs irrigués ont souffert de l'interdiction des derniers tours d'eau, ainsi que les maïs secs sur les terres les plus fragiles, sans eau durant deux mois.

Un rapport de la FNSEA de décembre 2005 (Barthélémy, 2005) vient apporter des premiers éléments de contexte sur la baisse du revenu agricole pour 2005. Tout d'abord, l'année 2004 était exceptionnelle pour les productions végétales, ce qui rend le recul de 2005 plus inquiétant qu'il ne l'est en réalité si on le replace sur une période plus longue. Ensuite, un chiffre global de variation du revenu pour le secteur agricole est à considérer avec précaution, le secteur viticole ayant connu une année catastrophique (environ -37% de variation du revenu). Le chiffre global de baisse du revenu agricole de 2005 par rapport à 2004 est de -11% (revenu net agricole par actif non salarié, en termes réels ; voir De Lapasse, 2005[5]), soit la quatrième année consécutive de baisse. 2,6% des actifs non salariés auront disparu en 2005, soit environ 15 000 emplois. Le problème pour le secteur des céréales est que, consécutivement à la baisse du rendement (voir plus haut), les prix de vente ont stagné ou ont été marqués à la baisse, contrairement à l'année 2003. De plus, le coût des consommations intermédiaires a augmenté fortement, avec l'impact de la hausse des prix du pétrole, et une augmentation des achats en volume de produits de protection des cultures. Le poste "énergie" a ainsi augmenté de 16,5%, celui des engrais de 5,4% et les phytosanitaires de 3,5%. Enfin, les charges de structure ont augmenté dans le même temps (+4% pour les salaires, +2,5% pour les intérêts d'emprunts). Dans le secteur des céréales, oléagineux et protéagineux (COP), le revenu par actif non salarié a baissé de 22% en 2005 par rapport à 2004, et de 6% par rapport à 2003.

Début septembre 2005, le gouvernement a décidé d'allouer 39 millions d'Euros aux exploitants des 17 départements touchés par la sécheresse, pour ce qui est des dommages sur les cycles d'exploitation de printemps et d'été des prairies ; les pertes d'automne et de maïs ensilage faisant l'objet de décisions ultérieures. Ces sommes concernent les dommages non assurables par les compagnies d'assurance, relevant donc des calamités agricoles (définies par une perte supérieure à 27% sur chaque récolte, et les pertes totales de l'exploitation à 14% minimum). Au final après examen de la situation à l'automne, ce seront au total 40 départements qui seront déclarés éligibles au régime des calamités agricoles.

Sécheresse 2003

Le revenu agricole en 2003 est resté stable si on le calcule sur l'ensemble des orientations techniques. Malgré la baisse en volume des récoltes (-21%), des fortes hausses de prix limitent à moins de 2% la baisse du revenu (De Lapasse et Desriers, 2003). On constate des baisses de rendement aussi importantes que 30% en Haute-Garonne et dans le Gers, et 44% dans le Tarn. En ce qui concerne les productions COP, le revenu par actif (RNEA) varie peu en 2003 (-2%) par rapport à 2002, alors qu'il diminue de 5% entre les moyennes triennales 2001-2003 et 1998-2000. Il faut noter que le revenu des exploitations combinant céréales et betteraves ou pommes de terre augmente en fait légèrement (+8%). Le seul secteur sérieusement affecté est en fait celui des vins d'appellation d'origine, avec une baisse du RNEA de 29% en 2003 par rapport à 2002 (-10% entre les deux moyennes triennales ci-dessus). Le volume et la valeur des consommations intermédiaires diminuent légèrement (engrais : -5% en volume et -2,5% en valeur ; phytosanitaires : -10% en valeur). Enfin, 520 millions d'Euros sont attribués aux éleveurs dans le cadre des procédures d'indemnisations, ainsi que des dégrèvements de la taxe sur le foncier non bâti. Pour les céréales, les prix augmentent en moyenne de 16%. Il est à noter que les prix "non-définitifs" en novembre 2003 dépassaient de 40% ceux de 2002 à la même époque. Ces prix doivent être pris avec précaution, dans la mesure où ils ne représentent pas l'ensemble de la campagne de commercialisation (dans ce cas, jusqu'à juin 2004). Le RNEA s'établissait en moyenne à environ 34 000 Euros en 2003 pour les exploitations COP, et à 28 000 Euros pour l'ensemble des exploitations. D'après De Lapasse et Desriers (2003), le secteur potentiellement le plus exposé aurait été celui de l'élevage ; cependant, la conversion de surfaces initialement destinées au maïs grain vers

5 Le revenu annuel net d'entreprise par UTA non salariée est en moyenne, sur la période 2003-2005, de 17 500 € pour le secteur COP, 28 000 € pour le maraîchage et l'horticulture, 20 000 € pour la viticulture d'appellation, et 12 500 € pour les ovins et autres herbivores, soit environ 16 500 € pour l'ensemble des exploitations. Le RNEA est défini comme :
RNEA = valeur ajoutée après amortissements (intégrant les subventions directes aux produits) + subventions d'exploitation (non liées à une production) – charges d'exploitation (incluant les taxes, charges salariales, intérêts et loyers).

l'ensilage (environ 200 000 ha) a permis des transactions en nombre suffisant pour pallier l'insuffisance des fourrages. Ainsi, les échanges de fourrages grossiers ont été particulièrement importants en 2003 par rapport aux autres années. L'incidence négative des achats de fourrages sur le revenu est estimée à 3% pour les éleveurs laitiers, et à 5% pour les éleveurs viande.

Sécheresse 1988-1989

Il existe peu de documents disponibles sur cette sécheresse et contenant des informations chiffrées. D'après Vinet (2000), le FNCGA a distribué 2,9 milliards de Francs sur ces deux années, épuisant ses ressources. 90% des indemnisations du Fonds étaient ainsi consacrées à la sécheresse. Rappelons que le FNCGA a été créé par la loi du 10 juillet 1964, pour garantir une indemnisation en cas de sinistre agricole non assurable. La définition très large des événements ouvrant droit à indemnisation a entraîné un éparpillement des indemnisations, couvrant rarement plus de 40% des dommages, et disponibles tardivement (un à deux ans après le sinistre). Bien entendu, les indemnisations sont plafonnées implicitement par l'enveloppe globale du FNCGA.

Les actes du colloque tenu en mars 1990 à Paris sur les leçons de la sécheresse (Cemagref, 1990) donnent des indications sur les impacts de la sécheresse en termes de rendement pour certaines cultures et certaines régions. Ainsi, pour le blé tendre en Charente Maritime, la baisse du rendement est estimée entre -10,3 q/ha et -13 q/ha selon la date de semis (17 ou 27 octobre 1988) ; pour le pois de printemps, la sécheresse a agi à la fois sur le nombre de grains/m^2 et le poids du millier de grains, soit une baisse de rendement estimée à -15,9 q/ha. En ce qui concerne le maïs, les rendements ont dans une majorité de cas diminué dans une fourchette comprise entre -2,5 et -7,5% selon les départements. Par contre, certains départements ont connu des hausses de rendement (plus de 7,5% dans le Nord-est), la disponibilité en températures ne devenant plus le premier facteur limitant dans ces régions géographiques. Les itinéraires techniques culturaux rencontrés en 1989 ont traduit une meilleure résistance à la sécheresse, du fait d'une meilleure implantation des cultures (un sol meuble permettant par exemple d'apporter 55 mm d'eau à la culture, un sol tassé seulement 39 mm). La Confédération Paysanne lors du colloque précité fournit des chiffres sur la distribution de la marge brute du maïs irrigué en Charente en 1989 : de 600 à 1500 FF/ha pour le premier quartile, et de 100 à -1800 FF/ha pour le dernier.

Sécheresse 1976

Les premières mesures sont prises dès le mois de juin 1976, avec l'intervention de l'ONIBEV et l'aide aux transports de fourrages. Sur une production totale d'environ 19 millions de tonnes, 1,1 millions seront transportés vers les régions d'élevage (Byé et Pernet, 1978). Dès le mois de juillet 1976, les impacts sur les secteurs amont et aval se font sentir, avec des diminutions importantes des chiffres d'affaires et des mesures de chômage technique. Les premières pertes sont estimées par le Bureau Agricole Commun entre 3 et 10 milliards de Francs, le chiffre final publié en septembre 1976 (par l'INSEE) portant sur une baisse de 5,6 milliards du revenu agricole, soit 9,4% de ce même revenu.

Un impôt sécheresse acquitté par les 2/3 des foyers fiscaux pour un montant total de 2 614 millions de Francs a été instauré, ce qui a engendré un vif débat débordant le problème de la sécheresse et cristallisant les tensions entre le monde agricole et les milieux urbains. Il est intéressant de noter que, de façon comparable à la situation en 2005, il s'agissait de la 3e année de baisse consécutive du revenu agricole, la forte augmentation du prix du pétrole brut en 1974 ayant entraîné une hausse du prix des engrais de 48,8%, du poste énergie de 51,9%, pour une diminution du revenu agricole brut de 5,7% (Byé et Pernet, 1978). L'impact de la sécheresse de 1976 est le double de celui de la hausse du prix du pétrole. Le montant total de l'aide sécheresse est fixé à 6 milliards le 22 septembre 1976, dont 90% pour les éleveurs, selon une répartition départementale. Selon l'INSEE, la baisse des rendements céréaliers est d'environ 10% en 1976 par rapport à l'année précédente, et de 33% par rapport à 1974. Le maïs par contre, comme on s'y attend, a été de loin le plus touché. Sur un total de 1,8 millions d'ha, 340 000 ha seront utilisés pour le bétail (récolte "en vert") et 60 000 abandonnés, pour une récolte totale de 6,28 millions de tonnes au lieu de 9 millions. Rappelons qu'à cette période, l'Europe importait du maïs à hauteur de 12 millions de quintaux par an. Byé et Pernet (1978) évoquent

l'hypothèse selon laquelle, pour le maïs, la production ait été rendue plus vulnérable en raison de l'évolution vers des variétés plus productives mais plus exigeantes en eau. Cette hypothèse ne se vérifie cependant pas pour toutes les productions végétales ; en particulier, les prairies temporaires et artificielles semblent avoir mieux résisté que les prairies permanentes (diminution de 40% du rendement pour la luzerne, de 54% pour l'herbe). Déjà à l'époque, la presse professionnelle évoque les deux solutions techniques possibles si la sécheresse avait été prévue : semer à l'automne et ensiler au printemps ; mettre en place des cultures dérobées pour profiter des pluies d'automne.

D'après Byé et Pernet (1978), la sécheresse de 1976 est intervenue dans un contexte économique très tendu pour les exploitations agricoles, avec des augmentations du ratio des prix relatifs défavorable aux produits agricoles (par rapport aux consommations intermédiaires) et un doublement de l'endettement de 1970 à 1975.

Tableau 4. Impact de la sécheresse de 1976

Produit			**Consommation intermédiaire**		
	Indice volume Base 100 en 1975	Indice prix Base 100 en 1975		Indice volume Base 100 en 1975	Indice prix Base 100 en 1975
Blé tendre	90	116	Aliments animaux	111	115
Blé dur	86	110	Engrais	103	100
Maïs	58	116	Produits pétroliers	10-	113
Orge	72	113	Produits phytosanitaires	100	110
Autres céréales	75	115	Dépenses vétérinaires	102	111
Pommes de terre	75	220	Autres biens	105	110
Fruits	137	86	Autres services	113	112
Vins	98,5	119,4			
Bétail	103,9	105,7			
Total végétaux	92,1	114,6			
Total animaux	101,3	107			
Total agriculture	97,1	108,9	Total consommations intermédiaires	106,6	110,1

Source : Byé et Pernet (1978).

Byé et Pernet (1978) insistent sur le fait que les comptes nationaux sont un mauvais instrument pour évaluer l'impact économique de la sécheresse, dans la mesure où ces comptes sont établis annuellement et ne captent donc pas les (fortes) variations inter-mensuelles. De plus, une décomposition par orientation technique ou département n'est évidemment pas possible. Par opposition, les organisations professionnelles agricoles ont eu recours à l'estimation "directe" des pertes de revenu notamment, en cours de période. Ainsi, alors que l'INSEE présentait le chiffre de 5,6 milliards de Francs de perte (9,4% du revenu), les organisations professionnelles avançaient une fourchette comprise entre 9,4 et 12,3 milliards de Francs. Mentionnons enfin qu'en 1976, contrairement à la période actuelle, la plupart des produits agricoles avaient leur prix fixé au niveau communautaire, avec un soutien direct (couplé) sans commune mesure avec les niveaux actuels. Par conséquent, la hausse attendue des prix agricoles était nécessairement plus faible que la diminution des niveaux de production (en volume).

En résumé, sur la chronique des épisodes passés (1976, 1989-1990, 2003 et 2005), nous pouvons conclure que l'impact économique des sécheresses dépend de façon significative de l'environnement formé par les politiques agricoles, la situation sur les marchés agricoles, et celui des consommations intermédiaires. La conjoncture joue par conséquent un rôle majeur, les années caractérisées par l'effet de ciseau (faible augmentation des prix agricoles et en parallèle, forte hausse du prix des consommations intermédiaires) étant particulièrement propices à une forte diminution du revenu agricole.

1.2.1.5. Economie de l'irrigation

L'irrigation répond de façon générale à plusieurs objectifs, présents ou non dans la stratégie d'un même exploitant agricole : un rendement agricole supérieur, une assurance contre les aléas climatiques (températures excessives, précipitations trop faibles), et également une qualité des produits supérieure exigée par la filière aval (contrats). D'un point de vue économique, la sécheresse aura des impacts différents selon la façon que le producteur a de l'appréhender. Si ce dernier anticipe un manque d'eau structurel, les conséquences d'épisodes de sécheresse répétés ne seront pas fondamentalement différentes de celles qui ont déjà conduit à la spécialisation technique des exploitants. L'irrigation massive dans le Languedoc (pour le blé tendre) et dans le Sud-Ouest (pour le maïs) peut à cet égard être considérée comme un cas extrême résultant d'anticipations pessimistes sur la distribution des précipitations locales. La question de l'implantation de cultures à forte demande en eau sur des zones à déficit pluviométrique chronique repose sur une combinaison complexe entre la rentabilité des cultures pratiquées, la nature des sols et les autres variables climatiques (les températures en particulier). Si les anticipations des producteurs débouchent sur la construction d'une distribution de probabilité stable (stationnarité) pour les précipitations, les systèmes culturaux pratiqués dépendront en dernière analyse de cette distribution, au sein d'un ensemble de facteurs autant économiques que pédoclimatiques.

Deux questions importantes doivent être abordées. La première concerne la réactivité des exploitants à une modification du contexte économique, à distribution climatique donnée. On considère dans ce cas que la rentabilité d'un système de culture peut être modifiée de façon exogène, suite à des modifications des conditions de marché ou des réformes de politiques agricoles et environnementales, ou enfin à des conditions plus difficiles d'accès à la ressource. Par exemple dans ce dernier cas, même en l'absence d'épisodes de sécheresse, un système cultural plus demandeur en eau d'irrigation peut être en forte extension en raison de sa rentabilité, ce qui entraînera une politique aménagée de l'offre (tarification de plus en plus sophistiquée, restrictions d'usage éventuelles). C'est clairement le cas du maïs irrigué dans le Sud-Ouest, qui a conduit à un déséquilibre accru entre l'offre et la demande en eau, même en absence de sécheresse. La modification du contexte économique portera alors sur les conditions d'accès à la ressource, ce qui n'a pas obligatoirement été anticipé par les exploitants dans la mesure où cette modification a été relativement lente comparée au développement de l'irrigation.

Une modification majeure du contexte économique porte naturellement sur le différentiel de rentabilité entre les cultures (ou les systèmes de culture), du fait de la réforme des politiques agricoles et environnementales. A distribution climatique donnée et accès à la ressource inchangé, les cultures les plus rentables seront pratiquées en priorité (en respectant toutefois des impératifs de durabilité de l'exploitation). Cependant, la question de la durabilité du système au niveau local (bassin versant notamment) n'est pas obligatoirement intégrée dans le calcul économique du producteur, si ce n'est justement via une tarification ou un mécanisme de répartition de la ressource adapté. La Politique Agricole Commune (PAC) a connu depuis 1992 des évolutions majeures à cet égard, tant dans le secteur des grandes cultures que dans celui de l'élevage. Les conséquences sur la rentabilité relative des systèmes de production auront encore des impacts significatifs sur les décisions de production (assolements) et par conséquent sur la pression exercée sur la ressource en eau. La mise en application de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) en France aura également des conséquences, peut-être moins directement identifiables, sur les décisions des producteurs.

La seconde question, en complément de la première, porte sur les réactions attendues des exploitants agricoles à une modification de la distribution climatique, dans un contexte économique changeant (comme précédemment). La difficulté est alors de parvenir à identifier l'importance relative des conséquences attendues de ces deux effets (changement des conditions climatiques et réforme du contexte économique). Il apparaît assez clairement que pour répondre à cette question, les déterminants des décisions de production face à un système de conditions à la fois climatiques et économiques doivent d'abord être identifiés séparément. Dans une deuxième étape, les interactions entre ces différents facteurs doivent être intégrées dans un modèle de décision relativement complexe, construit par couplage entre un modèle économique de rentabilité et un modèle agronomique de production. On a procédé a un exercice de simulation pour apporter de premiers éléments de réponse à cette question, dont on trouvera les résultats en annexe au rapport d'expertise proprement dit.

Un survol des coûts et bénéfices de l'irrigation en France[6]

Nous présentons ici un survol des différentes études fournissant des estimations des coûts de l'irrigation, la plupart d'entre elles concernant le Sud-Ouest, dans le cas des grandes cultures (céréales, oléoprotéagineux).

L'étude de la DRAF Midi-Pyrénées (Teyssier, 2005) fournit des données assez précises quant à la distribution statistique des coûts de l'irrigation dans la région. Sur la base du RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole), le coût pour l'irrigation a été corrigé pour prendre en compte les coûts associés en énergie (pompage). Le coût moyen est estimé à 141 €/ha irrigué pour la seule année 2003, ce qui représente la seule charge de fonctionnement, hors amortissement éventuel. Les données des Centres d'Economie Rurale (CER) de Haute-Garonne et du Gers sont relativement comparables pour les années 2002 et 2003 (Tableau 5).

Tableau 5. Charges d'irrigation en grandes cultures, Haute-Garonne et Gers, 2002-2003

Culture	Maïs grain irrigué		Soja irrigué		Pois irrigué		Sorgho irrigué	
	Haute-Garonne	Gers	Haute-Garonne	Gers	Haute-Garonne	Gers	Haute-Garonne	Gers
Charge d'irrigation 2002 (€/ha)	143	84	106	43	20	20	80	35
Charge d'irrigation 2003 (€/ha)	143	112	103	66	41	39	44	61

Les charges d'exploitation totales (comprenant les charges d'approvisionnement, les fluides, loyers et fermages, dotation aux amortissements, charges de personnel, etc.) étant estimées en moyenne, pour les irrigants, à un peu plus de 1000 Euros par hectare en Midi-Pyrénées pour les années 2002 et 2003, on voit que l'eau d'irrigation représente une valeur en proportion d'environ 14%. Des valeurs très proches sont fournies pour l'année 2001 par la Chambre Régionale d'Agriculture Midi-Pyrénées (sur sols boulbènes) : 14,9%, soit 841 FF sur 5630 FF pour un maïs grain irrigué type Cécilia de rendement 110 q, et 18,1%, soit 631 FF sur 3485 FF pour un sorgho irrigué type DK 26.

Le tableau 6 fournit des exemples de marges brutes calculées pour une exploitation-type par la Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées, pour plusieurs cultures. Dans le contexte de la PAC avant la réforme de 2003, les rentabilités différentielles apparaissent sensiblement différentes entre les cultures sèches et irriguées, mais ces calculs n'intègrent pas l'ensemble des charges.

Tableau 6. Marges brutes par hectare en Midi-Pyrénées, exercice 2000/2001

Culture	Tournesol sec (28 q)	Blé dur (65 q)	Sorgho irrigué	Maïs sec	Maïs irrigué	Soja irrigué
Rendement (q)	28	75	85	75	110	33
Type de sol	Argileux	Argilo-calcaires	Boulbènes	Rivière basse	Boulbènes	Argilo-calcaires
Prix (FF/q)	174,83	82,88	63,14	77,94	77,94	155,26
Produit (FF/ha)	4895,22	5387,02	5367,29	6625,25	8573,85	5123,54
Prime compensation (FF/ha)	2247,00	4221,00	2940,00	1970,00	2940,00	3540,00
Charges brutes* (FF/ha)	2744,00	3209,00	3485,00	3647,00	5630,00	3401,00
Marge brute (FF/ha)	4398,00	6399,00	4823,00	4948,00	5884,00	5262,00

* Les charges brutes représentent les charges d'approvisionnement uniquement (engrais, semences, produits phyto-sanitaires, assurance grêle, eau d'irrigation, taxe sur la culture, frais de récolte).

Réquillart et al. (2003) présentent d'autres valeurs de rentabilités pour la région Midi-Pyrénées, dans le cadre d'une étude sur le potentiel du boisement des terres agricoles. L'avantage de ces données, obtenues à partir de professionnels et experts du secteur (Toulousaine de Céréales), est de permettre des calculs pour des rotations-types, et non pour des cultures annuelles séparées. Le tableau 7 fournit le calcul de rentabilité de quatre systèmes de culture : maïs irrigué en continu, rotation blé tendre-blé dur-soja, tournesol et jachère.

6Les chiffres contenus dans cette section concernent la période avant réforme de la PAC de juin 2003.

Tableau 7. Rentabilité de 4 systèmes de culture – région Midi-Pyrénées

Système	Culture	Rendement (q/ha)	Ventes (€/ha)	Aides (€/ha)	Marge brute hors aides (€/ha)	Marge brute totale (€/ha)
A1	Maïs (1,00)	82	925	484	76	560
A2	Blé tendre (0,33) Blé dur (0,33) Soja (0,33)	65 50 25	768 686 381	304 443 484	234 61 -91	539 504 393
			612	410	68	479
A3	Tournesol (0,13) A2 (0,87)	21	432 612	340 410	-42 68	297 479
			589	401	54	455
A4	Jachère (0,13) A2 (0,87)	0	0 612	340 410	-76 68	263 479
			532	401	49	451

Source : Réquillart et al. (2003)

Une autre source (Solagro, 2004) compare les marges brutes de deux cultures principales : le maïs irrigué et le blé tendre en Midi-Pyrénées. Le tableau 8 fournit des indications sur la rentabilité relative de ces deux cultures, toujours dans le cadre de la PAC avant 2006.

Tableau 8. Comparaison Maïs irrigué – blé tendre, en Midi-Pyrénées

		Blé tendre	Maïs irrigué
Produits	Rendement (q/ha)	55	93
	Prix (€/q)	12	10
	Aides	642	973
	Produit brut	277	439
Charges proportionnelles	Intrants sauf irrigation	306	422
	Irrigation	0	162
Charges brutes	Amortissement irrigation	0	100
	Coût travail irrigation	0	108
Marge brute totale		613	692

En €/ha sauf mention particulière

Source : Solagro (2004)

Un rapport du Conseil Général du GREF (CGGREF, 2005) fournit des indications quant aux coûts de l'irrigation en France. Selon ce rapport, ces coûts sont très variables selon les régions, représentent environ 20% des charges, les charges fixes étant prépondérantes. La part de la redevance prélèvement de l'Agence de l'Eau est faible, comprise entre 2% et 8% du coût d'irrigation. Concernant la mesure des consommations, indispensable à une politique de tarification efficace, 71% des exploitations irrigantes (85% des surfaces irriguées) sont actuellement équipées de compteur volumétrique. Le tableau 9 présente des exemples de coût pour trois types d'approvisionnement.

Tableau 9. Coût de l'irrigation selon les systèmes

Réseau	Coût variable (€/m^3)	Coût total pour 3000 m^3 (€/ha)	Coût total pour 3000 m^3 (€/m^3)
Gravitaire	0	183	0,061
Sous pression, collectif	0,076	335	0,111
Pompage individuel	0,009	149	0,05

Source : CGGREF (2005).

Mentionnons enfin un coût moyen estimé à 2 FF/m^3 à la fin des années 1980 évoqué par B. Lesaffre (Cemagref, 1990), ce chiffre comprenant l'apport à la culture et la mise en œuvre sur le terrain. Une autre estimation provenant de l'annexe technique des actes du colloque Cemagref de mars 1990 à Paris fournit des coûts d'investissement pour l'irrigation compris entre 5 000 et 30 000 FF/ha pour les équipements à la parcelle, auxquels il faut ajouter de 15 000 à 40 000 FF/ha si des ouvrages de

stockage et de transport de l'eau sont nécessaires. Le tableau 10 fournit une décomposition des coûts pour l'eau d'irrigation.

Tableau 10. Décomposition du coût de l'eau d'irrigation (grandes cultures, 1500 m^3/ha)

		Coût
Transport de la borne d'irrigation à la plante	Charge d'investissements (1000 FF/ha)	0,67 FF/m^3
	Temps de travail	Non évalué
Transport depuis le milieu naturel	Charges d'investissements (700 FF/ha, subventionnées à 80%, soit 140 FF/ha)	0,09 FF/m^3
	Charges de fonctionnement (électricité, etc.)	0,33 FF/m^3
Réalisation des réserves en eau	Charges d'investissements (140 FF/ha)	0,09 FF/m^3
Redevance Agence de l'Eau		0,02 FF/m^3
Prix payé par l'irrigant		1,20 FF/m^3 HT
Coût total		1,94 FF/m^3 HT

Source : Cemagref (1990).

1.2.2. Le droit de l'eau

Le droit de l'eau en France se caractérise par sa **complexité,** liée à :

- La **dispersion** de ses sources : le code de l'environnement - qui comprend les deux principales lois du 16 décembre 1964 et du 3 janvier 1992 -, d'autres dispositions codifiées (code civil, codes de la santé publique, des collectivités territoriales, du domaine public fluvial et de la navigation intérieure, etc.) et enfin quelques textes non codifiés.
- L'**enchevêtrement** des textes, des régimes juridiques et des compétences : polices administratives, instruments de "gestion concertée", Etat, communes, etc.

En outre, l'un des enjeux actuels en est la **transposition de la DCE**[7]. En effet, alors que la très grande majorité des textes communautaires adoptés antérieurement avaient une portée thématique ou sectorielle, la DCE a pour ambition de structurer la politique de l'eau dans les États membres de l'UE au cours des quinze à trente prochaines années.

Malgré la complexité et la technicité du corpus juridique relatif à l'eau, quelques **grands principes** ont été posés par le législateur français[8], qui apparaissent devoir être renforcés par la DCE :

- L'eau fait partie du patrimoine commun de la nation[9].
- La protection de l'eau, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général.
- Le droit de l'eau a pour objet la gestion équilibrée de la ressource en eau.
- L'usage de l'eau appartient à tous[10], dans le cadre des lois et règlements ainsi que des droits antérieurement établis.

Sur le plan juridique, deux des grands principes du droit de l'eau peuvent servir de grille de lecture à l'appréhension du risque sécheresse par le droit. S'y ajoute le régime d'appropriation de l'eau.

1. La **protection** de l'eau est **d'intérêt général** (L 210-1[11]). A ce titre, la ressource est considérée comme un objet de protection juridique, un "bien" écologique, que les autorités publiques ont le devoir de conserver, et partant les pouvoirs nécessaires pour le faire ; il est à noter que cette obligation est renforcée par la DCE. Sur le plan juridique, cela implique toute une batterie de pouvoirs d'intervention unilatérale, dévolus principalement à l'Etat, dans le cadre de polices spéciales, avec une place laissée aux pouvoirs d'intervention des maires notamment. Sous cet angle d'approche, la protection de l'eau en tant que "bien" écologique, est assez clairement identifiée comme un objectif "supérieur", susceptible de primer sur d'autres considérations, en particulier les usages économiques, d'autant que la protection de la santé humaine est également visée.

   Le risque sécheresse peut alors traité comme un risque affectant l'eau en tant que ressource naturelle et ce qu'il s'agisse d'un risque généré par des usages particuliers de l'eau ou d'un risque "naturel". L'intervention des pouvoirs publics par ce biais peut se traduire par la restriction ou l'interdiction de certains usages. Cependant, cette approche peut se révéler peu pertinente pour appréhender les usages de l'eau ; il a pu être ainsi noté, à propos de la loi du 3 janvier 1992 : "C'est une loi de police traitant des problèmes quantitatifs et qualitatifs par des sanctions en apparence dissuasives. Elle néglige trop la nécessaire prise en compte de la gestion de l'eau. Il n'est pas réaliste de considérer l'usage de l'eau comme une atteinte à l'environnement."[12].

---

7 Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000, établissant un cadre pour une politique communautaire de l'eau, JOCE n° L 327 du 22 décembre 2000. L'un des textes de transposition est la loi 2004-338 du 6 avril 2004.
8 Article L 210-1 du C. Env.
9 Cette formulation est dépourvue de conséquences juridiques directes.
10 Idem.
11 Les textes codifiés cités sans autre référence sont issus du code de l'environnement.
12 Le Moal R., Les droits sur l'eau, Revue de Droit rural, n° 218, décembre 1993, p. 449, spé. p. 460.

2. Le principe de la "**gestion équilibrée**" est posé par l'article L 211-1[13]. La gestion équilibrée doit permettre la protection de l'eau et des écosystèmes aquatiques, mais reconnaît la légitimité des usages de l'eau liés à l'exercice d'activités économiques, privées ou publiques, telles que l'agriculture, la pêche, l'industrie, la production d'énergie, les transports, etc. En ce sens, la gestion équilibrée s'apparente à la notion de développement durable, puisqu'elle reconnaît la légitimité des activités humaines dès lors qu'elles ne compromettent pas la préservation des ressources naturelles. Il en résulte des conséquences importantes en terme de techniques juridiques sollicitées : le cadre principal de la "gestion équilibrée" est celui des SDAGE et SAGE, avec une répartition des compétences entre différents acteurs et des processus décisionnel concertés ou négociés. Des instruments dits "volontaires" (contrats, chartes, opérations de type Irrimieux…) peuvent également servir cet objectif.

   Le risque sécheresse est susceptible d'être appréhendé ici comme l'un des enjeux de la gestion de l'eau, qu'il s'agisse d'organiser la répartition des différents usages ou de prévoir des opérations (aménagements, travaux, etc.) en vue de réduire ce risque.

Enfin, le droit français de l'eau reconnaît la validité de **droits sur l'eau**, qu'il s'agisse de droits de propriété ou de droit d'usage[14]. Par ailleurs, les autorités publiques disposent également de droits de propriété ou d'usage pour les eaux relevant du domaine public. Qu'ils appartiennent à une personne publique ou privée, ces droits sont susceptibles d'interférer dans la gestion du risque sécheresse.

Partant de ces constats, l'eau est juridiquement appréhendée comme objet de protection (I), objet de conciliation (II) et objet d'appropriation (III).

L'intérêt de cette présentation en trois points est qu'elle correspond à des approches juridiques distinctes : la première favorise les pouvoirs unilatéraux de la puissance publique fondés sur la protection d'intérêts publics ; la deuxième se caractérise par l'élaboration concertée ou négociée de documents d'orientation, opposables aux autorités publiques, mais également d'instruments juridiques mis en œuvre volontairement par les acteurs privés. Enfin, la reconnaissance de droits privatifs sur l'eau permet d'envisager la gestion de l'eau sous un angle radicalement différent : si les particuliers peuvent exercer des droits d'usage, ils peuvent être également titulaires d'un "droit à l'eau" (accès, qualité, quantité) dont ils peuvent demander la protection à l'encontre d'autres particuliers y portant atteinte, mais aussi à l'encontre des autorités publiques qui n'auraient pas garanti leur droit. Les techniques juridiques, dont le ressort est économique (fiscalité et contrats d'aides en particulier) complètent ces différentes approches juridiques.

1.2.2.1. L'eau objet de protection

La protection de l'eau est d'intérêt général, ce qui signifie que les autorités publiques ont le devoir d'assurer cette protection et disposent des pouvoirs coercitifs nécessaires pour le faire. Plus précisément, dans le domaine de l'eau, l'article L 212-2 dispose que les règles générales de préservation de la qualité et de répartition des eaux (déterminées par décret) fixent :

1. Les normes de qualité et les mesures nécessaires à la restauration et à la préservation de cette qualité en fonction des différents usages de l'eau et de leur cumul ;
2. Les règles de répartition des eaux, de manière à concilier les intérêts des diverses catégories d'utilisateurs ;
3. Les conditions dans lesquelles peuvent être interdit ou réglementé tout fait susceptible d'altérer la qualité des eaux et du milieu, prescrites les mesures nécessaires pour préserver cette qualité et assurer la surveillance des puits et forages, interdit ou réglementé tout produit ou dispositif susceptible de nuire à la qualité du milieu aquatique, et effectués les contrôles par les services de police.

13 Issu de l'article 1er de la loi du 3 janvier 1992 sur l'eau.
14 Notamment, l'article L 210-1 dispose que "l'usage de l'eau appartient à tous dans le cadre des lois et règlements ainsi que des droits antérieurement établis".

En complément de ces règles générales, et afin d'assurer la gestion équilibrée, l'article L 211-3 prévoit que des prescriptions nationales ou particulières à certaines parties du territoire sont également fixées par décret et déterminent les conditions dans lesquelles l'autorité administrative peut :

- **Limiter ou suspendre provisoirement des usages de l'eau**, pour faire face à une menace ou aux conséquences d'accidents, de **sécheresse**, d'inondations ou à un risque de pénurie ;
- Edicter des prescriptions spéciales applicables aux **IOTA** (police spéciale de l'eau).

L'administration, essentiellement l'Etat, dispose donc de pouvoirs (et de devoirs) lui permettant de contrôler les activités susceptibles d'entraîner un risque de sécheresse, en particulier les prélèvements, et d'intervenir en cas de pénurie d'eau (prévention de la sécheresse et réduction des conséquences) (1). Des mesures spécifiques existent, qui concernent également la gestion du risque sécheresse (2).

1.2.2.1.1 Le contrôle des prélèvements

Les prélèvements non domestiques

La loi de 1992 sur l'eau a créé une police de l'eau et des milieux aquatiques, calquée sur le régime des ICPE[15]. L'autorité compétente est le préfet de département. La police de l'eau prévoit une procédure d'autorisation ou de déclaration des IOTA[16] qui entraînent des prélèvements, ou une modification du niveau ou du mode d'écoulement ou encore des rejets. Ces IOTA sont soumis à autorisation ou à déclaration ; dans les deux cas, des prescriptions techniques sont imposées. Les décrets 93-742 et 743 du 29 mars 1993 fixent la liste des IOTA soumis à la police de l'eau et les grandes lignes de la réglementation applicable[17]. Le régime de l'autorisation est le plus lourd puisqu'il prévoit une enquête publique et une étude d'incidence notamment. Il est à noter que l'autorisation ne peut être accordée que si les principes mentionnés à l'article L 211-1 sont respectés (voir jurisprudence infra), qu'elle a une durée de validité limitée et qu'elle peut être retirée ou modifiée, sans indemnisation, dans les cas fixés par l'article L 214-4 II ; par exemple :

- "dans l'intérêt de la salubrité publique" (si nécessaire pour alimentation en eau potable par exemple),
- "en cas de menace majeure pour le milieu aquatique, et notamment lorsque les milieux aquatiques sont soumis à des conditions hydrauliques critiques non compatibles avec leur préservation".

Le <u>régime</u> (autorisation ou déclaration) des prélèvements varie :

- selon la nature des eaux (souterraines, superficielles) ;
- selon la zone (zone de répartition des eaux, cf. infra) déterminée par le préfet et justifiée par un déséquilibre permanent entre ressources et besoins ; les prescriptions applicables relèvent dans ce cas de la rubrique 4.3.0 de la nomenclature ;
- selon le débit mensuel sec de récurrence de 5 ans pour les eaux superficielles (si égal ou supérieur à 5% : autorisation ; si compris entre 2 et 5% : déclaration) ;
- selon que le prélèvement existait ou non avant 1993.

Les <u>prescriptions applicables</u> aux prélèvements permettent en principe une connaissance des volumes d'eau prélevés et une maîtrise plus grande des demandes de prélèvements dans les zones en déséquilibre. Donnons quelques exemples d'obligations résultant des prescriptions et susceptibles de concerner le risque sécheresse :

- moyens de comptage et d'évaluation des volumes,
- compatibilité des volumes et débits avec les SAGE et SDAGE,

15 Installations classées pour la protection de l'environnement. Quant une installation relève de la loi ICPE, la police des ICPE est alors applicable aux prélèvements (ou autre opération concernant les milieux aquatiques) ; dans ce cadre, voir également l'arrêté général du 2 février 1998, dit "arrêté intégré".

16 Installations, ouvrages, travaux, activités, réalisés par toute personne physique ou morale, publique ou privée.

17 Les prélèvements relèvent des rubriques 1.1.1., 2.1.0., 2.3.0 et ont fait l'objet de deux arrêtés du 11 septembre 2003, JO du 12 et d'une circulaire n°7 du 16 mars 2004, BO MEDD n° 9/2004, 15 mai, qui insiste sur les moyens de comptage et d'évaluation des volumes prélevés, la compatibilité des volumes et débits autorisés par rapport aux SDAGE et SAGE.

- obligation de préciser la répartition dans le temps des prélèvements si ils sont irréguliers au long de l'année,
- obligation de fixer un débit et un volume maximum,
- obligation pour l'administration de mettre à jour les arrêtés individuels d'autorisation dans les zones de protection des eaux et dans les bassins où des mesures de restrictions des prélèvements ont été prises (décret 92-1041 du 24 septembre 2002).

En cas de non-respect des dispositions résultant de la police de l'eau, des sanctions pénales et administratives peuvent être prononcées.

En conséquence, depuis la loi sur l'eau de 1992, les services de l'Etat disposent d'un cadre juridique – la police spéciale de l'eau -, leur permettant, en principe, de connaître et de contrôler les activités présentant un risque pour la ressource en eau.

D'autres procédures peuvent s'y ajouter ; c'est le cas de la déclaration d'utilité publique (DUP). Notamment, les prélèvements d'eau effectués dans un but d'intérêt général par une collectivité publique sont soumis à autorisation au titre de la police de l'eau, mais également à une DUP.

Le contrôle du juge administratif

Il peut s'exercer sur les actes individuels délivrés au titre de la police spéciale de l'eau, notamment les autorisations, en quel cas il s'agira d'un contrôle de plein contentieux[18]. Pour apprécier la légalité des actes qui lui sont soumis, le juge se prononce au regard des textes en vigueur. Ce faisant, le juge peut être amené à apprécier la légalité des mesures de police au regard des principes du droit de l'eau, et notamment de la gestion équilibrée et modifier ainsi "l'équilibre" établi par l'administration.

> Ainsi, ne viole pas le principe de gestion équilibrée de la ressource en eau, l'autorisation d'exploiter un forage d'eau souterraine qui ne risque pas de faire disparaître une forêt et dépérir un étang, le niveau des aquifères ayant remonté (TA Strasbourg, 27 juin 1995, n° 881283).

Dans le même sens, l'acte de DUP peut donner lieu à contrôle du juge.

> Par exemple, une DUP portant sur un captage est légale dès lors que les inconvénients allégués, liés à la baisse du débit de la source en certaines périodes exceptionnelles de sécheresse et aux atteintes supposées à l'écologie du site et au développement touristique, ne sont pas excessifs eu égard à l'intérêt que présente l'opération (CAA Lyon, 21 septembre 1999, n° 95LYO1139). En revanche, le juge a censuré une DUP d'un projet de captage d'une source en intégrant dans son contrôle du bilan les objectifs de gestion équilibrée de la ressource ; en l'espèce, le projet contribuait à l'assèchement partiel d'un ruisseau et risquait d'avoir des conséquences graves sur la faune des zones alimentées par le ruisseau, sur les activités agricoles et sur le tourisme (CAA Lyon, 2 mars 2000, n° 95LYO2346).

Le juge administratif peut également "aggraver ou compléter les prescriptions de l'arrêté d'autorisation ou substituer aux règles fixées par le préfet, d'autres prescriptions techniques de nature à assurer la préservation de l'environnement" (CE, 31 mars 2004, n° 250378).

Les prélèvements domestiques

La règle générale est que les prélèvements à usage domestique ou tout prélèvement inférieur ou égal à 40 m^3/jour sont dispensés de toute déclaration ou autorisation au titre de la police de l'eau. Toutefois, un contrôle est parfois possible.

Dans les eaux souterraines :

Lorsqu'une eau souterraine prélevée (puits, captage de sources), est destinée à la consommation humaine une déclaration est obligatoire, pour des raisons sanitaires (RSD).

Le maire peut prendre toute mesure, au titre de ses pouvoirs de police, pour faire cesser le trouble éventuel pour la salubrité résultant d'un captage (L 2212-2 du CGCT).

---

18 Le juge administratif y dispose des pouvoirs les plus étendus ; globalement il peut substituer sa décision à celle de l'administration. Par ailleurs, le délai de recours des tiers est de 4 ans (par comparaison, le délai de droit commun est de 2 mois).

Dans les eaux superficielles :

Dans les cours d'eau non domaniaux : En vertu de son droit d'usage, un riverain peut utiliser l'eau courante, pour tout type d'usage ; si cette eau traverse le fonds, il doit "la rendre, à la sortie de ses fonds, à son cours ordinaire" (article 644 du code civil) cf. infra. Cette disposition est complétée par l'article L 215-1 du code de l'environnement qui dispose que "les riverains n'ont le droit d'user de l'eau courante qui borde ou qui traverse leurs héritages que dans les limites déterminées par la loi. Ils sont tenus de se conformer, dans l'exercice de ce droit, aux dispositions des règlements et des autorisations émanant de l'administration". Autrement dit, l'existence d'un droit d'usage n'affranchit pas son titulaire du respect des règles de police.

Dans les cours d'eau domaniaux : tout prélèvement, même en l'absence d'installation, nécessite une autorisation préfectorale d'occupation du domaine public et de prise d'eau (article 25 et 33 du code du domaine public fluvial).

1.2.2.1.2 En cas de sécheresse ou risque de sécheresse

En application de L 211-3-1, l'administration peut "prendre des mesures de limitation ou de suspension provisoire des usages de l'eau, pour faire face à une menace ou aux conséquences d'accidents, de sécheresse (…), ou à un risque de pénurie"[19]. Ce texte est complété par le décret n° 92-1041 du 24 septembre 1992 relatif à la limitation et à la suspension provisoire des usages de l'eau et a donné lieu à plusieurs circulaires[20].

Ces pouvoirs d'intervention appartiennent au préfet, toutefois les maires peuvent également ordonner des coupures et limiter certains usages non prioritaires (CGCT, L 2212-1 et s.). L'objectif est ici de gérer les situations de pénurie afin d'assurer, notamment, la consommation en eau potable, mais également la préservation des aquasystèmes.

Ces mesures de restrictions peuvent être ponctuelles, et répondre ainsi à une situation d'urgence, ou programmées et inscrites dans un document prévisionnel de gestion de la pénurie, dans le cadre de la définition de "zones d'alerte".

En outre, rappelons que depuis 2003, et l'établissement d'un "Plan sécheresse", l'accent est mis sur les moyens de coordination des restrictions d'usages à l'échelle des bassins versants. En effet, le préfet régional coordonnateur de bassin peut édicter des arrêtés, qui s'imposeront aux préfets de départements.

Les pouvoirs du préfet de département

- **L'institution des "zones d'alerte" ou la gestion programmée de la pénurie**

Il s'agit d'un instrument de gestion de la pénurie de nature à permettre une concertation plus large entre l'administration et les usagers. L'institution de ces zones permet, notamment, aux déclarants ou titulaires d'une autorisation de prélèvement ou de stockage de faire connaître au préfet, leurs besoins réels et leurs besoins prioritaires. Compte tenu de ces données, le préfet établit un document indiquant les seuils prévus d'alerte, les mesures correspondantes et les usages de l'eau de première nécessité à préserver en priorité.

Toutefois, quant à la définition des "zones d'alerte", si le juge reconnaît à l'administration un large pouvoir quant à leur définition[21], il a souligné à plusieurs reprises que leur institution n'avait pas de caractère obligatoire. En outre, le préfet ne peut à ce stade édicter des mesures contraignantes pour les usagers (cf. infra "risque avéré").

---

19 En outre, l'article L 211-8 dispose que "En cas de sécheresse grave mettant en péril l'alimentation en eau potable des populations (…) des dérogations temporaires aux règles fixant les débits réservés des entreprises hydrauliques (…) peuvent être (…) ordonnées par le préfet (…)".

20 Notamment, circ. 16 mars 2004 relative à la gestion quantitative de la ressource en eau et Guide méthodologique des mesures exceptionnelles de limitation et de suspension des usages de l'eau en période de sécheresse, mars 2005.

21 M. Bouclier-Preclaux, La consécration jurisprudentielle des pouvoirs exceptionnels du préfet en matière de restriction des usages de l'eau, Revue de Droit rural, n° 320, février 2004, p. 89 et s.

- **Les mesures de restriction des usages**

Ces mesures, pour être légales, doivent répondre à certaines conditions :

- Elles doivent être **limitées** dans le temps ; à défaut d'une indication de durée ou de la fixation d'une date trop lointaine, les mesures sont illégales (CE 17 janvier 1996, n° 158894). En outre, le préfet est tenu de mettre fin de façon anticipée aux mesures qu'il a prescrites, dès lors que les conditions d'écoulement ou d'approvisionnement redeviennent normales.

- Elles doivent être **proportionnées** et modulées dans le sens d'un renforcement ou d'un allégement en fonction de l'évolution prévisible ou constatée.

  Par exemple, le juge administratif a pu prononcer l'illégalité d'un arrêté préfectoral, en retenant l'erreur manifeste d'appréciation, qui prévoyait des dérogations à l'interdiction des prélèvements, au bénéfice de certaines communes, en raison du risque de tarissement d'une rivière à débit permanent (TA Poitiers, 2 juillet 1997, n° 961464).

- Elles peuvent établir des **différences de traitement** entre les cultures, sans violer le principe d'égalité, sous réserve que ces différences soient justifiées.

  Par exemple, est légale l'exemption de restriction concernant les cultures fruitières, florales, "délicates et peu exigeantes en eau" (CAA Nantes, 27 mai 1998, n° 96NT01717 et 96NT01752), ou les pépiniéristes et maraîchers (CE, 21 février 1997, n° 139504). Sur le principe égalité, voir aussi CE 30 décembre 1998, n° 169361. En revanche, la grande consommation en eau de certaines cultures et l'absence de risque de destruction – mais de simple baisse du rendement productif – justifient que des limitations de prélèvements leur soient imposées (TA Orléans, 28 juin 2001, n° 981066, pour des exploitations agricoles dont l'irrigation nécessitait, en période critique, ¾ des prélèvements effectués).

- En raison de l'importance des pouvoirs dont elle dispose, l'administration ne peut y recourir qu'en cas de **risque avéré**. En effet, des mesures prises sur le fondement de L 211-3-1 en l'absence de menace réelle de sécheresse devraient être considérées comme illégales par le juge administratif. Tout au plus, l'article 2 du décret du 24 septembre 1992 reconnaît-il le droit au préfet d'édicter un arrêté-cadre et de définir des zones d'alerte, sans que des mesures coercitives soient possibles.

En cas **d'absence de telles mesures**, ou de mesures insuffisantes, la **carence** de l'administration peut être retenue.

Par exemple, pour une rivière menacée d'assèchement irréversible en raison du maintien des prélèvements agricoles, TA Orléans, 5 décembre 1995, n° 94-1345.

Il faut noter que de manière générale le **contrôle du juge administratif** saisi est large : il apprécie la pertinence des seuils retenus pour l'alerte, le déclenchement et la portée de ces mesures[22]. Les services du MEDD ont d'ailleurs attiré l'attention des préfets sur la tendance relevée en 2003 des personnes visées par les restrictions à saisir le juge administratif en référé-suspension afin de demander la suspension des arrêtés limitant les usages de l'eau[23].

Enfin, on notera qu'une **action en responsabilité pénale et/ou civile** est également possible à l'encontre d'un exploitant ayant méconnu les circonstances particulières liées à une situation de sécheresse et ayant commis une infraction et/ou causé un dommage.

Pour une pollution des eaux aggravée par la sécheresse, la Cour de cassation a jugé que "la loi fait obligation à l'utilisateur d'adapter son activité – et ses conséquences secondaires – aux conditions climatiques" (Cass. Crim., 16 décembre 1992, n° 91-86-290).

Le rôle du préfet coordonnateur de bassin

L'article 4 du décret du 24 septembre 1992 reconnaît au préfet coordonnateur de bassin le pouvoir de constater, par arrêté, "la nécessité de mesures coordonnées". Dans ce cas, "les préfets de département prennent des arrêtés conformes aux orientations du préfet coordonnateur". Les **juridictions administratives** ont été saisies à de nombreuses reprises afin d'examiner la légalité d'arrêtés des

22 Sironneau J., Prélèvements d'eau en période de pénurie : les pouvoirs contestés du préfet, Droit de l'environnement, 1998, n° 60, p. 17.
23 Dans ce cas toutefois, la preuve du caractère d'urgence de sa situation doit être apportée par le requérant.

préfets coordonnateurs. Le préfet coordonnateur peut, par exemple, décider de mesures de mesures de limitation ou de restriction des prélèvements en eau à des fins d'irrigation, devant être mises en œuvre par le préfet de département ; il peut également prévoir des dérogations à ces mesures (CE, 28 juillet 1999, n° 188741). Compte tenu du risque de pénurie, il peut édicter des mesures préventives "sans attendre que la nappe atteigne un seuil critique" (TA Orléans, 28 mai 1998, n° 971108, 971207, 971638).

En ce qui concerne les modalités d'exercice de ces pouvoirs, "aucune disposition législative ou réglementaire n'impose au préfet d'organiser une concertation avec les organisations professionnelles", ni de procéder au préalable à l'institution de "zones d'alerte" (TA Orléans, 28 mai 1998, n° 971108, 971207, 971638).

Enfin, il apparaît que à partir du moment où un arrêté départemental applique les mesures d'orientation définies par le préfet coordonnateur, le juge tend à conclure à sa légalité[24].

1.2.2.1.3 Dispositions spécifiques

Les zones de répartition des eaux (L 211-2 et 211-3).

Textes : Les règles de répartition sont fixées par décret (décret modifié 94-354 du 29 avril 1994, JO du 6 mai). Voir également circulaire du 15 septembre 2003, non publiée. Sur l'information du public, circulaire n° 94-53 du 16 juin 1994, BO n° 929-94/19 du 20 juillet.

Ces zones sont définies en cas d'insuffisance autre qu'exceptionnelle des ressources en eau par rapport aux besoins. Elles ont pour but de concilier les intérêts des différentes catégories d'usagers. La délimitation de ces zones fait l'objet d'un arrêté préfectoral qui fixe la liste des communes incluses. Cette délimitation doit être faite dans un but de simplification, c'est-à-dire que les communes doivent être incluses ou exclues en totalité. Des procédures particulières sont prévues (simplifiée si temporaire ou en cas de regroupement de demandes).

Dès lors qu'un ouvrage permet un prélèvement dans ces zones, il est soumis à autorisation ou déclaration, au titre de la police de l'eau, et relève de la rubrique 4-3-0 de la nomenclature eau.

> Exemples de dispositions applicables aux **ouvrages hydroélectriques** (loi du 16 octobre 1919) et concernant le sujet :
> Un débit minimal doit être assuré afin de garantir en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces. L 432-5 JP : CE, 23 mars 1998, n° 158591 relatif au débit minimal ; CE 10 février 1995, n° 108340, autorisation refusée pour une micro centrale dont le fonctionnement ne permettait pas un débit suffisant.
> En cas de sécheresse grave, mettant en péril l'alimentation en eau potable, des dérogations temporaires (non indemnisées) aux débits réservés peuvent être édictées par le préfet (L 211-8).

1.2.2.2 L'eau objet de conciliation

1.2.2.2.1 La notion de "gestion équilibrée"

Le principe de la "**gestion équilibrée**" est posé par l'article L 211-1[25]. Aux termes de ce texte, la "gestion équilibrée de la ressource en eau" vise à assurer :

1. la préservation des écosystèmes aquatiques, des sites et des zones humides (…),
2. la protection des eaux et la lutte contre toute pollution (…),
3. la restauration de la qualité des eaux et leur régénération,
4. le développement et la protection de la ressource en eau,
5. la valorisation de l'eau comme ressource économique et la répartition de cette ressource.

La rédaction du texte de loi français indiquerait une hiérarchisation des intérêts visés par la notion de gestion équilibrée, puisque la préservation de l'eau en tant que milieu naturel figure dans les objectifs

24 M. Bouclier-Precloux, article déjà cité, spé. p. 94.
25 Issu de l'article 1er de la loi du 3 janvier 1992 sur l'eau.

placés en premier, tandis que la valorisation de l'eau comme ressource économique figure en dernier. La DCE confirme d'ailleurs une interprétation en ce sens, puisque son article 1er vise, dans l'ordre, "la prévention de toute dégradation supplémentaire, la préservation et l'amélioration de l'état des écosystèmes aquatiques (…), la promotion d'une utilisation durable de l'eau, fondée sur la protection à long terme des ressources en eau disponibles (…), ainsi que l'atténuation "des effets des inondations et des sécheresses" ; en raison de ces objectifs, la DCE "contribue ainsi à assurer un approvisionnement suffisant (…) pour les besoins d'une utilisation durable, équilibrée et équitable de l'eau". En conséquence, "en droit communautaire, la protection écologique des milieux est assurément première, et fonde le principe de gestion équilibrée puisqu'elle est garante d'une gestion optimale de tous les usages de l'eau. Seuls des impératifs de santé publique et de sécurité civile semblent pouvoir justifier une dérogation limitée (art. 4.7 c) de la directive cadre"[26].

Néanmoins, selon l'article L 211-1 II, "la gestion équilibrée doit permettre de satisfaire ou concilier, lors des différents usages, activités ou travaux, les exigences :

1. de la santé, de la salubrité publique, de la sécurité civile et de l'alimentation en eau potable de la population,
2. de la vie biologique du milieu récepteur (…),
3. de la conservation et du libre écoulement des eaux et de la protection contre les inondations,
4. de l'agriculture, des pêches et des cultures marines, de la pêche en eau douce, de l'industrie, de la production d'énergie, des transports, du tourisme, de la protection des sites, des loisirs et des sports nautiques ainsi que de toutes autres activités humaines légalement exercées".

Une nouvelle fois, les "exigences" de la santé publique figurent en tête de liste, confirmant, qu'en termes d'usage, la consommation en eau potable notamment, est prioritaire. Néanmoins, la loi française fixe comme objectif à la gestion équilibrée de satisfaire ou de concilier les "exigences" des différents usages de l'eau, parmi lesquels ceux résultant d'activités agricoles dès lors qu'elles sont légalement exercées. Autrement dit, les autorités publiques doivent permettrent l'exercice d'une activité économique "exigeant" l'usage de l'eau. En ce sens, l'usage agricole de l'eau - mais pas seulement – est perçu moins comme une source d'atteinte potentielle à la ressource en eau, que comme un intérêt que les autorités publiques ont le devoir de satisfaire ou de concilier avec les autres.

Dès lors les instruments juridiques sollicités - et pour grande partie mis en place par la loi de 1992 sur l'eau - se caractérisent par la concertation ou la négociation entre les différents représentants des intérêts énumérés par la loi. De ce point de vue, les Agences de l'eau et le mode d'élaboration des SDAGE et des SAGE apparaissent a priori pertinents.

Les instruments de planification : les SDAGE et SAGE

La planification de la gestion de la ressource en eau est une nouveauté de la loi de 1992, dans la mesure où les dispositifs antérieurs ne présentaient pas de caractère contraignant[27]. Les textes de référence sont les articles L 212-1 et s.

Les modes d'élaboration et le contenu des SDAGE et SAGE étant traités par ailleurs, la question qui sera abordée ici est celle de la valeur juridique des SDAGE et SAGE[28].

Les "décisions et programmes dans le domaine de l'eau"[29] et, depuis la loi du 21 avril 2004 transposant la DCE, les documents d'urbanisme[30] doivent être compatibles ou rendus compatibles avec les SDAGE et les SAGE. Ce rapport de compatibilité est entendu par la jurisprudence comme l'absence de contrariété substantielle[31].

26BOYER P., Transposition de la directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, Environnement n° 6, Juin 2004, comm. 61.
27 Circulaire du 19 juillet 1978 prévoyant l'élaboration de SAGE, BOE, 1979, n°314. Voir également Le Moal, déjà cité, p. 461, sur les différents avatars des SDAGE et SAGE.
28 Voir le guide, Portée juridique et rédaction des SAGE, sept. 2003, MEDD.
29 Voir liste in circ. 15/10/92.
30 SCOT, PLU et cartes communales.
31 P. Boyer, L'électricité ne coule pas de source, Droit de l'environnement, n° 109, juin 2003, p. 109.

Pour les autres, depuis 2004, ils doivent simplement "prendre en compte" les SAGE[32].

Le contrôle de la "compatibilité" et de la "prise en compte" a donné lieu à une **jurisprudence administrative** :

- Le juge administratif vérifie le respect des **principes du droit environnement** dont celui de précaution (TA Lilles, 19 avril 2000)[33].

- Annulation d'une autorisation d'un barrage, dont la DUP était annulée, au motif que le SDAGE Loire-Bretagne n'autorise que les barrages d'importance significative ayant fait l'objet d'une DUP (CE, 9 avril 2004, n° 243566).

- Annulation d'un arrêté autorisant des travaux hydrauliques liés à projet d'aménagement d'une route, et conduisant au remblaiement de zones humides protégées, en raison de son incompatibilité avec le SDAGE (TA Rennes, 10 avril 2003, n° 01-3877).

- Annulation d'une autorisation de travaux sur un cours d'eau, en raison de l'incompatibilité de son document d'incidence avec le SDAGE (TA Dijon, 16 décembre 2003, n° 020136).

- Validation d'une autorisation d'une opération de dragage du lit de la Saône, l'autorisation "ayant pris en considération" les objectifs du SDAGE (CE, 8 novembre 1999, n° 197568). Toutefois, cette décision est critiquable en droit.

Sur la jurisprudence administrative, on notera que les textes - issus de la loi de 1992 sur l'eau notamment - auxquels se réfèrent le juge pour opérer son contrôle, prévoient la protection de la ressource en eau et la préservation des écosystèmes ; en conséquence, l'issue des contentieux est conforme à ces objectifs.

1.2.2.3 L'eau objet d'appropriation

Des droits privés de propriété ou d'usage s'appliquent à certaines eaux. Toutefois, l'existence de droits privés ne fait pas obstacle à ce que des règles de police s'appliquent quant à l'usage qui est fait de ces eaux par les titulaires de droits (obligation d'autorisation ou déclaration des captages, restriction des usages, etc.). Qu'il y ait ou non un droit sur l'eau, les prélèvements sont soumis à la réglementation (cf. supra). L'existence d'un droit privatif peut jouer en cas d'expropriation de ce droit (indemnisation) ou en cas de dommage résultant de l'exercice de ce droit (l'abus, dont les conditions sont restrictives, devra être constitué pour fonder le droit à indemnisation de la victime). En revanche, reconnaître à chacun l'existence d'un "droit à l'eau", peut constituer une voie intéressante, complémentaire des instruments existants, pour assurer l'effectivité des mesures de lutte contre la pollution et le risque de sécheresse.

1.2.2.3.1 L'appropriation privée

L'affirmation législative selon laquelle l'eau fait partie "du patrimoine commun de la nation" et son usage "appartient à tous", est dépourvue de conséquences juridiques directes ; en particulier, elle ne remet pas en cause le régime des eaux prévu par le code civil, qui prévoit que certaines eaux font l'objet d'un droit de propriété ou d'usage. L'existence d'un droit d'usage fait qu'en cas de préjudice, les conditions de l'abus de droit doivent être réunies, celles-ci étant considérablement plus restrictives que le droit commun de la responsabilité civile[34].

- **Les eaux de pluie** quant à elles peuvent être regardées comme des *res nullius* qui appartiennent au propriétaire du fonds sur lequel elles atterrissent. Celui-ci peut alors en user et en disposer à sa guise (art. 641 CC).

- **Les eaux de source** appartiennent pareillement au propriétaire du sol sur lequel elles jaillissent (art. 642, al. 1 CC). Par extension et en combinant les articles 642 et 552 (propriété du dessous) du

32 Voir rép. Min. n°43164, JOANQ, 15 fév. 05

33 Toutefois, l'application du principe de précaution dans cette espèce, est sujette à critique, voir D.Deharbe, AJDA sept. 2000, p. 751 et s.

34 Exemple d'un abus du droit d'usage de l'eau : Cass. 3° ch. civ., 21/02/01, n° 98-21.352, Loiseau et al.

CC, il a été admis que le propriétaire puisse capter sur son fonds, non seulement les eaux d'une source qui y prend naissance, mais aussi les eaux souterraines qui s'y infiltrent et ce, quel que soit le dommage qui en résulte pour les propriétaires des fonds inférieurs[35]. Toutefois, des mesures existent pour préserver la qualité de l'eau et assurer notamment la surveillance des puits et forages ; c'est donc sous réserve du respect de ces lois de police, que le propriétaire du fonds peut user et disposer de ces eaux.

Les seules limites apportées par le droit privé aux prérogatives du propriétaire sont énoncées dans les articles 642, al. 2 et 3 et 643 du CC.
L'article 642, al. 2 reconnaît aux propriétaires des fonds inférieurs le droit de s'opposer à la captation de l'eau, si par contrat ou par prescription acquisitive (30 ans) renforcée par l'édification d'ouvrages "apparents et permanents", ils ont acquis un droit sur l'eau.
L'alinéa 3 du même article dispose, quant à lui, que le propriétaire doit également tenir compte dans l'usage qu'il fait de cette eau, des besoins des habitants d'une commune, d'un village ou d'un hameau. Toutefois, si ces mêmes habitants n'ont pas acquis ou prescrit l'usage de l'eau, le propriétaire peut réclamer une indemnité qui, faute d'accord, sera fixée par expert.
Enfin, l'article 643 prévoit que si les eaux qui surgissent forment un cours d'eau offrant le caractère d'eaux publiques et courantes, les droits du propriétaire du fonds sont pareillement limités au profit des usagers inférieurs.

Autrement dit, **le droit privatif de propriété sur une eau cède devant la nécessité collective** d'utiliser cette eau.

> Par exemple, ce droit ne fait pas obstacle à ce qu'un préfet autorise une dérivation d'une partie des eaux souterraines situées en amont et destinées à assurer l'alimentation en eau potable des populations, (CAA Nancy, 5 août 2004, n° 00NC00640, GAEC de la Grosse roche).

- **Les étangs et les lacs** obéissent pour leur part à des régimes différents qui tiennent compte de leur mode d'alimentation et/ou de leur communication avec la mer. Les étangs salés communiquant avec la mer font partie du domaine public, mais que la communication cesse et ils redeviendront objet de propriété privée. Quant aux lacs et étangs d'eau douce, ils sont soumis au régime des eaux courantes s'ils sont alimentés par un cours d'eau, mais relèvent de la propriété privée du titulaire du fonds sur lequel ils se trouvent s'ils ne sont alimentés que par des eaux de source ou des eaux pluviales.

- **Les eaux courantes** étaient peu prises en considération par le droit privé, le code civil ne leur consacrant que deux articles (art. 644 et 645 CC). C'est dire que dès l'origine la dimension publique de ces eaux était affirmée. Elle n'a fait que croître en 1898, 1919, 1964 et 1992. Les eaux courantes non domaniales ne font l'objet que d'un droit d'usage. Ce sont des *res communes* dont on peut user, mais qui doivent être rendues, à la sortie du fonds, à leur "cours ordinaire". Quant au lit du cours d'eau non domanial, il appartient aux propriétaires riverains, le partage s'effectuant en traçant une ligne médiane au milieu du cours d'eau. Ce droit de propriété donne au propriétaire le droit d'en extraire des sables, des graviers ou de la vase, mais ces activités sont elles aussi étroitement réglementées. Selon certains auteurs, il donne aussi au propriétaire le droit d'interdire l'usage de l'eau sur la portion de lit objet de son droit, celui-ci n'apparaissant plus alors que comme une simple tolérance[36]. En revanche, les riverains sont responsables de l'entretien des cours d'eau non domaniaux.

La reconnaissance d'un droit subjectif[37] à l'eau

Il faut rappeler que le régime de droit privé de l'eau ne concerne que les propriétaires (ou leurs ayants droits) de terrains jouxtant un cours, un plan d'eau ou une source ; autrement dit, le droit sur l'eau est toujours accessoire à un droit sur le sol. Pour le reste si la loi dispose que "l'usage de l'eau appartient à tous", cette formule n'a pas d'effets juridiques. En effet, l'usage de l'eau ne repose pas sur un droit dont chacun serait titulaire, mais sur une liberté ou des tolérances conférées par le système juridique. Actuellement, il n'existe pas de "droit à l'eau" dont chacun serait titulaire et qui pourrait fonder une

35 J.B. Seube, Droit des biens, coll. Objectif Droit, Litec 2004, p. 68, n° 172.
36 Voir par exemple, F. Terre, P. Simler, Droit des biens, Dalloz, n° 220 et s.
37 Prérogative attribuée à un individu lui permettant de jouir d'une chose, d'une valeur ou d'exiger d'autrui une prestation.

action en cas de pénurie d'eau imputable à une mauvaise gestion collective ou à l'activité d'une personne privée. En revanche, la loi française reconnaît l'existence du "droit de chacun à un environnement sain" ; la Charte constitutionnelle reconnaît le "droit de chacun de vivre dans un environnement équilibré[38] et respectueux de la santé". Pour autant, la question de savoir s'il s'agit d'un vrai droit subjectif, à l'instar des droits de l'homme 1re génération (par exemple, droit à l'intégrité physique, droit à un procès équitable, etc.), ou d'un simple "droit-créance" à l'égard de l'Etat, est débattue[39].

1.2.2.3.2 L'appropriation publique (les eaux relevant du domaine public)

Aux termes de l'article 538 C.civ., les eaux concernées par cette qualification sont les voies, lacs et canaux navigables, ainsi que les eaux nécessaires à différents usages tels que l'agriculture, l'industrie ou l'alimentation. Dans ce cas l'Etat pourra intervenir pour faire respecter l'affectation publique de ces eaux. En outre, le droit de propriété et d'usage appartenant à l'Etat, il peut accorder des concessions, subordonnées au paiement d'une redevance (C.dom.pub.flu., art. 28 à 34 et 53 à 57) en cas d'ouvrages ou d'opérations sur l'eau.

Aux pouvoirs de police des pouvoirs publics et à la définition et mise en œuvre d'une gestion équilibrée, s'ajoute les prérogatives d'un propriétaire, qui a le droit d'exploiter son bien (concession) et celui de l'affecter à un usage spécifique.

Enfin, il faut ajouter que les infractions aux textes assurant la protection du domaine public obéissent à un régime particulier : celui des infractions de grande voirie, qui présente des caractéristiques favorables à la protection de l'environnement[40].

38 Cette expression recouvre le maintien de la diversité biologique et de l'équilibre des espaces et milieux naturels, le bon fonctionnement des écosystèmes et un faible niveau de pollution.

39 Lire par exemple Cans C., La Charte constitutionnelle de l'environnement : évolution ou révolution du droit français de l'environnement, Droit de l'environnement, n° 131, septembre 2005, pp. 194-203.

40 Lecarpentier, La protection des cours d'eau domaniaux au moyen de la contravention de grande voirie, *RJ Env. 2004, n° sp. 169.*

1.2.3. Les dispositifs et les acteurs de l'eau

La gestion de l'eau en France fait intervenir une multitude d'acteurs aux compétences enchevêtrées. Cette situation, qui n'est pas propre à notre pays, est le fruit de multiples facteurs historiques, géographiques, juridiques, économiques et socio-politiques. C'est ainsi que la distinction entre cours d'eau domaniaux et non domaniaux, et leurs pouvoirs de police associés, fait écho aux conflits récurrents ayant opposé par le passé l'administration royale aux Municipalités, Parlements et Seigneuries à propos de droits de passage ou de péage en rivières tout au long de l'Ancien Régime. Les lois de décentralisation ont eu historiquement pour conséquence de renforcer le pouvoir de certains acteurs, comme les maires, tout en créant des compétences nouvelles, parfois plus de fait que de droit, au travers d'engagements financiers, généralement au bénéfice des collectivités territoriales, départements ou régions.

A cet enchevêtrement (ou stratification) historique répond un même enchevêtrement géographique, puisque se superposent continuités hydrographiques (les bassins versants, les rivières, les nappes souterraines éventuellement transfrontalières comme la nappe d'Alsace), jeu des solidarités territoriales : districts, intercommunalités, voire pays, logiques d'acteurs issues des découpages administratifs des collectivités territoriales, et relations croisées des niveaux nationaux et européen.

La même remarque s'applique aux usagers et aux acteurs économiques. Certains ont pu bénéficier historiquement de droits particuliers (et donc de réglementations particulières), comme les industriels producteurs d'électricité, sous la forme de régimes spéciaux de concession dont a hérité EDF après la nationalisation de 1947. Mais même les industriels soumis au même régime des installations classées peuvent être de statut différent selon qu'ils sont, ou non, raccordés à un réseau de distribution d'eau potable. Les industriels raccordés sont de fait assimilés à des consommateurs d'eau potable, au même titre que les ménages, et se voient appliquer leur régime de redevances et de facturation par les collectivités locales. Certaines activités de services public sont par contre exemptées du prix de l'eau : les hôpitaux, les écoles communales (mais pas les collèges et les lycées), les services de lutte contre les incendies, les services d'entretien des voiries et espaces verts (si ceux-ci sont réalisés en régie communale). Les acteurs économiques publics et privés sont donc soumis à une multitude de régimes d'exception ou d'assimilation, sans réelle correspondance vis-à-vis de la nature ou de l'importance de leurs usages de l'eau ou de leurs effets sur l'environnement. Surcroît de complexité, le contrôle de l'exercice des droits d'usage dans ces différents régimes relève de la compétence d'acteurs publics variés, parfois peu coordonnés entre eux.

Il est donc extrêmement difficile d'offrir une vision synthétique des acteurs de l'eau en France ainsi que de leurs domaines de compétences ou rôles respectifs dans la gestion de la ressource. On adoptera une approche "descendante" relativement plus simple à exposer.

1.2.3.1. Les acteurs de l'eau : rôle de l'Etat

Au niveau territorial le plus englobant, on trouve la Commission européenne. Les responsabilités sont elles-mêmes partagées à ce niveau (il n'existe pas de commissaire européen à l'eau) mais on ne détaillera pas la répartition des rôles des acteurs au sein de la Commission. La Commission, sous couvert des Etats et du Parlement Européen, édicte des directives, textes de droit communautaire transcrites ensuite dans les droits nationaux. L'Union Européenne a rédigé de nombreuses directives concernant l'eau depuis vingt cinq ans, les plus importantes étant probablement les directives "nitrates" et "eaux résiduaires urbaines". Les critiques devant la multiplication de directives particulières et la fragilité juridique de l'édifice résultant ont poussé l'Europe à rassembler et à renforcer son appareil réglementaire dans une directive cadre unique, la DCE. Cette directive, qui concerne les eaux superficielles, est complétée par une directive "fille" sur les eaux souterraines.

L'esprit de ces directives est essentiellement normatif. Elles fixent un ensemble de normes de qualité et de disponibilité des eaux dans les milieux naturels, commune à l'ensemble des Etats membres. Pour la mise en application des normes, l'Union s'appuie sur le principe de subsidiarité en délégant aux

Etats et à ses Agences la conduite de la mise en œuvre de la directive sur leurs territoires de compétence. Les directives édictent néanmoins un certain nombre d'obligations ou de recommandations en matière de gouvernance de l'eau : gestion collective associant les acteurs locaux et les porteurs d'enjeux à l'échelle de districts hydrographiques, principes économiques de "récupération des coûts" et approche "coût-efficacité" en matière de décisions d'investissements, application du principe "pollueur-payeur".

A l'échelon national, la gouvernance de l'eau relève principalement de la compétence du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD). Mais il n'est pas seul en charge de la gestion nationale de l'eau et il partage un certain nombre de compétences avec d'autres ministères (agriculture, équipement, santé et industrie pour l'essentiel), le tout sous le contrôle du ministère des finances. Il en résulte que de nombreuses questions ayant trait à l'eau sont traitées à l'échelon interministériel. C'est le MEDD qui a, au travers de la Direction de l'Eau, la tutelle des six Agences de l'Eau. Il intervient également directement en région par l'intermédiaire des DIREN.

A l'échelon local, c'est le Préfet de département qui concentre entre ses mains l'essentiel des pouvoirs de police des eaux en s'appuyant sur les services déconcentrés de l'Etat (regroupés dans les MISE). Les DRIRE (qui relèvent du Secrétariat à l'Industrie) ont en charge les installations classées (industries) et surveillent donc l'application des normes de rejets polluants dans les eaux. Elles surveillent également l'état des eaux souterraines. Les DDASS (services de la Santé) jouent le même rôle de surveillance quant à la salubrité des eaux destinées à la consommation humaine (distribution communale, eaux minérales), les activités des établissements thermaux ou de thalassothérapie, certains équipements publics de loisir (piscines publiques), les eaux de baignade (stations balnéaires, lacs et rivières). Les DDE (services de l'Equipement) gèrent les cours d'eau domaniaux et ont en particulier compétence sur les activités de batellerie commerciale ou de plaisance, en coordination avec Voies Navigables de France (VNF), établissement public responsable de l'activité de transport sur les voies d'eau. Les DDE contrôlent les activités des extracteurs de granulats en rivière ainsi que le respect des droits de concession du domaine public par EDF. Les DDE ont aussi pour rôle de faire respecter les normes de salubrité dans les cours d'eau et de contrôler les rejets des collectivités urbaines. Les DDA ont la responsabilité des cours d'eau non domaniaux (généralement de petits cours d'eau non navigables) et jouent un rôle majeur en matière d'hydraulique agricole : retenues collinaires, autorisations de pompages agricoles en nappes ou en rivières, drainage. Les DDA, services de l'Agriculture (mais aussi les DRAF) ont également des pouvoirs d'initiative et de contrainte en ce qui concerne l'organisation locale des usagers, par la création d'ASA, de syndicats de riverains ou de syndicats de propriétaires fonciers (pour les zones humides en particulier). Ces directions interviennent également pour le contrôle des activités d'aquaculture, ainsi que de pêche commerciale et de loisir (dans ce dernier cas en coordination avec le Conseil Supérieur de la Pêche, CSP, et ses déclinaisons locales). Enfin, pour être complets, rappelons que les activités économiques en bordure de littoral (ostréiculture, conchyliculture, exploitation de marais salants, lagunes et marais littoraux) relèvent de la compétence de police de la DGN (Direction générale de la navigation, en charge du domaine maritime et côtier). L'aspect multiforme des problèmes de police ou de gestion publique de l'eau amène généralement ces différents services à travailler de manière étroitement coordonnée, en matière de procédures d'autorisation en particulier.

C'est à l'échelon des préfets de département que sont prises les décisions de restriction d'usage de l'eau en situation de sécheresse. A cet effet, les préfets constituent généralement des cellules de crise rassemblant ses directions de services, des usagers, des élus ainsi que des experts afin d'établir des zonages et des mesures de restrictions par catégories d'usage. Prises sous forme d'arrêtés temporaires, ces dispositions priment momentanément sur l'exercice normal des droits d'accès à l'eau des usagers.

1.2.3.2. Les acteurs locaux

Les Agences de l'Eau sont les acteurs essentiels de la gouvernance territoriale de l'eau en France. A l'origine "Agences financières de bassin", elles ont vu leur rôle renforcé depuis quinze ans, devenant peu à peu les pivots de l'action collective en matière de protection de la ressource et des milieux

associés. La gouvernance des Agences de l'Eau s'organise autour d'un directeur, nommé par le ministère, d'un Conseil d'Administration, rassemblant représentants de l'administration, élus et représentants professionnels (industrie, agriculture), dont le Président est nommé pour deux ans par le ministère, et d'un Comité de Bassin, parfois appelé "Parlement de l'eau", organe décisionnel beaucoup plus large puisque rassemblant, outre les élus et des représentants professionnels, différents acteurs issus du monde associatif représentant les usagers ou la défense des milieux naturels. Son président est élu en son sein. C'est le comité de bassin, sur proposition du directeur et du CA qui décide des redevances appliquées aux usagers et des modalités générales d'attribution des aides financières des Agences aux industriels, aux collectivités et éventuellement aux agriculteurs.

Originellement organisée autour de plans quinquennaux d'intervention, la politique des Agences est maintenant structurée autour des SDAGE *(Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux)*, plans généraux à 20 ans, appelés à devenir les outils principaux de pilotage des actions des Agences dans le contexte de la DCE. La mise en place de la DCE a par ailleurs conduit au développement de délégations locales des agences et à la mise en place de commissions territoriales, rassemblant les parties prenantes sur des masses d'eau, en charge de la fixation des objectifs et du suivi de la mise en œuvre des SDAGE à l'échelon local.

Les SDAGE, documents programmatiques, sont complétés à l'échelon plus local par des SAGE *(Schémas d'aménagement et de gestion des eaux)*. Mis en place par les CLE *(Commissions locales de l'eau)*, les SAGE, conclus pour cinq ans et éventuellement validés par les préfets, ont pour vocation d'organiser le partage de la ressource à l'échelon de petits bassins versants. Leur statut les rapproche des Plan d'Occupation des Sols communaux, étant (sous réserve d'entérinement par le Préfet) opposables aux tiers.

La loi sur l'eau de 1964 prévoyait la mise ne place d'une gouvernance de l'eau construite autour d'un triptyque composé de l'Etat, des Agences et d'établissements publics de bassin, les EPTB (Valiron, 1998). Ces derniers n'ont réellement pris de l'importance qu'à la fin des années 90. Ils rassemblent des collectivités territoriales autour d'objectifs communs d'aménagement ou de protection de la ressource. Les EPTB sont devenus des interlocuteurs privilégiés des Agences à partir de la décennie 2000.

Les sociétés d'aménagement régional (SAR) et les associations syndicales autorisées (ASA), structures publiques opérant sous concession d'Etat jouent un rôle opérationnel majeur en matière de gestion de la ressource en eau, en particulier en matière agricole. Elles ont beaucoup contribué par le passé aux aménagements hydrauliques ayant permis le développement de l'irrigation au sud de la Loire.

Plus récemment, les lois de décentralisation ont accentué le rôle des Conseils Généraux et des Conseils Régionaux en matière de compétences, surtout financières, sur l'eau (rapport Miquel). Ce rôle accru est en fait une conséquence logique de la place prépondérante accordée aux maires par la loi de 1981 en matière de gestion de l'alimentation en eau potable des populations, de protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine et d'assainissement des rejets des agglomérations.

A ces acteurs publics, il convient d'ajouter des acteurs industriels de statut privé ou public ayant aussi un rôle très important dans l'utilisation de la ressource en eau. Les acteurs privés majeurs sont les compagnies de distribution. Groupes industriels multinationaux, les opérateurs de distribution ont su constituer depuis plus d'un siècle un modèle original de délégation de service public, aujourd'hui largement mondialisé. Opérant comme fermiers des collectivités, ces industriels, responsables de la qualité de l'approvisionnement en eau potable, sont à plusieurs reprises intervenus pour sauvegarder la qualité de la ressource brute. Un autre acteur industriel majeur dans le domaine de l'eau est EDF. Responsable de l'organisation de l'hydroélectricité en France, EDF a, par des conventions de lâchers d'eau avec des EPTB, étendu son rôle à l'appui aux approvisionnements en eau en période d'étiage. Ce rôle est aujourd'hui compliqué par le contexte énergétique récent (développement des énergies renouvelables, hausse des prix du pétrole et du gaz), dont une conséquence logique sera le renchérissement du soutien d'étiage en été dans les bassins déficitaires.

L'encadré suivant illustre cette complexité.

Encadré 2. Les acteurs de l'eau en France

La mise en œuvre de la gestion de l'eau passe par l'utilisation d'outils très divers

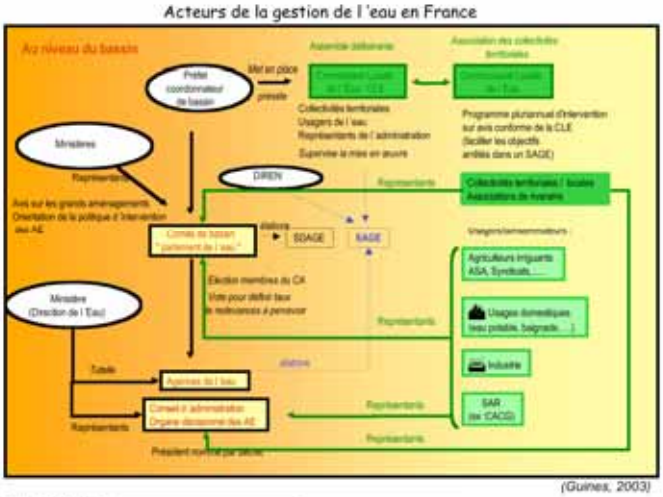
Type d'outil		Élaboration / Approbation ou avis
mesure	débitmètres et piézomètres	DIREN, SAR
	compteurs	MISE, SAR, ASA
réglementaire	SDAGE	Comité de Bassin / Préfet de Région
	SAGE	Agence de l'eau et DIREN
	zone de répartition, zone d'alerte	Préfet
	mesures de restriction	Préfet
technique	création de ressources nouvelles	
	I. barrages	Elus / Préfet
	II. réserve de substitution	Agriculteurs / DDAF
	tableaux de bord de la ressource en eau	SAR ou EPTB
contractuel	PGE	EPTB ou SAR / Etat, élus, usagers
	système de gestion volumétrique	Agriculteurs / DDAF
	contrats de restitution/autorisation de prélèvements	MISE, ou SAR par délégation
économique	tarification	SAR
	redevances	Agence de l'Eau
	aides	Etat, collectivités territoriales, etc.

La gestion de l'eau en France: acteurs et outils

A chaque niveau, la gestion de l'eau relève d'interrelations complexes entre les acteurs impliqués

Le tableau ci-dessous est une tentative de vision simplifiée de l'organisation française

Acteurs de la gestion de l'eau en France



(Guines, 2003)

Echelle spatiale	*Acteur gestionnaire*	*Objectifs/Mission*
Exploitation agricole	Agriculteur	**objectifs d'entreprise et de ménage**, liberté de choix sous contraintes d'environnement socio-économique et réglementaire.
Petits périmètres irrigués	Associations d'agriculteurs (ASA)	**gestion opérationnelle** associative de l'eau
Grands périmètres irrigués	Sociétés d'Aménagement Régional (SAR)	**gestion opérationnelle** pour les divers usages de l'eau, maîtrise et gestion d'ouvrage
Rivière ou bassin versant	Etablissement Public Territoriaux de Bassin (EPTB)	missions diverses suivant les EPTB dont **gestion opérationnelle**
Bassin hydrographique	Comité de Bassin	**définition de politiques** et **mission de planification** (SDAGE)
Département	Préfet / DDA	**autorité et police administrative** : établissement des règlements en tenant compte des consensus, contrôle de leur bonne application par tous.
Région	Préfet de Région/ DRAF, DIREN / Comité technique de l'eau	**mise en œuvre des politiques** (Loi sur l'Eau, PAC)
Etat	Ministère (Direction de l'Eau)	**définition de politiques**

On peut considérer l'agriculteur comme (i) un usager d'une ressource partagée (au même titre que les industries ou les collectivités locales) ou (ii) un gestionnaire (qui gère l'eau mise à sa disposition entre ses différentes parcelles et dans le temps pour produire du rendement.

Il s'agit ici de politiques ayant trait à la gestion de la ressource (loi sur l'eau de 1992, directive-cadre sur l'eau), à distinguer de celles qui, de fait, concernent l'eau (PAC à travers les primes à l'irrigation par ex)

1.2.4. Territoires et acteurs

La mise en œuvre conjointe en France de la directive cadre européenne (DCE)[41], de "l'acte II" de la Décentralisation et de la Charte de l'environnement renforce considérablement une tendance déjà ancienne à la territorialisation de la politique de l'eau. Le territoire acquiert un nouveau statut, celui de concept opératoire aussi bien dans le domaine de l'aménagement du territoire que dans celui de la gestion de l'eau. Aujourd'hui, gage de l'adaptation de ces politiques aux contextes et aux enjeux locaux et cherchant la mise en cohérence de l'action publique, la territorialisation est censée par cette proximité favoriser la démocratie locale à cette échelle et assurer l'efficacité sociale et économique des politiques engagées. Cependant, la politique de l'eau doit, dans le cadre de ces outils de planification et de gestion, faire face à une difficulté de taille concernant deux de ces objets principaux. Les cours d'eau relèvent de la catégorie d'un bien affecté (les cours d'eau domaniaux et non domaniaux) et les eaux courantes, d'une chose commune. Écartelés entre ces deux catégories juridiques, l'usage et la gestion des cours d'eau oscillent statutairement entre deux vocations, l'une économique l'autre sociale, souvent très difficilement conciliables, ce que la pratique de l'irrigation et ses conséquences en été illustrent parfaitement. Ainsi, alors que la politique de l'eau tente de se territorialiser, les cours d'eau, objet de protection, de conciliation et d'appropriation apparaissent comme des espaces fragmentés, fractionnés, où se déploient des acteurs, des institutions et des activités (plus ou moins liés à l'eau) concurrents dans l'utilisation de leurs ressources. Ce premier constat ne manque pas d'interroger la pertinence de l'approche territoriale. Constitue-t-elle un remède à cette fragmentation ? Participe-t-elle à l'accentuation de ce phénomène ou alors préfigure-t-elle un processus de différenciation territoriale ? Se posent alors des questions de légitimité et de place des usages les uns par rapport aux autres. Cette dynamique est particulièrement vive en milieu rural où l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation et ses conséquences environnementales sont remises en cause par d'autres usages/usagers.

De nombreuses fonctions accompagnent la requalification des espaces ruraux et notamment la fonction environnementale qui caractérise bien leur évolution et les enjeux qui leur sont liés. Cette dernière témoigne d'un élargissement des fonctions attribuées aux espaces ruraux tournés traditionnellement vers les activités de production et de consommation. Fonctions de production, résidentielle, de loisir ou encore de protection, autant d'éléments qui concourent à placer la gestion des espaces ruraux au cœur des préoccupations sociales dans lesquelles le maintien et la préservation de la qualité sont revendiqués comme une nécessité. La multiplication de ces fonctions au sein d'un même espace tend à augmenter les conflits dits d'usage entre les différents acteurs pour l'accès aux territoires et à leurs ressources (eau et foncier notamment). Les conséquences de la sécheresse ne se résument donc pas à la question agricole en général, et à celle l'agriculture irriguée en particulier.

C'est sous cet angle que nous aborderons la question de l'usage de l'eau pour l'irrigation en période de sécheresse. Notre approche ne se résumera cependant pas à la temporalité de la crise ou du conflit. Notre problématique sera replacée au sein des dynamiques spatiales, temporelles et actancielles (relative aux acteurs ; Berthelot, 2003) qui la composent, la décomposent et la recomposent. La pratique de l'irrigation posant également la question de la qualité et de la quantité nous semble intéressante sur trois points. Elle porte moins sur des approches en termes de flux et d'hydraulique qu'en terme de redéfinition des modalités **d'accès à la ressource**, de **partage du risque** (de la sécheresse mais aussi de l'inondation), **de capacité à intégrer la question environnementale** pour des collectifs évoluant dans des environnements multiples (naturel, social, institutionnel, politique, administratif, expertise…), en interactions et évolutifs notamment pour sa composante climatique. Sur ce point, les prévisionnistes s'accordent sur la probable multiplication des épisodes de cette nature dans les prochaines décennies – même si les débats restent vifs quant à la dimension spatiale et temporelle du changement climatique.

41 Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, transposée en droit français par la loi n°2004-338 du 21 avril 2004.

De par sa forte composante d'incertitude et du peu de lisibilité du dispositif d'ensemble de gestion de l'eau concernant la distribution des compétences et des responsabilités, ce changement met donc à l'épreuve nos modes de gestion des ressources en eau (qualité, quantité, entretien des cours d'eau). Il est ainsi nécessaire de réfléchir aux moyens de limiter la vulnérabilité accrue de nos sociétés face aux différents risques, mais encore sur ce que seraient les conséquences éventuelles de ce changement.

La question de la prise en compte des effets du changement climatique dans les plans d'aménagement et de gestion des eaux se pose désormais d'autant plus fortement que les politiques territoriales de l'eau en France n'ont pas été élaborées pour répondre aux éventuelles conséquences du changement climatique sur la ressource. En effet, en 1964, date de la première loi sur l'eau, le législateur avait en effet pour préoccupation essentielle la dépollution des eaux et la satisfaction des différents usages. Il faut attendre les années quatre-vingt-dix et le principe de gestion équilibrée (loi de 1992) pour voir apparaître une politique "globale" de l'eau conjuguant conciliation des usages et protection des milieux aquatiques, dont les résultats restent très en retrait au regard des objectifs initialement affichés. Face aux épisodes hydro-climatiques extrêmes, inondations ou sécheresses, les autorités semblent ainsi mal préparées sinon démunies.

Mais de quelle irrigation parlons-nous ? Qui irrigue et comment ? Quels sont les territoires concernés et à quelles échelles ? Les analyses de la bibliographie et des recherches menées sur la question montrent que si l'irrigation est effectivement une activité agricole séculaire (Haghe, 1998), sa mise en œuvre est fortement relative dans le temps et dans l'espace, comme le sont ses techniques et ses modalités de gestion. Très souvent, co-existent des représentations, des traditions et des territoires hydrauliques dont la genèse, le fonctionnement se mélangent, s'opposent, co-existent, se succèdent en fonction des stratégies mises en œuvre par les différents utilisateurs de la ressource et des enjeux liés au développement et à l'aménagement des territoires. Ainsi, il ne saurait exister, à l'instar du territoire, une irrigation mais des irrigations. Ce constat conduit à écarter des solutions uniques, sectorielles voire catégorielles au profit de celles intégrant les dynamiques sociales et spatiales au sein desquelles ces pratiques s'effectuent.

1.2.4.1. Les dynamiques de l'irrigation

Les dynamiques spatiales et temporelles de l'agriculture irriguée ont singulièrement évolué au fil des siècles. Depuis la Provence, cette pratique organisée collectivement à l'échelle locale est traditionnellement affectée à corriger les irrégularités dans le temps et dans l'espace des précipitations. Elle s'est développée ensuite dans les régions du sud de la France par le biais de politiques nationales des grands aménagements (CNR, SAR par exemple) après la seconde Guerre Mondiale, puis s'est étendue à l'ensemble du pays à partir des années soixante-dix. Cette troisième vague a ainsi concerné des espaces sans véritables traditions d'irrigation[42], surtout de cette ampleur, et ces nouvelles cultures se sont parfois développées sur des terrains peu propices à ce type de pratique (exemple des Landes où l'on irrigue du sable). L'irrigation s'est mise en oeuvre surtout à partir d'initiatives individuelles dans une logique productiviste issue des politiques agricoles de l'après-guerre destinées à assurer l'autosuffisance alimentaire du pays. Dans cet esprit, les cultures ont également suivi le même modèle. Ces nouvelles régions (Midi-Pyrénées, Aquitaine, Beauce, Alsace, Charente[43]) ont ainsi (sur- ?) développé la culture intensive du maïs (grain, fourrage, semence)[44] provoquant au fil des années des déficits socialement et politiquement construits (Tableau 11) et de plus en plus marqués entre les besoins affichés et les potentialités "naturelles". Le maïs représente ainsi à lui seul 50% des superficies irriguées à l'échelle nationale et la carte des restrictions correspond largement avec celle des régions pratiquant l'irrigation agricole[45]. À ce problème de quantité s'est ajouté celui de la qualité dû aux

42 Au sens d'une expérience et d'une pratique.

43 A la différence de la Provence et du Languedoc-Roussillon par exemple. Pour la première, même si la culture du maïs est présente, les céréales, les fourrages (Crau), les légumes et les vergers dominent. Pour la seconde, il s'agit essentiellement de la culture de la vigne, des légumes et des vergers.

44 Le rendement du maïs sans aucun arrosage est environ de 55 q/ha alors qu'il passe à 90, voire 110-120 q/ha.

45 Cf. la carte du MEDD du mois d'août 2005, où sur les 21 départements en situation préoccupante, une très forte majorité se situe dans les Régions Aquitaine, Midi-Pyrénées, Pays de la Loire et Poitou-Charentes.

débits insuffisants des cours d'eau et à la présence de nombreux intrants. Ainsi, si au début, dans ces "nouveaux" espaces, la question de la "greffe" économique et sociale de ces nouvelles pratiques agricoles a fait peu de bruit (image du modernisme, représentation collective et sectorielle d'une eau abondante, sécurisation des productions, hausse du pouvoir d'achat…) aujourd'hui, force est de reconnaître que la place des dynamiques agraires au sein des dynamiques de développement territoriales est fortement questionnée.

Tableau 11. Répartition des prélèvements pour l'irrigation par Bassin

Agence de l'eau	Volume (M de m3)	Volume (% du total)	Surfaces irriguées (ha)	Redevances prélevées (€)
Rhône Méditerranée Corse	3009	63	375 000	0,13
Adour Garonne	1032	22	650 000	0,23
Loire Bretagne	505	10,5	281 000	0,75
Rhin Meuse	80	1,6	57 300**	1,14
Seine Normandie	116	2,4	100 000[46]	1,50
Artois Picardie	25	0,5	34 739*	1,25
Total	4767	100	1 498 039	

Sources : MAAPR, 2005 ; *RGA 2000, ** AGRESTE 2003

Les épisodes de sécheresse des années 2003-2004-2005 ont relancé les débats autour de l'irrigation sur des registres différents. A la lecture de la presse régionale et nationale, plusieurs cordes sensibles de la société française ont été sollicitées au plus fort de la crise : dramatico-économique, "la mort de l'espace rural" ; symbolique, voire biblique, "Sans irrigation, c'est le désert" ; menaces sur un des fleurons du patrimoine culinaire national, "Plus de barrage ? pas de maïs et donc plus de foie gras", ou encore la santé publique "Plus de maïs français ? c'est la porte ouverte aux OGM". Les objectifs poursuivis étaient de limiter la remise en cause de la pratique et surtout d'obtenir des pouvoirs publics une augmentation des ressources disponibles. Pour des raisons stratégiques, les revendications se sont moins portées sur la construction des grands ouvrages (à part dans le Sud-Ouest avec Charlas notamment) que sur la multiplication des petits ouvrages type retenues collinaires. Ces dernières, en l'absence d'étude globale, sont présentées comme une alternative écologiquement plus pertinente. L'essentiel des arguments ne laisse que très rarement la place à des alternatives et les discours se placent sur le registre revendicatif du "toujours plus de la même chose" selon le modèle de Barough (1989), caractéristique d'une vision centrée sur la filière et sa politique de l'offre s'appuyant sur des aménagements. On peut ainsi s'interroger sur les retours d'expériences des épisodes de sécheresse de 1976 et de 1989-1992. En effet, si le départ de la nouvelle irrigation remontait au début des années soixante-dix, les deux périodes suivantes ont donné un coup d'accélérateur à cette pratique. Tardieu (1999) parle ainsi d'une augmentation de 66% entre 1988 (1 147 000 ha) et 1997 (1 908 000 ha), alors que dans le même temps la part de maïs dans la sole irriguée diminuait de 50 à 40%. Certains agriculteurs ont très certainement anticipé des éventuelles mesures de restriction en s'équipant davantage afin de pouvoir pomper autant d'eau, mais en moins de temps (*quid* de l'égalité d'accès entre irrigants ? Celui qui ne peut pas se moderniser est doublement pénalisé. Celui qui s'équipe se lance alors dans une course en avant et un cercle vicieux).

La poursuite d'une politique engagée voilà près de trente ans, logique d'un certain point du vue (protection contre l'aléa) mais aussi complètement paradoxale (plus il y a de sécheresse, moins il y a d'eau l'été et plus on irrigue) peut être posée, eu égard à ses impacts sociaux, économiques et environnementaux. En effet, alors que certains scientifiques en 1976 expliquaient la sécheresse par le refroidissement climatique, on peut s'inquiéter des solutions proposées pour pallier celles de 2003 et 2005 dans la mesure où ces dernières seraient dues au réchauffement climatique…

46 Agence de l'eau Seine Normandie., Ernst et Young., 2004, *L'agriculture : données pour l'état des lieux demandé par la Directive cadre sur l'eau, 138 p.*

1.2.4.2. Les territoires hydrauliques. Qui irrigue, comment et où ?

En reprenant la classification de Marié (2003), ce dernier distingue trois grands modèles hydrauliques : celui des Associations Syndicales Autorisées (ASA), celui des Sociétés d'Aménagement Régionales (SAR) et enfin celui des sociétés fermières (SAUR, ONDEO, VEOLIA) dont la compréhension mutuelle n'est possible que si l'on analyse leurs rapports tissés dans le temps et dans l'espace. Pour rester en lien avec la problématique, la dernière catégorie ne sera pas détaillée contrairement aux deux autres mais dans l'encadré régional consacré au Languedoc-Roussillon, nous verrons combien les liens sont étroits entre les "modèles" et comment la répartition entre "eaux des villes" et "eau des champs" tend à favoriser la première catégorie. Les dispositifs mis en place pour le développement de l'agriculture productive jouent toujours leur rôle de lutte contre la sécheresse mais de plus en plus au bénéfice des espaces urbains, périurbains et touristiques. Enfin, nous aborderons ce que nous appelons le "4e" modèle, correspondant à celui de "l'entrepreneur individuel", dans la mesure où l'irrigation individuelle représente tout de même près de 60% des superficies…

Tableau 12. Répartitions des superficies irriguées par acteurs

Acteurs	**Superficies irriguées** (en hectares)	**Superficies irriguées** (en % du total)
SAR	365 000	18
ASA	450 000	22
Irrigation Individuelle	1 200 000	60
Total	2 015 000	100

Source : Ministère des Affaires Etrangères, 2000

1.2.4.2.1. Les ASA. Une forte représentativité méditerranéenne

Instaurées par la loi de 1865, les Associations Syndicales Agricoles Hydrauliques (ASH) illustrent l'ampleur et la diversité des formes d'organisation prise par la gestion collective de l'eau en montagnes méditerranéennes notamment (Haghe, 1998, pp. 368-400).

Les recensements effectués en 1873, 1899, 1932 témoignent de l'ancienneté et de la survivance des modes de gestion communautaires. Les associations recensées en 1899 sont les héritières des regroupements non institutionnalisés des différentes communautés structurées avant la Révolution. L'agriculture prédomine et notamment l'irrigation dont l'organisation communautaire se structure bien avant 1789 (Tableau 13). Cette pratique représente en effet 47% des associations pré-révolutionnaires et motive à plus de 90% les regroupements, devançant largement les autres usages (le dessèchement atteint seulement 5%). Cette tendance hégémonique est confirmée par le recensement de 1899 où l'irrigation regroupe près de 60% des organisations syndicales (Tableau 14).

Tableau 13. Organisation communautaire et l'irrigation, une tradition ancienne

	Associations recensées en 1899 et créées avant 1789			Pourcentage des valeurs par rapport au total recensé en 1899	
	Nombre		*Superficie en ha*	*Nombre*	*Superficie en ha*
Irrigation	**1 288**	**82.7%**	73 525	**47%**	32%
Dessèchement	77	5%	68 120	14%	22%
Endiguement	38	2.45%	9 306	5.5%	5%
Entretien des marais	3	0.19%	469	7%	0.4%
Irrigation prairies	**150**	**9.6%**	1 751	**56%**	22.5%
Drainage	1	0.06%	22	0.5%	0.05%
Total	**1 432**		151 527	**28.5%**	15.60%
"Effectif théorique"[47]	*1 557* = 100%.				

Source : Ghiotti, 2001, d'après Haghe, 1998

47 Le recensement effectué par l'auteur donne un nombre d'associations créées avant 1789 égale à 1432. Or l'addition des différents domaines donne un résultat de 1 557 (= effectif théorique, soit une "perte" de 125 associations). Si les pourcentages de la colonne de droite s'établissent bien à partir de 1432, ceux relatifs au poids de chacun des ensembles par rapport au total recensé avant 1789 se réfèrent à 1557. Ex pour l'irrigation : irrigation + irrigation prairie = 1438 associations, soit 1438*100/1 557=92.3%. Pour les associations recensées en 1899 et créées avant 1789, l'irrigation représente 92.3% du total.

Tableau 14. Le poids de l'irrigation à la fin du XIXe siècle

	Total des associations recensées en 1899			Associations recensées créées avant 1789	
	Nombre		*Superficie en ha*	*Nombre*	*Superficie en ha*
Irrigation	**2 701**	**54%**	227.7	1 288	73.5
Dessèchement	583	11.6%	307	77	68.1
Défense contre les eaux	672	13.4%	177.4	88	9.306
Entretien des marais	41	0.8%	66.9	3	469
Irrigation des prairies	267	5.3%	7.7	150	1.7
Drainage	144	2.9%	42	1	22
Autres[48]	*604*	*12%*	-	-	-
Total	**5 012**		971.3	1 432	151 527

Source : Ghiotti, 2001, d'après Haghe, 1998.

D'un point de vue spatial, la répartition géographique des associations est singulière dans le sens où les départements méditerranéens pour les trois périodes recensées embrassent plus de la moitié des associations avec un maximum atteint en 1899 avec 58% (Tableau 15). Concernant les usages, la maîtrise et la valorisation de la ressource par l'irrigation et l'endiguement prédominent alors largement (Tableau 14).

Tableau 15. La répartition des associations par département : la dominante méditerranéenne

Années de recensement	1873		1899		1932	
Nombre d'ASH	2 714		5 012		3 654	
Indice 100 en 1899	53		100		71	
Dont Ardèche (07)	17	0.62%	126	2.51%	10	0.27%
Hautes-Alpes (05)	335	12.34%	830	16.6%	776	21.2%
Drôme (26)	49	1.8%	212	4.23%	276	7.55%
Bouches du Rhône (13)	123	4.53%	200	3.99%	115	3.14%
Var (83)	32	1.17%	185	3.69%	91	2.49%
Vaucluse (84)	158	5.8%	171	3.41%	218	5.96%
Alpes-Maritimes (06)	23	0.84%	124	2.47%	?	-
Alpes de Haute Provence (04)	411	15.1%	435	8.67%	?	-
Pyrénées Orientales (66)	267	9.83%	445	8.87%	383	10.48%
Aude (11)	5	0.18%	29	0.57%	50	1.36%
Hérault (34)	4	0.14%	42	0.83%	31	0.84%
Gard (30)	36	1.32%	74	1.47%	41	1.12%
Lozère (48)	?	-	44	0.87%	4	0.1%
Corse	1	0.03%	8	0.15%	?	-
Aveyron (12)	1	0.03%	24	0.48	1	0.02%
Tarn (81)	2	0.07%	4	0.07	13	0.35%
Total MEDEF	1 461	54%	2 925	58%	1 995	54.5%

Source : Ghiotti, 2001, d'après Haghe, 1998.

D'un point de vue spatial, la tradition hydraulique méditerranéenne ne constitue pas un tout homogène et la gestion de cette ressource locale prend souvent la forme d'une discontinuité spatiale entre la gestion *montagnarde* et la gestion de *plaine*, ou encore de concurrences entre usages. Au sein de cet espace, les choix et les orientations de la politique de l'eau effectués durant le XXe siècle font état de continuités et de discontinuités notables dans les processus. D'abord, la localisation des usages et des enjeux liés à l'eau semble confirmer un glissement de la géographie de l'eau en direction de l'aval (montagne, plaine, littoral) ce qui dans un contexte de territorialisation de la politique de l'eau pose la question des solidarités territoriales entre les espaces et les différentes utilisations. Cette prédominance de l'aval ne signifie cependant pas un processus général de domination systématique des espaces amont par l'aval. Ce qui semble avoir néanmoins fortement changé est relatif au paradigme conduisant la gestion de l'eau. La question de la protection contre les eaux (inondation, sécheresse…), avec ses

48 Cette rubrique n'existe pas dans les données de l'auteur. Elle provient d'une initiative personnelle afin d'appuyer les pourcentages calculés sur des données fixes. En effet, si l'on se livre à une addition, les chiffres donnés atteignent 4408, soit une différence avec le total annoncé de 604 associations.

dimensions techniciste, aménagiste et équipementière, semble progressivement laisser la place à celle de la prise en charge collective (même si les collectifs tendent à évoluer vers moins de sectoriel) et préventive des risques. Ainsi, à l'instar de la période des ASA et des ASH, se recompose la question de l'accès et du partage des ressources au sein de collectifs ou de scènes de concertation construites socialement. La mise en œuvre des "nouveaux" outils de concertation, type SAGE, témoigne d'un processus largement encore en cours d'institutionnalisation.

L'encadré 3 illustre les difficultés d'une gestion collective de la ressource en zone méditerranéenne dès lors que la pression urbaine vient se surajouter au partage traditionnel de la ressource.

Encadré 3. Fleuve Hérault - Source des Cent-Fonts - Canal de Gignac - Canal Bas Rhône Languedoc. Quelles ressources en eau pour le département de l'Hérault à l'horizon 2015 ?

Dans le cadre d'une importante croissance annoncée de la population du Languedoc-Roussillon en général et du département de l'Hérault en particulier (926 100 hab. en 2002 et 1 039 000 hab. en 2010), le Conseil Général dudit département réfléchit à des solutions afin de sécuriser et de diversifier ses approvisionnements. Si la façade littorale (notamment en été) est par endroits susceptible de subir les plus fortes pressions sur l'alimentation en eau potable, d'autres zones comme les garrigues du Nord de Montpellier, l'agglomération elle-même et la vallée de l'Hérault sont également concernées.

Dans ce contexte, le Conseil Général a décidé de prospecter, en raison de ses fortes potentialités supposées (en qualité et en quantité), dans la zone karstique du montpelliérais. Une série d'études et de pompages a ainsi été réalisée par le BRGM, à partir notamment de la source des Cent-Fonts, déclenchant une forte opposition locale du fait de la richesse écologique de cet espace, classé en zone Natura 2000. Cette opération, dont les origines remontent à 1996, s'est ainsi concrétisée à l'été 2005 avec les essais de pompage dont les résultats sont sujets à polémiques. Cette ressource karstique qui alimente par résurgence le fleuve Hérault doit, si l'exploitation devient effective, alimenter en eau potable de 40 000 à 60 000 personnes situées dans la moyenne vallée de l'Hérault, espace en pleine expansion (communauté de communes Vallée de l'Hérault) et/ou le nord de l'agglomération montpelliéraine.

Les opposants craignent que le pompage en baissant le niveau de la nappe et du cours d'eau n'aggrave la pression sur la ressource en eau du fleuve Hérault de l'amont à l'aval, notamment en été, alors que ces espaces sont déjà fortement sollicités par de nombreux usages (AEP, irrigation, pompages illicites, baignade et canoë, opération Grand Site…). Les spécialistes annoncent au contraire qu'un pompage limité à 400 l/s puiserait certes dans le stock (qui se reconstituerait à l'automne avec les pluies) ce qui ne perturberait donc pas les échanges "traditionnels" entre la source et le fleuve en été. De plus, dans les stratégies élaborées pour répondre à la problématique, est annoncée la diversification des approvisionnements notamment à partir des ouvrages existant transportant de l'eau brute. Il s'agit en effet de mobiliser davantage cette ressource via la construction de doubles réseaux, afin de ne plus utiliser l'eau potable pour l'irrigation des cultures et des jardins ou encore le remplissage des piscines dans ces espaces où se multiplient les lotissements en réponse à la pression démographique. La viabilisation des terrains à construire et leur raccordement à ce réseau est un argument de vente très efficace que lotisseurs, responsables de syndicats intercommunaux et gestionnaires d'infrastructures mobilisent allègrement (Cf. le cas du syndicat intercommunal de travaux d'irrigation de la vallée du Salaison).

Si la Compagnie du Bas Rhône Languedoc est un acteur de premier plan dans le domaine, surtout depuis les accords passés avec le Conseil Régional dans le cadre d'*Aqua 2020*, visant à une politique régionale de gestion solidaire de l'eau pour les quinze ans à venir, le canal de Gignac est, à une autre échelle, également concerné par cette problématique. En effet, dans les scénarios alternatifs aux sources des Cent-Fonts, envisagés pour compenser "le manque à couler" dans l'Hérault, il est prévu une diminution de l'irrigation à partir de l'eau du canal… bien que de nombreuses études aient montré le rôle de l'irrigation dans la recharge continue de la nappe de l'Hérault et du soutien du débit du fleuve lui-même dans les parties situées beaucoup plus en aval de la prise (2,5 m^3 de concession, mais environ 1,5 à 2 m^3 détournés réellement). Si, effectivement, les responsables du canal tentent de se repositionnent dans le champ de l'irrigation, la satisfaction des "demandes urbaines" est de plus en plus prise en considération. Les différences de facturation entre les usages "urbains" et "ruraux" permettent en effet de dégager des marges de manœuvre plus importantes afin justement d'accompagner leur politique et de moderniser ainsi les réseaux et rationaliser les pratiques (l'irrigation à la raie représente encore 89% des modes d'irrigation). L'enjeu est d'autant plus grand que la mobilisation des ressources du canal est également envisagée pour fournir de l'eau potable. La séparation "eau brute"-"eau potable" se ferait dès la prise

d'eau après un léger traitement compte tenu de la relative bonne qualité de l'Hérault en amont de St Guilhem-le Désert. Mois coûteuses, ces solutions alternatives sont également jugées moins perturbatrices pour l'hydrosystème et capables de répondre aux fluctuations de la demande sommes toutes relatives dans cette partie du département. Reste effectivement à savoir avec précision quelles sont les priorités économiques, politiques et financières aux différentes échelles et à qui, pourquoi faire et vers où sont destinées les ressources en eau. Les gestionnaires du canal et les responsables politiques locaux soucieux de maintenir le développement et l'attractivité de leur territoire vont suivre très attentivement les modalités de partage de la ressource en cours de discussion au sein du SAGE de l'Hérault.

La question de l'eau brute est particulièrement intéressante dans l'analyse de BRL et montre comment se repositionne la Compagnie d'aménagement. Comme l'a fait la SCP depuis bien longtemps, BRL se met sur le créneau de la vente d'eau brute[49] en direction des villes et des espaces périurbains (services urbains, tourisme et AEP). Cette "nouvelle étape" intervient après plusieurs tentatives manquées comme la vente d'eau à Montpellier au début de la concession ou encore l'exemple du canal Rhône-Barcelone plus récemment, dans les deux cas pour cause d'oppositions politiques fortes. Ces rendez-vous manqués expliquent avec l'échec de l'irrigation du Languedoc en grande partie les déficits économiques chroniques de la société. Ces exemples indiquent également les différences d'insertion au sein des territoires que ces institutions occupent. Pour expliquer les difficultés de BRL à la différence de la CSP, Marié précisait, il y a quelques années : "On pourrait même aller jusqu'à penser que les difficultés récentes de la Compagnie du BRL (…) ont pour cause, certes, des conditions géo-économiques défavorables, mais aussi une certaine incapacité de l'institution à pratiquer cette diversification. Ces difficultés ont été liées en grande partie aux effets d'un modèle étatique et dirigiste (le top-down des Américains) trop rigide pour négocier avec les pouvoirs politiques et économiques locaux et pour s'adapter à une réalité sociale, économique, financière qui imposait que l'on diversifiât les usages (le bottom-up des Américains)".

L'acte II de la Décentralisation, le changement politique à la tête de la Région Languedoc-Roussillon, un nouveau projet de territoire (Aqua 2020) auquel la compagnie d'aménagement participe très largement donnent à cette dernière une nouvelle légitimité. Reste à savoir si ses anciens modèles (centralisateur, équipementier et dirigiste), comme le laisse à penser l'exemple des Cents-Fonts, seront compatibles avec les principes de la gestion intégrée et les objectifs de la DCE.

1.2.4.2.2. Les SAR : La gestion de l'eau à l'échelle régionale

La décennie 1950-1960 marque un véritable tournant puisqu'elle inaugure le développement et l'aménagement volontaristes du territoire sur des bases régionales. Le principal souci est alors de soutenir l'impulsion économique et la coordination des actions à travers la planification. À la différence de la CNR, trente ans plus tôt, on assiste cette fois-ci à la convergence des intérêts entre les industriels, soucieux du développement de la région sur laquelle ils rayonnent et dont ils tirent leur pouvoir (économique et politique), et les hauts fonctionnaires occupés à équilibrer les activités et les populations sur le territoire. Le développement régional devient le fer de lance de la politique d'aménagement du territoire dont le décret du 30 juin 1955 consacre la régionalisation du Plan[50].

Afin de faciliter la mise en place de ce dernier, sont créées en 1956, 21 régions de programme. Ce décret est fondamental pour deux raisons : il institutionnalise tout d'abord l'échelle régionale comme une échelle d'action, il fait de l'eau, à côté de l'urbanisme, l'une des pièces maîtresses de sa politique par la création des Sociétés d'Aménagement Régional, les SAR. La Société du Canal de Provence (SCP) créée en 1959, la Compagnie Nationale d'Aménagement de la Région du Bas-Rhône Languedoc (CNARBRL, 1956) et la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) sont directement issues de ce décret et de cette logique. La convergence "économico-institutionnelle" des débuts se double d'une convergence territoriale entre l'aménagement du territoire et la gestion de l'eau. A partir de 1955, cette convergence ne va cesser de se renforcer et ainsi d'ouvrir la porte à la mise en place d'une gestion institutionnalisée de l'eau à l'échelle du bassin versant.

Ce rapprochement s'effectue dès 1959, avec la création de la "Commission eau" au sein du Commissariat au Plan, où se renforcent les bases de la co-évolution entre gestion de l'eau et

49 Notons que la SAUR (eau et travaux publics), participe au capital de BRL.
50 Décret 55-876 du 30 juin 1955, relatif aux sociétés de développement régional (*JO* du 2 juillet 1955).

aménagement du territoire (De Carmantrand, 1999). La période de reconstruction est marquée par une intense activité économique, urbanistique et démographique qui accroît la demande et la pression sur la ressource en eau. L'augmentation rapide des activités et la dégradation des milieux naturels notamment aquatiques qui les accompagnent, appellent à un nouvel effort de coordination susceptible de prendre en compte le changement d'échelle des problématiques économiques et environnementales. Le développement économique régional demande la mise en place de son pendant environnemental, afin d'encadrer et d'assurer la fourniture d'eau tout en assumant sa dégradation par la dépollution. Il devenait urgent de trouver le moyen de financer le développement et l'entretien des infrastructures nécessaires au maintien de l'activité économique mise en place dans le cadre de la région. A l'instar de l'espace économique, l'espace de la gestion de l'eau devient "une région" dans le sens que lui confère la science régionale, c'est-à-dire un espace à problèmes qu'il faut gérer (Benko, 1998). L'eau trouve ainsi avec le bassin versant "sa région" au sein de laquelle doit s'organiser sa gestion. Ce vaste mouvement de réorganisation et de mise en cohérence des espaces de l'aménagement et du développement régional se concrétise par la création en 1963 de la Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale (DATAR). L'essentiel de son activité s'inscrit dans un objectif de cohésion qui en fait une instance de proposition, d'arbitrage et de synthèse des politiques ministérielles sectorielles. La DATAR donne naissance un an plus tard aux Agences de bassin : "*Les Agences de l'eau sont l'un des avatars de la réforme régionale : c'est au sein de la DATAR qu'elles ont été inventées*" (Barraqué, 1997, p. 191).

En parallèle à ce premier pas vers une gestion décentralisée, la politique régionale se caractérise aussi par l'action régalienne de l'Etat encadrée par la planification. L'aménagement de la Provence fournit un exemple particulièrement illustratif de cette politique où deux grands programmes, la CNR, et la Société du Canal de Provence "*visent à résoudre le problème du manque d'eau dans les régions agricoles, dans les grandes villes et dans les zones industrielles*" (Merlin, 1997, p. 420). Pour la seconde, la dimension régionale de la politique d'aménagement du territoire prend tout son sens. Il s'agit de mobiliser, à travers l'équipement et l'aménagement de la Durance, les eaux de la Haute-Provence et d'organiser leur transfert en direction de la Basse-Provence où se situe l'essentiel des activités et des besoins, en particulier sur le littoral. La pièce centrale de ce programme est la retenue de Serre-Ponçon (Meyzenc, 1984 ; Marié, 1984 ; Chauvet, Pons, 1975).

Pour le moment, relativement à l'abri grâce aux deux aménagements majeurs de Serre-Ponçon et de Sainte-Croix et à des cultures plutôt tournées vers le maraîchage et les vergers, la Région PACA n'en demeure pas moins sujette à des tensions croissantes. La pression touristique sur les lacs de retenue et les cours d'eau de la région, les demandes croissantes des villes, des espaces périurbains et des industries font de plus en plus pression sur une agriculture première consommatrice, avec près des deux tiers des volumes.

Les situations et les bilans des SAR sont contrastés sur leurs impacts sur la sécheresse et témoignent des dynamiques différentes des espaces régionaux dans lesquels elles évoluent. Ces dynamiques les ont conduits à des évolutions souvent à l'opposé de leur mission d'origine. L'une est en sur-régime (CACG) et ne parvient pas à faire face à la demande agricole, l'autre (BRL) sous-utilisée se tourne vers la demande urbaine, enfin la SCP profite d'une toute relative aisance.

1.2.4.2.3. L'irrigation individuelle

Après les formes collectives et régionales qui ont marqué l'organisation et la gestion des pratiques d'irrigation, la dimension individuelle s'est très fortement développée au cours de la dernière période. Développée à partir de créations de nouvelles ressources comme de petits barrages, des prélèvements directs par pompage dans les cours d'eau et dans les nappes, ou encore par les retenues collinaires[51],

51 Créations souvent accompagnées d'un discours environnemental "positif", dans la mesure où elles sont censées participer à la régularisation des débits : limitations des crues en hivers par stockage et soutien d'étiage plus longtemps l'été par restitution. Une étude de la Chambre d'Agriculture de l'Ardèche (1999) tend à fortement nuancer le schéma théorique et montre surtout que ces dispositifs ne règlent pas la question des prélèvements. Les ressources supplémentaires ainsi dégagées ne remplacent pas les prélèvements, mais servent de "réserves" (donc sans effet sur le débit d'étiage) pour soit combler les déficits soit le plus souvent pour augmenter la capacité.

elle augmente sensiblement les tensions qualitatives et quantitatives sur les cours d'eau. Cette pratique s'intègre mal aux modes de régulation existants et au projet de développement territorial associant l'environnement en général et l'eau en particulier. Cette situation explique également en partie le relatif échec des politiques de l'eau jusque-là mises en œuvre au regard de la diversité des outils existants et des investissements publics consentis.

L'absence quasi totale de mesures concernant la ressource en eau dans ces projets – bien qu'un volet valorisation des ressources locales soit prévu - ne s'explique pas seulement par la conception donnée à l'aménagement. À cela s'ajoute un contexte social, économique et culturel propre à l'espace rural. L'histoire du monde rural est marquée, depuis trois siècles, par l'individualisme agraire et la privatisation des moyens de production, par une gestion individuelle à la parcelle. La notion de partage collectif d'une ressource essentielle à l'activité agricole est étrangère à ces espaces, car brisée par l'action commune de l'Etat et des intérêts privés (grands propriétaires, notables, banquiers…). L'absence d'une dimension collective et sa difficile reconstruction (Petit, Riviere-Honegger, 2004) mais aussi spatiale de la gestion, ne s'arrête pas aux aspects de la valorisation de la ressource, mais touche également les questions liées à la protection contre les crues ou encore contre les phénomènes érosifs (Cartier, 2001).

À cette première "absence", s'ajoute celle relative à l'extrême difficulté d'associer financièrement "les acteurs privés" aux dispositifs opérationnels de gestion de l'eau comme le contrat de rivière par exemple. Bien qu'ils soient à l'origine, et encore largement maintenant, des outils de gestion de la qualité, ces outils contiennent pour la plupart aujourd'hui des volets relatifs à la quantité dans la mesure où le maintien des débits joue fortement sur la qualité des eaux. L'inadaptabilité initiale de ces outils, bien qu'en évolution, à la question quantitative et la manière indirecte dont le lien qualité-quantité est explicité, rendent difficile l'incorporation de ces acteurs à ces dispositifs à côté des collectivités et financeurs traditionnels (Tableau 16), alors qu'ils sont bénéficiaires des actions entreprises.

Tableau 16. Participation financière en 1997 des différents partenaires du contrat de la rivière Reyssouze (Ain)

% Par volet	Etat	Agence de l'eau	Conseil Régional	Conseil Général	Collectivités	Agents Privés
Volet A	-	43%	15%	9%	33%	-
Volet B	14%	8%	17%	7%	54%	-
Volet C	20%	-	-	30%	50%	-
Volet D	4%	36%	33%	4%	23%	-

Source : Brun, 2003 d'après SIAER, 1997.

Cependant, les difficultés à obtenir des résultats ne se limitent pas aux outils de gestion globale, mais touchent également les outils sectoriels (au monde agricole) et spécifiques à la quantité comme les Plans de Gestion des Etiages (PGE) ou la Gestion Volumétrique. Le cas de Charente[52] montre comment cet outil instaure certes de nouvelles règles de partage mais ces dernières restent : nettement "insuffisantes" pour réduire les déséquilibres entre offre et demande eu égard à l'ampleur des déficits ; "asymétriques" privilégiant des relations bilatérales quotidiennes entre irrigants et administrations ; "instrumentales" dans la mesure où elles échouent à rapprocher les acteurs de l'eau autour d'une même représentation du développement souhaitable de l'agriculture ; "partielles" car la GV vise uniquement la question de la quantité et pas les conséquences de l'irrigation sur les milieux aquatiques et les autres usages, questions pourtant jugées essentielles par la plupart des acteurs non-irrigants.

Comme nous l'avons déjà dit précédemment, il semble difficile de construire du collectif autour de cette nouvelle forme d'irrigation à dominante individuelle. Pourtant, tant dans les discours que les objectifs des politiques de l'eau, la tendance est à la nécessité du collectif. Des aides sont ainsi

52 Granjou C., Garin P., 2006, "Organiser la proximité entre usagers de l'eau : le cas de la gestion volumétrique dans le bassin de la Charente", *Développement Durable et Territoires*, dossier n°7, 12 p.

disponibles pour favoriser le regroupement d'agriculteurs irrigants (dans la prochaine loi sur l'eau). Pourquoi ne pas imaginer la création sur ces espaces "nouvellement concernés" par l'irrigation, la création, la réactivation d'ASA, mais surtout leur modernisation par leur décloisonnement et leur ouverture aux autres acteurs du territoire ? Mais le contour et les formes de ces nouveaux collectifs d'irrigants sont difficiles à cerner. En effet, cette perspective semble limitée dans la mesure où de nombreux rapports et études stigmatisent cette catégorie jugée au mieux "obsolète", "trop rigide", "inadaptée", ou carrément remise en cause dans leur existence même. L'ordonnance n° 2004-632 du 1er juillet 2004[53], relative aux associations syndicales de propriétaires, vise justement à leur restructuration. Apportera-t-elle les solutions escomptées ?

On peut d'ores et déjà s'interroger sur la portée de ce texte, tant sur le fond que sur la forme, face aux nouveaux enjeux. À l'origine, c'est une loi[54] qui a organisé ces associations et elle est venue "clôturer" des dizaines d'années de discussion, d'arbitrage, et de conflits afin d'établir un équilibre entre les nombreux enjeux relatifs à la gestion locale de l'eau à la fin du XIXe au sein des espaces ruraux. Alors, comment peut-on interpréter le recours à une ordonnance, les délais de débats express au Parlement pour ce type de sujet (concernant le foncier, l'eau, l'espace rural) et son adoption en plein milieu de l'été devant une assistance inversement proportionnelle à la température alors en vigueur dans l'hexagone ? Le recours à l'ordonnance signifie-t-il alors que les changements sont si minimes, comme semblent l'indiquer certains directeurs d'ASA, qu'il n'est pas nécessaire de procéder autrement ? Dans cette hypothèse, on peut alors penser que les modifications étant si minimes, la portée des changements introduits au regard des enjeux décrits précédemment ne portera que peu d'effet.

Pourtant, il s'agit selon le texte de "modifier les modalités de création, de fonctionnement et de dissolution, ainsi que les règles budgétaires, comptables et financières de ces associations". Dans un contexte législatif actif portant sur les territoires ruraux, la mise en œuvre de la décentralisation et des transferts de compétences, la prochaine loi sur l'eau, les occasions ne manquent pas d'ouvrir le débat sur l'accès et le partage des ressources. Le recours à l'ordonnance signifie-t-il au contraire une volonté de restreindre le débat ? D'imposer des changements (un *statu quo* ?) sans participation, débats, transparence et démocratie ? Il serait ainsi intéressant de poursuivre ces interrogations par des recherches portant sur la modernisation des ASA.

Encart 4. L'exemple du bassin versant du Doux (Ardèche – France)

Cet espace est classé Zone de répartition des Eaux (ZRE) par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (Cf. 1.2.1 pour une description des ZRE).

L'analyse du bassin versant à partir des usages, urbain, touristique, agricole semble une clé de lecture particulièrement riche pour saisir la nature de leurs relations et les dynamiques inhérentes à la gestion de l'eau. Ces activités permettent en plus d'identifier des territoires types d'où se dégagent les problématiques principales à l'échelle du bassin versant. Ces dernières sont en relation avec les conditions socio-économiques et démographiques locales.

La dynamique du système semble en partie être assurée par la mutation des activités économiques liées à la rivière, notamment l'agriculture et son redéploiement à l'échelle du bassin versant. Trois types d'activités agricoles dominent : la polyculture et l'arboriculture sur la basse vallée ; la polyculture-élevage dans la moyenne vallée avec également présence de l'arboriculture, et enfin l'élevage dans le haut bassin versant. Le développement de la polyculture-élevage par les agriculteurs répond au souci de maintenir une activité dans un contexte européen et mondial très concurrentiel. La conséquence en est l'intensification des pratiques par l'irrigation, permettant la production de fourrage et de maïs pour l'alimentation du bétail et le développement du hors-sol (en réaction partielle à la crise fruitière). Ces nouvelles orientations ont conduit à la déprise agricole sur le haut bassin versant, à l'intensification et au développement de la pratique agricole sur la moyenne vallée, où la proximité de la rivière, la disponibilité et la morphologie foncières ont rendu possible cette réorganisation.

D'un point de vue morphologique, trois types de problématiques émergent alors, correspondant pour la partie

53 Décret n°2006-504 du 3 mai 2006 portant application de l'ordonnance n°2004-632 di 1er juillet 2004 relative aux associations syndicales de propriétaires. *JODRF* du 5 mai 2006.
54 Loi du 21/06/1865 et le décret modifié du 18/12/1927.

amont de la vallée à l'enforestation des versants, à la fermeture des paysages et au comblement du petit chevelu. La conséquence en est la perturbation de la dynamique d'écoulement et la fourniture d'embâcles. Pour la partie médiane, on observe une intense activité hydrologique (méandrage et érosion de berges) dans un secteur où domine l'agriculture à laquelle s'ajoute une incision du lit provoquée par la présence d'une ancienne gravière. Enfin, la partie aval se caractérise par des conflits d'usage entre un tourisme en expansion et l'agriculture, principalement en période d'étiage.

L'agriculture bénéficie d'un poids économique et social majeur (production, agro-tourisme, paysage). La vallée du Doux est la région agricole la plus dynamique du département comptant 1700 chefs d'exploitation, c'est-à-dire 20% des agriculteurs de l'Ardèche, et 1800 ha irrigués dont 208 par pompage. La moyenne vallée est, de ce point de vue, l'espace de référence puisqu'elle concentre environ 70% des pompages du bassin et utilise environ 290 000 m^3/an (dont environ 100 000 m^3 rien que pour le maïs) sur les 350 000 m^3 du volume global. Bien que le nombre de pompages ait effectivement diminué depuis 1991 (72 contre 85, 208 ha contre 319), on note en revanche une diversification des moyens utilisés (lacs collinaires notamment) et une intensification des pratiques. En effet, les perspectives à court terme (cinq ans) laissent apparaître une demande supplémentaire de 52 ha à irriguer par pompage pour un volume d'environ 100 000 m^3.

C'est dans ce contexte pour le moins très disparate du point de vue des problématiques, que la démarche contractuelle se construit. Cependant, la qualité des eaux et les conflits d'usage apparaissent comme une question transversale et constituent les éléments fédérateurs. Malgré la mise en place de deux contrats de rivière, les acteurs de la vallée du Doux se trouvent dans l'incapacité de construire et de faire émerger un projet commun dont l'eau serait le support en l'absence d'une vision partagée du territoire et de son développement. Face à ces difficultés, comme pour la Camargue (Petit, Riviere-Honegger, 2005) ou la Charente (Grujard, 2004), les tentations sectorielles, monofonctionnelle et équipementières restent vivaces.

1.2.4.3. L'eau et ses usages dans les dynamiques territoriales. De l'eau support à l'eau facteur de développement

Les années 1990 constituent de ce point de vue un véritable tournant, et ce aux différentes échelles. Les politiques de l'eau intègrent de plus en plus fortement "l'impératif milieu" ce qui bouleverse les approches en termes de gestion, désormais articulée autour des références systémiques et de bassin versant. De manière concomitante, on assiste à la recomposition des paradigmes du développement et à la prise en charge de ce dernier par les collectivités territoriales aux prérogatives accrues avec les lois de décentralisation. À cela s'ajoute le rôle considérable joué par l'Union européenne (multiplication des politiques environnementales, impacts des Directives relatives à la gestion qualitative et quantitative de l'eau (plus de trente entre 1975 et 2000), instaurations de zonages…) et par les bailleurs de fonds internationaux (PNUE, FAO, Banque Mondiale, FMI…) qui associent le bassin versant aux principes de la "bonne gouvernance" (Ghiotti, 2004).

L'évolution des politiques publiques en matière d'aménagement, de développement territorial et de gestion de l'eau s'est ainsi effectuée de manière conjointe autour des principes de la trans-sectorialité et de la trans-territorialité. Les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), les Pays, les Parcs Naturels Régionaux, sont autant de nouveaux découpages territoriaux qui tentent de répondre à ces nouvelles problématiques. L'approche par bassin versant a donc accompagné le vaste mouvement de décentralisation de la politique de l'eau, engagée au début des années 1980. Le SAGE, par sa dimension réglementaire (mais non obligatoire, mise à part décision préfectorale) est alors venu compléter le dispositif en place relatif à la gestion et l'aménagement des rivières assuré jusqu'alors par la contractualisation avec les contrats de rivières (Brun, 2003).

Les politiques de l'eau sont progressivement devenues de moins en moins sectorielles et de plus en plus globales. Leurs territorialisations se caractérisent de la manière suivante. D'abord, ce processus a très largement favorisé le fait que la définition de la problématique et du périmètre, le règlement et le financement de la gestion soient une construction sociale et politique au niveau local entre les différents usagers. Le contenu et les objectifs poursuivis tendent à évoluer depuis une dizaine d'années pour intégrer des problématiques de développement. Dans ce sens, les finalités territoriales des

politiques de l'eau ne sont plus seulement l'application de politiques sectorielles. Elles visent à s'inscrire dans des projets de développement territorial, cherchant à devenir un élément fédérateur pour les acteurs locaux et à assurer une relative mise en cohérence des politiques liées à l'eau et à l'aménagement. En effet, les gestionnaires de l'eau essaient d'influer le plus en amont possible sur les modalités d'occupation de l'espace et donc sur les politiques touchant les domaines de l'agriculture, de l'urbanisme ou encore du tourisme (Narcy, 2004). Des territoires de gestion plus "englobants", type bassin versant, sont ainsi proposés dans une logique territoriale. Ces nouvelles modalités de gestion de l'eau et des territoires entraînent des confrontations entre acteurs que les démarches participatives et la concertation, certes nécessaires, sont loin de pouvoir épuiser.

La mise en œuvre des SAGE et des CLE à l'échelle locale intègre et interfère avec les logiques politiques et territoriales déjà existantes dans la mesure où, décentralisation oblige, les élus locaux sont amenés à s'investir de plus en plus dans les politiques de l'eau. Elle participe ainsi à la création d'une gouvernance de bassin nécessitant la recomposition du pouvoir local (Allain, 2001).

Outre la remise en cause des cadres institutionnels, la nouvelle donne territoriale a littéralement fait voler en éclats la répartition des compétences par blocs. Les nouvelles collectivités territoriales, si tant est qu'elles disposent des moyens nécessaires, sont susceptibles d'intervenir dans n'importe quel domaine en définissant des politiques et en multipliant les procédures. L'exemple du financement des contrats de rivière l'atteste, comme il témoigne du désengagement financier de l'Etat en direction des collectivités. Ainsi, la dilution de l'action publique territoriale se double d'une sévère compétition entre institutions pour l'appropriation et le contrôle du ou d'un territoire, vu comme un moyen d'asseoir leurs politiques, d'affirmer leur légitimité et leur existence (au besoin d'affaiblir la collectivité voisine). Ces luttes sont d'autant plus intenses que les territoires en question sont "stratégiques" et/ou possèdent une forte charge symbolique et/ou naturelle et que les institutions sont en mal de reconnaissance ou remises en cause. En outre, la recherche de la position dominante se trouve largement encouragée par les nombreuses ressources et subsides auxquels elle donne droit, mais également par le statut qu'elle confère au sein du réseau d'acteurs. Derrière cette précision, il est possible de regrouper bon nombre de configurations. Cependant, les rivalités entre les différents niveaux de gouvernement semblent particulièrement représentatives. Ces différents acteurs se livrent une véritable concurrence par politiques territoriales interposées pour le contrôle des territoires ruraux à forte dominante environnementale. Le territoire de gestion de l'eau devient un enjeu accentuant les interférences et les conflits entre les projets et les collectivités qui les portent. La stratégie territoriale de développement se construit sur leur aptitude à capter ces territoires "*d'intercession*"[55] dont relève le bassin versant. Comme le rappellent Béhar et Estebe (2000, p. 5), "*cette fonction d'intercession devient aussi essentielle que celle d'accès aux ressources financières. Bien souvent d'ailleurs, c'est la position d'intercesseur qui conditionne l'accès aux ressources, bien plus que la position institutionnelle*".

L'IFEN (2002) rappelait d'ailleurs que sur la période 1996-1999, les Conseils Généraux ont consacré 4,72 milliards d'euros à l'environnement, contre 948 millions pour les Conseils Régionaux. En outre, si ces derniers consacrent 33,4% de leurs dépenses environnementales à l'eau, les premiers y participent à hauteur de 65,3% (IFEN, 2003). Les nouveaux transferts de compétence et la suppression du FNDAE pour les départements métropolitains (mais son remplacement par un fonds départemental pour l'alimentation en eau et l'assainissement) réduiront-ils ces écarts ?

55 La maîtrise du développement territorial passe ainsi non seulement par la capacité des acteurs à construire leur propre démarche de développement, mais également par leur capacité à construire des articulations et des agencements territoriaux combinant : les logiques sectorielles et globales, la dimension horizontale (territoire d'intervention élargi, gestion avec l'ensemble des acteurs locaux), la dimension essentielle, la dimension verticale (articulation avec les acteurs et les territoires d'intervention aux différentes échelles).

1.2.5. Gestion collective localisée

Quelles modalités de gestion de la sécheresse en agriculture dans l'action publique ?

1.2.5.1. Evolution de la gestion de la sécheresse dans l'action publique

Pour comprendre comment se présente la question de la gestion de la sécheresse dans l'action publique, il convient de distinguer les interventions visant à faire face aux effets négatifs d'une sécheresse sur des usages dépendants de l'eau, comme la production agricole, des interventions visant plus largement à gérer des situations de pénurie en eau, qui résultent d'une insuffisance de l'offre en eau par rapport à la demande provoquant une insatisfaction de celle-ci.

1.2.5.1.1. Une intervention publique pour faire face aux effets de la sécheresse sur la production agricole

L'intervention publique pour faire face aux effets directs de la sécheresse sur la production agricole relève du Ministère de l'Agriculture. Elle s'exerce principalement *ex-post* dans le cadre de la procédure de "calamités agricoles", qui vise à dédommager les agriculteurs ayant subi des préjudices dus à une situation exceptionnelle de pénurie en eau. En cours de campagne, des mesures dérogatoires vis-à-vis des règles de production agricole peuvent aussi être prises par la Commission européenne pour limiter ces préjudices (possibilité d'utiliser les herbages des terres en jachère pour nourrir les animaux ou reconstituer les stocks de fourrages notamment). En matière prévisionnelle, le Ministère de l'Agriculture mise surtout sur la communication pour inciter les agriculteurs à modifier leurs assolements et à cultiver des plantes moins consommatrices d'eau (diminution des emblavements en maïs notamment).

1.2.5.1.2. Une intervention publique croissante pour gérer des situations de pénurie en eau

Les pouvoirs publics se sont depuis longtemps préoccupés de gérer des situations de pénurie d'eau, que ce soit pour garantir une fourniture d'eau à un collectif ou pour favoriser le développement économique de territoires naturellement pauvres en eau. Cela les a amené historiquement d'une part à rechercher une limitation des droits d'usage des riverains, d'autre part à mettre en place des politiques territorialisées d'aménagements hydrauliques visant à accroître l'offre en eau. La volonté de plus en plus affirmée dans la politique de l'eau de gérer les pénuries d'eau dans une logique de protection de la ressource en eau tend à faire davantage reposer la gestion de celle-ci sur une gestion de la demande en eau. Cette évolution est indissociable d'une transformation de l'action publique elle-même.

- **Une recherche ancienne de limitation des droits d'usage des riverains pour permettre la conciliation des usages**

Historiquement, en ce qui concerne la situation majoritaire des cours d'eau non domaniaux[56], la loi confère un droit d'usage préférentiel au riverain. La règle juridique qui fonde le droit des riverains en matière de prises d'eau est l'article 644 du Code Civil :

"Celui dont la propriété borde une eau courante […] peut s'en servir à son passage pour l'irrigation de ses propriétés.
Celui dont cette eau traverse l'héritage, peut même en user dans l'intervalle qu'elle y parcourt, mais à la charge de la rendre, à la sortie de ses fonds, à son cours ordinaire."

56. La distinction entre cours d'eau non domaniaux et cours d'eau domaniaux est issue de la distinction des Romains entre *res communis*, choses communes qui ne peuvent être la propriété exclusive de personne comme l'eau courante, la mer ou l'air, et *res publica*, choses publiques hors du commerce, mises à la disposition de tous, comme les grands fleuves pouvant servir à la navigation.

Cette règle a clairement été conçue pour l'irrigation traditionnelle, c'est-à-dire pour l'irrigation gravitaire reposant sur une eau amenée par des rigoles ou par des canaux dans les champs puis restituée au cours d'eau. Les prises d'eau fondées en titre échappent aux règles fixées par le Code Civil, c'est-à-dire soit les prises d'eau établies en vertu d'un contrat antérieur à l'abolition de la féodalité, soit des prises d'eau établies en vertu d'une vente de biens nationaux comportant une cession à titre perpétuel des droits à usage de l'eau. Des limitations à ces droits d'usage ont été introduites par la loi du 8 avril 1898 et codifiées à l'article 97 du Code Rural :

"Les riverains n'ont le droit d'user de l'eau courante qui borde ou qui traverse leurs héritages que dans les limites déterminées par la loi. Ils sont tenus de se conformer, dans l'exercice de ce droit, aux dispositions des règlements et des autorisations de l'Administration."

La loi de 1898 ne concerne que les eaux courantes, puisqu'à l'époque l'exploitation des eaux souterraines ne se faisait que par puisage et que les débits prélevés étaient donc faibles ; la réglementation concernant les prélèvements en eau dans les nappes souterraines a de façon générale évolué moins vite, du fait même de l'histoire des techniques[57]. Ainsi, le droit préférentiel accordé au riverain ne s'entend en réalité que comme un pouvoir enfermé dans d'étroites limites (Gazzaniga et al., 1998).

• Des politiques territorialisées d'aménagements hydrauliques visant à accroître l'offre en eau

Si l'aménagement a toujours été une voie d'action traditionnelle des collectivités pour accroître leur maîtrise de la ressource en eau, et en l'occurrence pour s'affranchir de situations de pénurie d'eau, deux vagues d'intervention publique à caractère territorial misant sur un accroissement de l'offre en eau ont marqué l'époque contemporaine (Allain, 2005).

. Des aménagements hydrauliques pour développer l'irrigation dans le sud de la France dans le cadre de Sociétés d'Aménagement Régional

Le principe des Sociétés d'Aménagement Régional (SAR) a été conçu dans les années 50[58] dans le cadre d'une politique d'aménagement du territoire cherchant à favoriser le développement de certaines régions françaises jugées en retard, localisées dans la moitié sud du pays. L'un des principaux facteurs identifiés du blocage du développement étant le manque de maîtrise de la ressource en eau, ces sociétés se sont vues conférées une mission importante dans ce domaine, impliquant la réalisation d'aménagements hydrauliques (réservoirs, mais aussi canaux et réseaux d'irrigation…) et/ou la gestion d'ouvrages hydrauliques existants. Ainsi, la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG), créée en 1959, s'est vue attribuée la gestion du canal de la Neste, qui permet de détourner une partie des eaux de la Garonne et de réalimenter artificiellement les cours d'eau de la Gascogne, et a reçu la concession du système Neste en 1960.

. La création de nouvelles réserves pour développer l'irrigation et lutter contre la pollution dans le cadre de la politique de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne

A la suite du Livre Blanc sur l'Eau de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, paru dans les années 70, qui met l'accent sur l'importance des déficits en eau dans ce bassin en été et qui initie une politique de création de nouvelles ressources en eau, plusieurs Etablissements Publics Territoriaux de Bassin (EPTB) sont créés pour mieux gérer l'eau et pour assurer la maîtrise d'ouvrage de la construction de barrages-réservoirs (par exemple, l'Institution Charente, créée en 1977). Cette politique de l'Agence de l'Eau s'affirme dans le Programme de Développement des Ressources en Eau (PDRE) publié en mars 1988, qui constitue un nouveau document de planification pour la décennie 1989-1998, actualisant le programme d'aménagement hydraulique existant. Le PDRE rappelle que depuis la parution de Livre Blanc en 1970, les besoins en eau se sont fortement accrus, du fait d'une part de l'accroissement considérable des consommations en eau, et en particulier du développement de l'irrigation dans tout le Sud-Ouest ; d'autre part de la mise en place par l'Agence de l'Eau d'une politique de lutte contre la pollution reposant sur la définition d'objectifs de maintien d'un débit

57. C'est le décret-loi du 8 août 1935 qui introduira un régime d'autorisation préalable pour tout puits ou sondage de plus de 80 m de profondeur, dans les départements de la région parisienne, mesure qui sera étendue progressivement aux départements où se posent des problèmes de préservation de la nappe. Le régime d'autorisation sera unifié par la loi sur l'eau de 1992.

58. Loi du 24 mai 1951 (n°51-592).

minimum dans les cours d'eau pour assurer une capacité de dilution suffisante des éléments polluants. Pour l'Agence de l'Eau, un tel accroissement des besoins en eau, dans un contexte de faiblesse naturelle des débits d'étiage de nombreuses rivières du bassin (confirmée notamment à l'occasion des épisodes de sécheresse de 1976, 1985 et 1986), implique de poursuivre la politique de création de nouvelles ressources en eau "*et de l'accélérer si possible*" (p.3) ; le programme envisagé porte ainsi tout autant sur la construction de grands réservoirs (supérieurs à 5 Mm^3), que sur celle de réservoirs moyens (de 1 à 5 Mm^3) et sur celle de retenues collinaires. Ainsi, le PDRE se présente comme un vaste programme d'aménagement hydraulique justifié à la fois par le développement de l'irrigation et par la politique de lutte contre la pollution dans un territoire naturellement pauvre en eau.

• Une recherche accrue de contrôle des prélèvements en eau allant de pair avec le développement d'une gestion globale de la ressource en eau à l'échelle du bassin versant dans le cadre de la loi sur l'eau de 1992

La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 introduit un tournant dans la manière de gérer la pénurie d'eau. En qualifiant l'eau de "patrimoine commun" et en reconnaissant sa protection comme d'intérêt général, cette loi confère de fait une valeur en soi à la gestion quantitative de l'eau, sortant celle-ci d'une logique exclusivement économique ou d'une logique de gestion qualitative ; désormais, il s'agit de procéder à une "gestion équilibrée" permettant de satisfaire ou de concilier différents usages et la préservation de la ressource en eau.

Cette loi introduit deux types de dispositions fondamentales vis-à-vis de la gestion de la pénurie en eau :

- Des mesures de gestion de crise, donnant au préfet le pouvoir de limiter ou de suspendre provisoirement les usages de l'eau, et donc l'irrigation, en cas de sécheresse ou de risque de pénurie d'eau ; le décret d'application n°92-1041 du 24 septembre 1992 spécifie les modalités de mise en œuvre de ces mesures ;
- Des dispositions permettant de mieux gérer la ressource en eau sur le plan quantitatif de façon prévisionnelle, en donnant la possibilité :

  - D'une part, de définir des règles de gestion quantitative de l'eau à l'échelle d'un bassin versant : en effet, la loi crée deux instruments de planification à valeur légale, le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), et le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE). Un SDAGE, qui fixe les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de l'eau à l'échelle du territoire d'une Agence de l'Eau, définit les objectifs à respecter - et en particulier les objectifs quantitatifs - et les aménagements à réaliser pour les atteindre ; un SAGE spécifie les modalités de gestion de l'eau à adopter à l'échelle d'une unité cohérente du point de vue du fonctionnement de la ressource en eau (unité hydrographique ou système aquifère)[59].

  - D'autre part, de contrôler les prélèvements en eau : ceux-ci sont en effet soumis à une autorisation préalable de l'autorité administrative (ou à une déclaration selon les seuils en jeu)[60] et toute installation de prélèvement en eau superficielle ou de pompage d'eaux souterraines doit être pourvue de moyens de mesure ou d'évaluation appropriés[61] ; les seuils d'autorisation et de déclaration sont abaissés dans les "zones de répartition des eaux", qui constituent des "*zones présentant une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins*" (décret n°94-354 du 29 avril 1994).

Ainsi, la loi sur l'eau de 1992 renforce les pouvoirs de police de l'Administration pour mieux contrôler les prélèvements en eau, tout en incitant à développer des règles de gestion quantitative de l'eau dans le cadre de la mise en place d'une gestion globale de l'eau à l'échelle du bassin versant. A la différence des politiques précédentes, elle mise fortement sur une meilleure gestion de la demande.

Les aménagements hydrauliques ne sont pas pour autant écartés : tout d'abord, l'une des finalités même des SDAGE est de définir les aménagements à effectuer pour atteindre les objectifs quantitatifs

59. Articles 3 et 5.
60. Article 10.
61. Article 12.

ou qualitatifs. Par ailleurs, l'analyse du SDAGE Adour-Garonne adopté et approuvé en 1996, par exemple, montre que le PDRE reste une priorité d'action dans ce territoire : ainsi, la mesure C6 indique clairement que "*les objectifs du PDRE et les incitations financières correspondantes sont poursuivis*" (p.80). Mais cette mesure précise que la mise en œuvre du PDRE doit se faire "*avec une priorité à la reconstitution des DOE sur les rivières déficitaires*" (p.80) ; la construction de nouvelles ressources en eau doit donc permettre de respecter les objectifs quantitatifs fixés dans le SDAGE. En outre, la mesure C8 précise que les aménagements hydrauliques doivent tenir compte des écosystèmes aquatiques et que tout projet doit comporter un examen des alternatives possibles et une analyse économique ; l'aménagement n'est donc plus considéré comme l'instrument de régulation à favoriser systématiquement et doit être soigneusement justifié.

Notons enfin que la territorialisation de l'action publique introduite par la création des Agences de l'Eau et renforcée par la planification de bassin fait que les politiques en matière d'aménagement hydraulique peuvent fortement différer d'un bassin à l'autre : ainsi, contrairement au SDAGE Adour-Garonne, le SDAGE Loire-Bretagne stipule, dans ses préconisations concernant les eaux douces, qu'"*il convient de limiter strictement la construction, d'apprécier l'opportunité du maintien ainsi que d'aménager la gestion des seuils, barrages, et d'une façon générale de tout obstacle dans le lit, tant pour l'imiter les ralentissements de l'écoulement nuisibles à la qualité des eaux (envasement, eutrophisation) que pour permettre la libre circulation dans l'eau et sur l'eau*" (p.32) ; la politique de bassin invite donc ici clairement à rechercher d'autres voies de régulation que l'aménagement.

• Une évolution indissociable d'une transformation de l'action publique elle-même

Cette évolution est indissociable d'une transformation de l'action publique elle-même, caractérisée par :
- le développement d'un pouvoir d'intervention publique sur l'eau d'ordre gestionnaire pour réguler les usages de l'eau ;
- le renforcement d'un pouvoir de police de l'Etat simultanément à l'affirmation d'un principe de concertation ;
- le développement d'un pouvoir d'intervention sur l'eau d'ordre gestionnaire pour réguler les usages de l'eau.

Historiquement, le traitement des litiges d'ordre privé entre riverains relève du juge judiciaire, comme l'indique clairement l'article 645 du Code Civil :

"S'il s'élève une contestation entre les propriétaires auxquels ces eaux [il s'agit des eaux de pluie, des eaux de source ou des eaux courantes] peuvent être utiles, les tribunaux, en prononçant, doivent concilier l'intérêt de l'agriculture avec le respect dû à la propriété ; et, dans tous les cas, les règlements particuliers et locaux sur les cours et l'usage des eaux doivent être observés."

Cependant, le Code Rural stipule que l'Administration doit prendre toutes dispositions pour assurer le libre cours des eaux (art. 103), mais qu'elle ne peut intervenir que dans un but d'intérêt général ; elle ne peut donc régler des différends entre particuliers, sous peine d'excès de pouvoir. Par contre, au nom de l'intérêt général, elle peut réglementer les prises d'eau fondées en titre.

Ainsi, c'est le juge judiciaire, garant du respect des droits privés, qui est chargé de régler les conflits d'usage et à qui il incombe de prescrire des mesures susceptibles de concilier les intérêts des différentes parties, à condition toutefois de ne pas fixer de dispositions générales, empiétant sur le domaine de l'Administration et tant que l'on ne trouve pas dans une situation de pénurie drastique, qui renvoie alors à une intervention de l'Etat, en tant que garant de l'intérêt général.

Dans la pratique, il a été parfois difficile d'apprécier de quelle compétence relevait une situation donnée, comme en témoignent les contradictions relevées par Denozière (1985) entre deux arrêts du début du siècle signés à deux mois d'intervalle : d'une part, un arrêt de la Cour de Cassation du 21-01-1901 (Marquise de Fortou), qui estime que c'est à l'administration qu'il incombe de faire un règlement d'eau dès lors que de nombreux et importants intérêts sont engagés ; et, d'autre part, l'arrêt Pagès du Conseil d'Etat du 22-03-1901, qui considère que l'Administration n'a pas le droit de fixer des règles de répartition individuelles de l'eau pour des eaux relevant d'un droit privé. C'est ce second arrêt qui a été strictement observé jusqu'à aujourd'hui, bien que la loi des 12-20 août 1790, qui semble toujours

en vigueur, attribue clairement à l'autorité administrative la mission fondamentale de "*diriger toutes les eaux du territoire vers un but d'utilité générale*".

Le fort accroissement de la demande en eau remet en cause cet équilibre des pouvoirs : en effet, dès lors qu'il ne s'agit plus seulement de concilier un nombre limité d'intérêts particuliers sur un espace restreint, mais de répartir un volume d'eau disponible entre des intérêts multiples, la notion de préservation d'un intérêt général devient beaucoup plus forte, et la nécessité d'organiser une gestion d'ensemble de la ressource s'affirme.

• Le renforcement d'un pouvoir de police de l'Etat indissociable de l'affirmation d'un principe de concertation

Cette organisation d'une gestion d'ensemble de la ressource ne signifie pas pour autant une orientation vers une intervention accrue de l'Etat en matière de gestion de l'eau. En effet, si la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 renforce le pouvoir de police de l'Etat, elle introduit par ailleurs un principe de concertation. Cette idée de concertation est implicitement contenue dans l'article 2 de la loi sur l'eau de 1992 qui précise que ses dispositions "*ont pour objet une gestion équilibrée de la ressource en eau*" impliquant la conciliation d'intérêts ; elle est clairement inscrite dans les instruments de planification créés (SDAGE et SAGE) qui reposent sur le travail d'instances pluripartites rassemblant des représentants de l'administration, des élus, ainsi que des usagers et des associations (Comité de Bassin pour un SDAGE[62], Commission Locale de l'Eau[63] pour un SAGE).

Dans ces conditions, il devient difficile de séparer :
- les activités de police de celles de gestion,
- le travail de l'administration de celui d'un collectif de parties prenantes.

1.2.5.2. Une situation de dérégulation croissante de la gestion quantitative de l'eau

Si l'évolution des politiques publiques témoigne d'une volonté croissante de gérer les situations de pénurie en eau en organisant mieux la gestion de l'eau sur le plan quantitatif, la situation actuelle révèle néanmoins un problème de plus en plus prégnant de dérégulation dans ce domaine. De façon générale, cette dérégulation s'exprime par une montée des conflits territoriaux concernant l'eau sur le plan quantitatif et par une mise en cause croissante de l'irrigation du maïs dans l'opinion publique qui prend conscience du caractère limité de la ressource en eau.

1.2.5.2.1. Une montée des conflits territoriaux concernant l'eau sur le plan quantitatif

Si les conflits territoriaux concernant l'eau sur le plan quantitatif ne sont pas nouveaux, ceux-ci tendent à se développer (Guérin, 2005). Il n'existe cependant pas de travaux permettant d'analyser de façon systématique ces conflits et d'apprécier ceux-ci de façon quantitative. Sur la base de différents travaux menés en sciences sociales, il est toutefois possible de mettre en évidence une grande diversité de conflits d'usage. Ces conflits peuvent donner lieu à une contestation des modes d'intervention publique visant à améliorer la régulation territoriale de la gestion quantitative de l'eau en place et peuvent s'exprimer par des recours juridiques.

• Une augmentation et une diversification des conflits d'usage

Les concurrences entre l'irrigation et d'autres usages de l'eau ne sont pas nouvelles. Le développement des besoins en eau et la diversification des usages de l'eau tend toutefois à multiplier les types de conflits territoriaux : il peut s'agir de concurrences avec d'autres usages s'exerçant dans le

62. Un Comité de Bassin est composé d'un tiers d'élus, d'un tiers d'usagers et d'associations et d'un tiers de représentants de l'Etat.
63. Une Commission Locale de l'Eau (CLE) est composée pour moitié d'élus, pour un quart d'usagers et d'associations et pour un quart de représentants de l'Etat.

voisinage, tels que les usages récréatifs et de loisirs (pêche, canoë-kayak…), mais aussi avec d'autres usages agricoles (populiculture, cressiculture…), avec des usages industriels ou encore avec l'alimentation en eau potable. Les concurrences peuvent aussi s'exercer à distance, entre l'amont et l'aval notamment, et concerner des activités littorales consommatrices d'eau douce (conchyliculture). Ces concurrences font l'objet de tensions récurrentes qui peuvent s'exprimer ouvertement sous la forme de lettres de protestation auprès des préfets, d'interpellations médiatiques ou encore de recours juridiques. Un exemple typique de ces conflits d'usage est celui qui a opposé les irrigants avec les riverains de la Conie dans la Beauce au cours des années 90 (Encadré 5).

Encadré 5. Un exemple de conflit d'usage de l'eau : le conflit entre les irrigants et les riverains de la Conie dans la Beauce (Allain, 2002)

La Conie (affluent du Loir) est l'un des cours d'eau exutoires de la nappe de Beauce, situé en Eure-et-Loir. Celui-ci s'est retrouvé complètement asséché sur sa partie avale en 1994, à la suite de prélèvements excessifs pour l'irrigation dans un contexte d'années sèches répétitives. Il en a résulté une situation très conflictuelle avec les riverains, qui se sont fortement mobilisés pour alerter les pouvoirs publics et l'opinion : ceux-là ont en effet créé une association, l'Association de Défense du Patrimoine Aquifère et de Sauvegarde Ecologique de la Conie (ADPASEC), qui a eu recours aux médias (tant locaux que nationaux) et à des actions en justice contre l'Etat auprès des tribunaux administratifs (limitation inefficace des prélèvements en eau mise en place par le préfet), pendant deux années consécutives, en 1995 et 1996, en ayant gain de cause à chaque fois.

Si les conflits d'usage ne sont pas toujours aussi publicisés, ils n'en sont pas moins réels. Les concurrences entre l'irrigation et l'alimentation en eau potable constituent en particulier une source de tensions croissantes entre acteurs locaux en maints endroits, comme en témoigne par exemple les tensions entre le Grand Lyon et les irrigants concernant l'utilisation de la nappe de l'Est Lyonnais .

• Une contestation des modes d'intervention publique visant à améliorer la régulation territoriale de la gestion quantitative de l'eau

Les conflits territoriaux concernant l'eau sur le plan quantitatif peuvent donner lieu à une contestation des modes d'intervention publique visant à améliorer la régulation territoriale de la gestion quantitative de l'eau :
- soit que l'Etat soit accusé de laxisme dans ses pouvoirs de police ;
- soit que les modes de régulation existants ou envisagés soient remis en cause.

L'Etat est en effet régulièrement mis en cause dans la mise en œuvre des mesures de gestion de crise par lesquelles il peut limiter ou suspendre provisoirement les usages de l'eau en cas de pénurie ou de risque de pénurie, et en particulier les usages agricoles (décret n°92-1041 du 24 septembre 1992). Les associations notamment (de pêche, de protection de la nature, de riverains…) reprochent à l'administration une application trop clémente des mesures prévues, ne permettant pas de préserver les milieux aquatiques et les autres usages. Mais les modes de régulation eux-mêmes peuvent faire l'objet de controverses : c'est le cas notamment des projets de construction de nouveaux barrages-réservoirs ayant une finalité de soutien d'étiage[64]. S'il est difficile d'apprécier l'évolution de la contestation dans ce domaine et son importance par rapport à d'autres projets d'aménagement, il apparaît néanmoins clairement que l'intérêt de tels ouvrages est systématiquement contesté par une partie des acteurs locaux et que le projet peut aboutir dans une impasse. Loin de pouvoir être assimilés à des conflits de type "nimbyste", les conflits relatifs à ces projets de barrage-réservoir révèlent des divergences profondes sur la régulation territoriale de la gestion de l'eau, comme en témoignent par exemple les controverses qui se sont exprimées lors du débat public sur le projet de réservoir de Charlas (Haute-Garonne) (Allain, 2005) : à une conception de la régulation misant sur un aménagement souple et structurant permettant de satisfaire les besoins en eau et d'améliorer les débits des rivières s'oppose une conception de la régulation reposant sur une remise à plat globale de la gestion de l'eau, tant sur le plan de l'offre que de la demande en eau, ou encore des objectifs d'état du milieu à respecter.

64. C'est aussi le cas d'autres types d'aménagement hydrauliques, comme les retenues de substitution, notamment lorsque celles-ci sont généralisées à l'échelle d'un territoire, ou comme les systèmes d'adduction d'eau.

A travers ce type de controverses, c'est la question même de la répartition territoriale de l'eau qui peut être soulevée : ainsi, le débat public sur le projet de réservoir de Charlas pose la question de la pertinence d'une fourniture en eau accrue de la Garonne à la Gascogne.

• Une "judiciarisation" des conflits

Il semble que l'on assiste actuellement à un développement des contentieux en ce qui concerne la gestion quantitative de l'eau. Il est toutefois difficile de préciser si celui-ci provient d'une exacerbation des conflits dans ce domaine ou d'un développement des textes juridiques en faveur d'une meilleure protection de la ressource en eau. A côté des contentieux entre riverains se développent ainsi des contentieux administratifs : ainsi, comme on l'a vu précédemment, des conflits peuvent porter sur l'application des mesures de gestion de crise et donner lieu à des recours auprès des tribunaux administratifs susceptibles d'entraîner une condamnation de l'Etat. Mais les instruments de régulation proposés par les pouvoirs publics peuvent aussi faire l'objet de recours juridiques, qui peuvent entraver le processus décisionnel, voire remettre en cause une décision prise : un exemple de ce type de situation est offert par le projet de retenue de la Trézence (Charente-Maritime) dont la Déclaration d'Utilité Publique a été annulée par le Conseil d'Etat, au terme d'une analyse de bilan contestant l'utilité publique du projet (Allain, 2005) (Encadré 6).

Encadré 6. L'avis du Conseil d'Etat sur le projet de retenue de la Trézence (22 octobre 2003)

"Considérant qu'une opération ne peut légalement être déclarée d'utilité publique que si les atteintes à la propriété privée, le coût financier et, éventuellement, les inconvénients d'ordre social et les atteintes à d'autres intérêts publics qu'elle comporte ne sont pas excessifs eu égard à l'intérêt qu'elle présente ;

Considérant que le projet de barrage de la Trézence a pour objectifs, d'une part, de favoriser la production d'huîtres dans le bassin de Marennes-Oléron, d'autre part, de soutenir les débits d'étiage de la Charente et de la Boutonne ; qu'en revanche les avantages que le barrage pourrait présenter pour l'agriculture ne figurent pas parmi les objectifs de l'opération ;

Considérant, qu'il ressort du dossier soumis à l'enquête qu'alors que la production d'huîtres dans le bassin de Marennes-Oléron varie chaque année de 30% environ, son augmentation du fait de l'existence du barrage demeure aléatoire et serait, en tout état de cause, d'une très faible importance ; que les auteurs du projet admettent eux-mêmes que l'incidence du barrage sur la ponte des larves d'huîtres serait incertaine ; qu'ainsi, les bénéfices attendus pour l'ostréiculture apparaissent très limités ;

Considérant, qu'il ne ressort pas des pièces du dossier que la réalisation du barrage de la Trézence permettrait de restaurer des débits satisfaisants de la Charente et de la Boutonne dès lors, notamment, que les quotas de prélèvements autorisés pour l'irrigation seraient augmentés ;

Considérant, que si le département de la Charente-Maritime fait en outre valoir que les plans d'eau créés par le barrage constitueront un facteur d'attraction touristique, il ressort de l'étude d'impact qu'il n'existe aucun projet de développement d'activités touristiques aux abords de la retenue ; qu'en outre l'accès au plan d'eau principal serait interdit en raison de la mauvaise qualité de ses eaux ; que, dans ces conditions, les conséquences positives du projet sur l'activité touristique ne sont pas établies ;

Considérant qu'il résulte de ce qui précède, que le projet de barrage de la Trézence ne présente qu'une faible utilité publique au regard des objectifs annoncés de cette opération ;

Considérant, en revanche, que le coût de l'opération, évalué à 67 millions d'euros, est élevé ; qu'en outre la notice explicative jointe au dossier de l'enquête indique que l'eau retenue dans le plan d'eau principal serait de mauvaise qualité, d'une couleur noire prononcée et susceptible de dégager des odeurs de méthane et d'hydrogène sulfuré liées à la décomposition de la matière organique ; que, de plus, la forte charge de cette eau en matière organique serait susceptible d'avoir des conséquences négatives sur les poissons vivant dans les cours d'eau situés en aval ainsi que sur les huîtres et les autres coquillages du bassin de Marennes-Oléron ;

Considérant qu'il ressort de l'ensemble de ces éléments que les inconvénients du projet l'emportent sur ses avantages dans des conditions de nature à lui faire perdre son caractère d'utilité publique ; que, dès lors, et sans qu'il soit besoin d'examiner les autres moyens des requêtes, les requérants sont fondés à demander l'annulation du décret du 29 janvier 2001 déclarant le barrage de la Trézence d'intérêt général et d'utilité publique."

En conséquence, le Conseil d'Etat décide que "*le décret du 29 janvier 2001 est annulé*".

1.2.5.2.2. Une prise de conscience du caractère limité de la ressource en eau dans l'opinion publique et une mise en cause croissante de l'irrigation du maïs

Une approche des perceptions de la sécheresse dans l'opinion publique peut être effectuée à travers la consultation menée en 2004 par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable dans le cadre du débat national sur la politique de l'eau. Le sondage national réalisé en février 2004 par l'Institut de Sondage Lavialle (ISL)[65] montre que si c'est la qualité de l'eau au robinet qui reste la préoccupation principale des Français - plus de 80% des personnes interrogées considèrent qu'il s'agit d'un problème très important -, la pénurie d'eau et la sécheresse[66] apparaissent aussi comme un problème très important pour plus de 70% de nos concitoyens. L'enquête papier et internet réalisée par l'Office International de l'Eau (OIEau) à la même époque, dans ce même cadre, qui touche un public plus large (8 383 questionnaires) mais plus spécifique – il s'agit d'un public sensibilisé à la gestion de l'eau –, confirme cette tendance. De manière générale, le bilan réalisé par le Centre d'Information sur l'Eau (C.I.-Eau) en 2005 sur l'évolution de l'opinion publique en matière d'eau au cours des dix dernières années montre que "*les Français ont de plus en plus conscience du caractère limité de la ressource en eau*" (p.12) et que "*la canicule de 2003 a joué un rôle révélateur*" (Ib.) dans cette reconnaissance.

Cette prise de conscience va de pair avec une mise en cause croissante de l'agriculture et notamment de la maïsiculture irriguée. Les prises de positions de l'UFC Que-choisir au cours de ces deux dernières années sont révélatrices de cette évolution : dans un article paru en mai 2004 intitulé "*Ressources en eau : la pénurie organisée*", l'association considère ainsi que "*la sécheresse a bon dos pour justifier les arrêtés de restriction d'eau*" ; pour elle, "*la vraie raison est ailleurs, dans l'explosion des besoins en eau quand les rivières sont au plus bas*". Les têtes de paragraphes, "*la faute à l'irrigation*" ou encore "*le maïs irrigué, ennemi de l'eau*" montrent clairement que c'est l'agriculture irriguée, et notamment la culture du maïs, qui est mise en cause. Dans un rapport réalisé en 2005, intitulé "*Politique de lutte contre la sécheresse : la gestion archaïque des Agences de l'Eau*", l'association va plus loin, accusant les Agences de l'Eau de pratiquer une politique de redevances inadaptée. Ces différentes analyses trouvent largement écho auprès du WWF-France, de France Nature Environnement et de la Confédération paysanne notamment, mais un média comme Le Monde s'interroge aussi de plus en plus fréquemment sur les conséquences d'une tension croissante sur l'utilisation de la ressource en eau. Dans un article paru le 21 janvier 2006, intitulé "*2025 : l'humanité est contrainte à partager l'eau*", la question suivante est ouvertement posée : "*faut-il poursuivre l'exploitation du maïs dans le sud-ouest de la France, où les pénuries d'eau se multiplient ?*". La mise en relation entre situations de pénuries en eau et usages agricoles de l'eau tend donc à sortir des argumentaires des associations de protection de la nature ou de consommateurs et des mouvements altermondialistes pour se généraliser dans l'opinion publique. La consultation menée en 2004 par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable dans le cadre du débat national sur la politique de l'eau confirme cette évolution : ainsi, le sondage réalisé par ISL montre que dans les régions régulièrement soumises à des situations de pénuries en eau, plus de 50% des Français considèrent qu'"*avoir des pratiques d'irrigation moins consommatrices d'eau*" est tout à fait prioritaire, devant une modification de l'usage des ressources hydro-électriques et la création de nouvelles réserves d'eau ; cette tendance se retrouve dans l'enquête papier et internet réalisée par l'OIEau.

1.2.5.3. Les voies concrètes de régulation actuellement observables visant à gérer la pénurie en eau et à améliorer la gestion quantitative de l'eau

L'analyse des voies concrètes de régulation actuellement observables visant à gérer la pénurie en eau et à améliorer la gestion quantitative de l'eau révèle trois tendances principales :
- l'adoption généralisée d'un principe de concertation,
- l'attribution d'un rôle prépondérant aux SAGE pour instaurer des règles de gestion quantitative de l'eau,
- une régulation passive par la réduction des surfaces irriguées en maïs.

65. Ce sondage a été réalisé par téléphone du 5 au 12 février 2004 auprès d'un échantillon de 1002 personnes âgées de 18 ans et plus, représentatif de la population française en terme de critères socio-démographiques.
66. Les deux items "pénurie d'eau" et "sécheresse" ne sont pas différenciés dans le questionnaire.

1.2.5.3.1. L'adoption généralisée d'un principe de concertation

Le principe de concertation introduit dans la politique de l'eau se présente en fait comme un principe général d'action publique dans ce domaine, comme en témoignent la mise en place de Comités Sécheresse départementaux ; le développement d'accords volontaires en matière de gestion de crise, comme les systèmes de gestion volumétrique ; la création d'instruments contractuels, comme les Plans de Gestion d'Etiage (PGE) en Adour-Garonne. Par ailleurs, il importe de souligner que la concertation ne relève pas d'une initiative de l'Etat, mais que maintes expériences de concertation ont déjà été tentées depuis longtemps au plan local pour améliorer la régulation de la gestion quantitative de l'eau.

• La mise en place de Comités Sécheresse départementaux

A l'initiative des préfets, des Comités Sécheresse départementaux – encore appelés Observatoires Sécheresse - ont progressivement été mis en place. Ces instances à caractère informel rassemblent l'ensemble des acteurs locaux concernés (collectivités territoriales, administrations, profession agricole, pêcheurs, associations, producteurs d'eau potable). Elles visent à permettre un partage régulier d'informations entre ces acteurs sur l'état de la ressource d'un point de vue quantitatif et à aider l'administration à juger des mesures de gestion de crise à prendre. Elles peuvent aussi favoriser la communication avec la profession agricole pour inciter celle-ci à modifier ses assolements.

• Le développement d'accords volontaires en matière de gestion de crise, comme les systèmes de gestion volumétrique

Les mesures de gestion de crise prévues par la loi sur l'eau de 1992 amènent à mettre en place des mesures d'interdiction d'irriguer pendant des durées journalières et des plages horaires croissantes selon la gravité de la situation. Un tel système entrave fortement la production agricole (altération de la production si la culture subit des stress hydriques ; contraintes d'organisation du travail du fait d'une disponibilité en temps d'arrosage réduite et d'une difficulté à prévoir l'occurrence des interdictions) et génère des effets pervers nuisibles à son efficacité (risque de suréquipement pour profiter au maximum des plages horaires autorisées).

Dans plusieurs régions, la profession agricole a ainsi cherché à négocier avec l'administration des systèmes de gestion de crise permettant de limiter les prélèvements en eau tout en ne compromettant pas (trop) la production agricole. Ces systèmes dits de "gestion volumétrique" (Allain, 2000a, 2000b) consistent à ce que les irrigants s'engagent à ne pas dépasser la consommation d'un volume d'eau fixé à l'avance au cours de la période estivale, ce volume pouvant être réduit progressivement en cas de pénurie ; ils permettent donc aux agriculteurs de disposer de plus de souplesse pour gérer l'irrigation. Ces systèmes de "gestion volumétrique" peuvent être considérés comme des "accords volontaires" (voluntary agreements) (Glachant, 1995 ; Carraro et Lévêque, 1999), c'est-à-dire comme des contrats bilatéraux passés entre l'administration et un secteur économique dans lesquels les acteurs de ce secteur acceptent de respecter un certain objectif environnemental en contrepartie d'un avantage, qui porte ici sur une flexibilité dans l'application d'une contrainte[67] ; de telles "activités publiques conventionnelles" (Lascoumes et Valluy, 1996) se retrouvent ainsi largement dans tout le champ de l'environnement.

Dans le cas des systèmes de "gestion volumétrique", les accords sont passés entre l'échelon départemental de l'administration responsable de l'application des mesures de gestion de crise (DDAF en général) et des représentants de la profession agricole (Chambre départementale d'agriculture, syndicats d'irrigants). Les irrigants acceptant de respecter ces conventions signent des engagements particuliers. Loin d'être uniformes, ces systèmes de "gestion volumétrique" présentent une grande diversité, comme en témoigne l'analyse conduite en Poitou-Charentes en 2000 (Allain, 2000a, 2000b) (Encadré 7).

67. Dans le secteur industriel où ces accords volontaires sont le plus développés, les avantages pour les entreprises portent sur l'allocation de subventions visant à améliorer leurs technologies dans le sens d'une meilleure protection de l'environnement.

Encadré 7. La diversité des systèmes de "gestion volumétrique" adoptés en Poitou-Charentes en 2000 (Allain, 2000a, 2000b)

L'analyse des systèmes de "gestion volumétrique" adoptés en Poitou-Charentes en 2000 a révélé une grande diversité d'accords, les points de variation portant sur :

- **Le volume de référence fixé** : s'il est défini dans tous les cas principalement en fonction des besoins du maïs, culture principale de la région et fortement consommatrice en eau, il peut fluctuer de 2100 à 2800 m^3/ha et tenir compte ou non des conditions pédologiques locales ;

- **Le volume maximal attribué à un irrigant** : il peut être soit un volume calculé annuellement sur la base du volume de référence affecté de la surface irriguée déclarée par l'agriculteur pour la campagne, soit un volume fixe, en fonction d'une surface de référence, qui pose alors la question des modalités de calcul de celle-ci (surface maximale ou moyenne sur n années ; surface réduite d'un certain pourcentage…) ; par ailleurs, pour les prélèvements en nappe, le volume de référence retenu peut être un volume corrigé en fonction du niveau de la nappe en début de campagne ;

- **La période de référence** adoptée, et notamment la date de début prise en compte : celle-ci peut être précoce et définir une période d'irrigation maximale pour l'ensemble des cultures, ou bien correspondre au début de la période d'irrigation la plus importante, celle du maïs (il s'agit alors de se situer après l'irrigation des pois protéagineux, autre culture très répandue, de manière à éviter une concurrence entre pois et maïs sur l'utilisation du volume d'eau attribué pour l'irrigation du maïs) ;

- L'existence ou non d'un **calendrier de répartition** du quota d'eau attribué, pour éviter que trop d'eau ne soit consommée au même moment ;

- **Les modalités de répartition** de ce quota, tant sur la périodicité de fractionnement qui peut aller de la semaine à la quinzaine, que sur les montants des volumes périodiques ; l'enjeu pour les agriculteurs est d'avoir assez d'eau à la floraison du maïs (juillet), période très sensible à un stress hydrique, mais aussi jusqu'à la maturité de la plante ;

- La possibilité ou non **d'un report** d'un volume non utilisé d'une période à l'autre ;

- La sévérité plus ou moins grande **des restrictions éventuelles** en cours de campagne (avec notamment, la possibilité ou non d'une interdiction totale d'irriguer).

Si en Poitou-Charentes, les systèmes de "gestion volumétrique" ont été introduits à l'échelle départementale, en Beauce c'est un système interdépartemental qui a été conçu du fait de la taille de la nappe de Beauce qui s'étend sur environ 9000 km^2 et couvre six départements (Allain, 2002) (Encadré 8).

Encadré 8. La mise en place d'un système interdépartemental de "gestion volumétrique" pour la nappe de Beauce (Allain, 2002)

En Beauce, une concertation s'est engagée entre l'administration et la profession agricole dès le début des années 90 pour tenter d'apporter des solutions aux étiages drastiques des cours d'eau exutoires de la nappe sur laquelle s'exerce une forte pression d'irrigation. Un groupe de travail interdépartemental réunissant ces deux types d'acteurs[68] s'est mis en place à partir de 1994 pour essayer de mieux coordonner les actions menées et d'obtenir une meilleure efficacité ; il a ainsi édicté en mars 1995 une "Charte de Gestion" qui constitue un premier système interdépartemental de gestion de crise.

- **Un premier système interdépartemental de gestion de crise en 1995**

Cette "Charte de gestion" instaure :

- la pérennisation du groupe de travail créé sous la forme d'une "commission interdépartementale de concertation", chargée de se réunir au moins deux fois par an : en février ou en mars, pour définir les règles d'irrigation de la campagne à venir en fonction du niveau de la nappe et de ses tendances d'évolution (à la

68. Ce groupe, souvent appelé "Groupe Irrigation en Beauce", a ainsi réuni à partir de 1994 :
- pour l'administration : les directeurs des deux DRAF, des six DDAF et des deux DIREN ou leur représentant ;
- pour la profession agricole : les présidents des 5 Chambres d'Agriculture concernées (puisque l'Essonne et les Yvelines ont une Chambre commune), des 6 syndicats départementaux d'irrigants ou leur représentant.

hausse ou à la baisse), et éventuellement permettre aux agriculteurs de modifier leur assolement ; en octobre, pour dresser un bilan de la campagne écoulée ;

- la mise en place d'un système de suivi de la nappe reposant sur un réseau de 9 piézomètres dans le Centre et de 2 piézomètres en Ile-de-France et la définition de trois seuils de référence correspondant à des niveaux bas différents de la nappe au cours des 20 précédentes années[69] ;

- la fixation de durées d'interdiction d'irriguer en fonction des trois seuils d'alerte définis précédemment et de la tendance du niveau de la nappe à baisser ou à remonter[70], ces mesures devant être rediscutées à partir du seuil inférieur, considéré comme seuil de crise à ne pas atteindre.

Si cette "Charte de Gestion" peut être vue comme le signe de l'engagement de la profession agricole à mieux respecter la ressource en eau, elle ne s'est cependant pas avérée plus efficace que les mesures préfectorales de gestion de crise prises précédemment par département. Pour assurer une meilleure gestion de la nappe, il devenait en effet nécessaire de déterminer un volume global utilisable en fonction du niveau de celle-ci et de répartir ce volume entre les différentes catégories d'usagers. L'idée de passer à un système dit de gestion volumétrique a ainsi fini par s'imposer en 1997 ; l'échéance d'adoption de moyens de mesure des prélèvements en eau fixée par la loi et la volonté de la profession agricole de convaincre l'Agence de l'Eau Seine-Normandie de subventionner la pose de compteurs, comme cela était le cas dans le bassin de Loire-Bretagne, ont joué dans ce sens. L'objectif fixé a été de mettre en place le dispositif en 1999.

- **Un premier système interdépartemental de "gestion volumétrique" en 1999**

Le dispositif de gestion volumétrique sur l'ensemble de la nappe de Beauce a été élaboré entre fin 1997 et fin 1998. Il repose sur le principe suivant :

- définition d'un volume de référence global pour les prélèvements agricoles sur l'ensemble de la nappe en fonction du niveau de celle-ci (application d'un coefficient réducteur à un volume global maximal pouvant être prélevé pour l'irrigation en situation de nappe haute) ; ce volume a été fixé par le préfet de la région Centre après arbitrage en faveur de la profession agricole entre les valeurs proposées par la profession agricole (la plus élevée), par la DIREN (la plus basse) et par la DDAF du Loiret (intermédiaire) ;

- répartition de ce volume entre les irrigants des 6 départements, après discussion et choix d'une clé de répartition (partage entre départements au prorata des surfaces agricoles totales des irrigants, puis entre irrigants de chaque département selon des modalités propres à chaque département)[71]. Un irrigant se voit attribué individuellement un volume de référence annuel pour une période de 3 ans, avec une possibilité de prélever jusqu'à 20% en moins (bonus) ou en plus (malus) une année donnée, la différence étant compensée l'année suivante. Le volume maximal attribué par département n'est pas susceptible d'être augmenté ; un accroissement des surfaces irriguées départementales doit donc forcément être compensé par une réduction des volumes attribués individuellement.

Le principe du dispositif de gestion volumétrique et le volume de référence global adopté pour 1999 (360 millions de m3)[72] ont fait l'objet d'un arrêté du préfet de la région Centre, préfet coordonnateur de bassin, le 9 novembre 1998, cette décision étant en outre communiquée au préfet de la région Ile-de-France et aux 6 préfets départementaux et annoncée lors d'une conférence de presse le 13 novembre 1998.

Ce système a été ajusté en 2000 pour tenir compte d'une estimation plus juste des surfaces agricoles départementales des irrigants et d'une légère remontée de la nappe. Notons que ce dispositif est alors explicitement présenté comme ayant un caractère temporaire, mis en place pour une durée de trois ans (de 1999 à 2001), en attendant notamment l'élaboration d'un SAGE.

69. Seuil n°1 : 106,8 m (niveau d'avril 1990) ; seuil n°2 : 105,6 m (niveau de décembre 1976) ; seuil n°3 : 103,9 m (niveau de janvier 1994).

70. 24 h d'arrêt pour toutes les cultures au 1er seuil en phase de descente ; 48 h d'arrêt pour les céréales à paille et 24 h pour les autres cultures au 2è seuil en phase de descente, et 24 h d'arrêt pour toutes les cultures en phase de remontée.

71. Une autre solution était envisagée qui consistait à répartir le volume de référence global au prorata des surfaces irriguées des exploitations des 6 départements, celle-ci n'a pas été retenue car d'une part les surfaces irriguées exactes n'étaient pas connues, d'autre part celles-ci pouvaient fluctuer fortement d'une année à l'autre. C'est la solution proposée par la DDAF du Loiret, appuyée par le président représentant les syndicats d'irrigants de ce département qui a été retenue.

72. Cette valeur correspond aux 450 millions de m^3 demandés par la profession agricole et approuvés par le préfet de la région Centre, affectés d'un coefficient correcteur de 0,80 correspondant au niveau de la nappe cette année-là.

• La création d'instruments contractuels, comme les Plans de Gestion d'Etiage (PGE) en Adour-Garonne

Si la loi sur l'eau de 1992 crée les SAGE pour instaurer des règles de gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant, c'est un instrument de planification dédié à la gestion quantitative de l'eau, le Plan de Gestion des Etiages, qui est recommandé par le SDAGE en Adour-Garonne (mesure C5), notamment pour les zones déficitaires. Cet outil doit expliciter :

"- les valeurs des DOE et DCR, les volumes limites de consommation nette, leur répartition, entre usages et zones, avec le cas échéant l'échéancier lié aux dates de mise en service des ressources nouvelles,
- les conditions de limitation progressive des prélèvements et rejets en situation de crise,
- les conditions d'utilisation des grands barrages et transferts,
- les modalités institutionnelles de gestion collective des prélèvements et des ressources (responsabilité de réalisation et de gestion, pratique de concertation, coût, prix, tarification…)" (p.79).

A la différence du SAGE qui a une valeur légale, le PGE est un instrument contractuel.

• De nombreuses expériences locales de gestion concertée de l'eau

De nombreuses expériences locales de gestion concertées de l'eau se sont aussi mises en place à l'initiative d'acteurs gestionnaires de l'eau, parfois avant même la mise en place de la loi sur l'eau, pour gérer les situations de pénurie en eau. La Commission Neste offre un exemple de ce type d'expérience (Allain et al., 1999) (Encadré 9).

Encadré 9. La Commission Neste (Allain et al., 1999)

La Commission Neste est une instance pluripartite créée en 1988 pour instaurer un organe de concertation permanent entre les acteurs locaux, afin de mettre en place une gestion prévisionnelle du système Neste susceptible d'éviter les situations de crise et de résoudre collectivement celles-ci. Elle rassemble autour du gestionnaire de l'eau, - la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) -, des représentants de l'Etat ou de ses établissements publics (les 5 MISE, 1DDE, 1 DDASS, 2 DRAF, 1 DIREN, 1 SGAR[73], l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, les Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement), des collectivités territoriales (les 5 départements du Gers, de la Haute-Garonne, des Hautes-Pyrénées, du Lot-et-Garonne et du Tarn-et-Garonne), les 2 régions Midi-Pyrénées et Aquitaine, le Syndicat Mixte d'Etude et d'Aménagement de la Garonne) et des usagers (les 5 Chambres d'Agriculture et 11 syndicats d'irrigants pour la profession agricole ; 1 industriel ; EDF ; la Fédération Départementale de Pêche et de Pisciculture des Hautes Pyrénées). La Commission Neste est présidée par un élu et est animée par la CACG et la DIREN. Le SGAR, qui représente le concédant, c'est-à-dire l'Etat, a un droit de veto sur les décisions prises par la CACG.

La Commission Neste se réunit au minimum une fois par an, avant la campagne d'irrigation (entre février et mai), afin d'établir un bilan de l'année précédente et de définir le quota qui sera alloué à l'irrigation en fonction de l'état de remplissage des retenues pour permettre le maintien d'un débit de salubrité dans les rivières et l'alimentation en eau potable à l'automne. Sauf situation exceptionnelle induisant une seconde réunion de la Commission, ce quota est la référence sur laquelle s'établit la répartition de l'eau entre les irrigants dans le cadre de "conventions de restitution". Ce contrat de droit privé, établi entre la CACG et un irrigant, correspond à un contrat individuel de fourniture d'eau pour la période du 1er avril au 15 octobre, qui fixe le débit et le volume d'eau utilisable par l'irrigant pendant cette période, le tarif de ce service et les moyens de contrôle acceptés ; par ce contrat, la CACG s'engage à garantie la fourniture d'eau à l'usager signataire.

On peut aussi citer le "Protocole relatif à la gestion des eaux du bassin de la Charente" signé le 26 mai 1992 entre l'Institution Interdépartementale pour l'aménagement du fleuve Charente et de ses affluents, l'Etat, l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et les représentants des usagers et riverains du bassin de la Charente (producteurs d'eau potable, irrigants, conchyliculteurs et pisciculteurs, industriels préleveurs d'eau, fédérations départementales d'associations de pêche et de pisciculture, acteurs du tourisme). Ce protocole précise notamment qu'"*en période de pénurie, les représentants de ces usagers reconnaissent comme prioritaires et incompressibles : 1) l'alimentation en eau potable*

73. Secrétariat Général pour les Affaires Régionales.

des collectivités […] ; 2) le débit et le niveau de sauvegarde des rivières nécessaires à la salubrité, à la préservation des écosystèmes, compte tenu notamment des rejets des eaux usées, à la conservation des ouvrages fluviaux et littoraux" (p.2).

1.2.5.3.2. L'attribution d'un rôle prépondérant aux SAGE pour instaurer des règles de gestion quantitative de l'eau

Si en Adour-Garonne, c'est le PGE qui est considéré comme l'instrument privilégié de régulation de la gestion quantitative de l'eau pour établir des règles de gestion à l'échelle d'un bassin versant, c'est le SAGE qui joue ce rôle dans les autres bassins. L'émergence du SAGE de Beauce et l'élaboration du SAGE Drôme sont à cet égard révélatrices (Allain, 2002).

• **En Beauce**, si une concertation importante a eu lieu entre l'administration et la profession agricole pour améliorer la gestion quantitative de l'eau et a notamment permis d'instaurer un système interdépartemental de gestion volumétrique, il a été jugé nécessaire d'aller plus loin dans le cadre de l'élaboration d'un SAGE. En réalité, l'idée de mettre en place un SAGE sur ce territoire est déjà présente dans les deux SDAGE Loire-Bretagne et Seine-Normandie approuvés en 1996, mais c'est le Ministère de l'Environnement qui impulse le démarrage de ce projet en mars 1998, en demandant aux préfets concernés de procéder à la phase de délimitation du périmètre du SAGE. C'est une argumentation d'ordre juridique, mise notamment en avant par le chef du SEMA à la DIREN du Centre, qui justifie cette demande : le Ministère de l'Environnement considère en effet que les problèmes de gestion quantitative posés appellent une solution juridique d'ordre global (fixation de règles de partage de la ressource en eau) et qu'un SAGE est le seul instrument capable d'offrir un cadre réglementaire adéquat pour fixer ces règles de répartition entre usagers.

• **Dans la Drôme**, les problèmes de gestion quantitative de l'eau dans la partie avale de la Vallée de la Drôme sont l'un des deux motifs à l'origine d'un projet de SAGE au début des années 90. En effet, le premier contrat de rivière mis en place en 1990 ne réussit pas à prendre en charge ce problème, dans une situation où la solution envisagée par la DDAF – la construction d'un barrage-réservoir sur le Bez, affluent amont de la Drôme – rencontre une forte opposition de nombreux acteurs locaux. Dans le cadre du SAGE, c'est un dispositif territorial coordonné de gestion quantitative de l'eau qui est conçu et adopté en 1997, reposant sur : 1) un gel de l'irrigation à la hauteur de la situation existant en 1995 ; 2) la création de nouvelles réserves d'eau à l'aval, grâce notamment à l'aménagement d'une retenue collinaire et à un maillage des réseaux collectifs d'irrigation avec le réseau du sud-est valentinois ; 3) la mise au point d'un système de gestion de crise instaurant notamment l'organisation de tours d'eau entre les irrigants aussi bien individuels que collectifs en cas de pénurie en eau ; 4) la mise en place d'un observatoire de l'eau permettant de suivre de façon collective l'état de la ressource en eau et les prélèvements en eau réalisés. L'une des implications du SAGE est par ailleurs la mise en compatibilité des autorisations de prélèvements délivrées par la MISE avec ce schéma d'ensemble.

Ainsi, c'est à la fois la dimension réglementaire du SAGE et son aptitude à concevoir un dispositif territorial coordonné de gestion quantitative de l'eau qui confère à cet instrument son intérêt pour la régulation de la gestion quantitative de l'eau. On retrouve ainsi par exemple ces préoccupations chez les acteurs du SAGE Nappe de l'Est lyonnais actuellement en cours d'élaboration.

Références bibliographiques

Affeltranger B., Lasserre F. (2003), « La gestion par bassin versant : du principe écologique à la contrainte politique – le cas du Mékong », in *La revue en sciences de l'environnement – VertigO*, n°3, Vol.4, 15 p. (décembre) (en ligne, avec le reste des articles de la revue, sur http://www.vertigo.uqam.ca).

AGPM (2005), « La France a besoin de maïs », *AGPM-Info Economie* 394(septembre).

Allain S., (2000a), La mise en place de systèmes de gestion volumétrique en Poitou-Charentes. Rapport INRA, AC3A, Paris.

Allain S. (2000b), Application de la loi sur l'eau et processus de négociation. Limiter l'irrigation sans nuire à la production agricole. *Gérer et Comprendre,* juin 2000, 20-30.

Allain S. (2001), « Une procédure de gestion concertée de l'eau comme celle des SAGE est-elle un outil de développement territoriale » in *Politique de l'eau et développement local. De la réflexion à l'action en milieu méditerranéen*, *Montagnes Méditerranéennes*, n° 14, pp. 25-29.

Allain S. (2002), La planification participative de bassin. Projet de recherche avec le Groupe Inter-Bassins SDAGE-SAGE. INRA, GAPP (ENS Cachan, CNRS). Vol. 1 + Vol. 2A et 2B. http://www.sitesage.org

Allain S. (2005), Décider de l'opportunité d'un barrage-réservoir ou construire une négociation territoriale explicite de la régulation politique du domaine de l'eau ? In Allain S. (coord.), Grujard J., Raulet-Croset N. – *« Décisions et délibérations dans les projets de barrage-réservoir vis-à-vis de la régulation politique du domaine de l'eau ».* Rapport final pour le programme « Concertation, Décision, Environnement » du Ministère de l'Environnement. INRA, Institut Français de Géopolitique, CRG Polytechnique. Novembre 2005, 303 p. + annexes.

Allain S., Delacourt A., Garin P., Montginoul M., Rossignol B., Ruf Th., (1999), Gestion collective d'une ressource commune. 12 études de cas. Tomes I et II. ANDA, « Irrimieux », mai 1999.

Amigues J.P., Favard P. et M. Moreaux (2001), Faut-il s'inquiéter de la baisse du niveau des aquifères ? *Economie et prévision,* 154, 127-139.

Amigues J.P., Gaudet G. et M. Moreaux (1995), De quelques spécificités de la valorisation des ressources naturelles semi-renouvelables, *Annales d'économie et de statistique,* 39, 107-121.

Annequin J. (2004), « L'agriculture en 2003 en Europe et en France. Les grands pays agricoles affectés par la sécheresse », *INSEE Première* 974 (Juin).

Arvalis-Institut du Végétal (2005), « Sorgho : Une culture pleine d'atouts dans le cadre de la nouvelle PAC », Dossier Cultures.

Aspe ch, (1998), « Le retour de l'Etat et l'argumentaire scientifique dans les conflits pour l'eau », in *Régulation de l'eau en milieu méditerranéen, risques et tensions*, *Territoires en Mutation*, n°3, pp. 83-94. (mars)

Aubriot O., Jolly G. (coord.), (2002), *Histoires d'une eau partagée. Provence, Alpes, Pyrénées*, Aix-en Provence : Université de Provence, 248 p.

Barbut L., Poux X. (2000), « Impact environnemental de la culture du maïs dans l'Union Européenne. Etude de cas sur le bassin de l'Adour », Rapport pour la Commission Européenne, DG XI.

Barel Y. (1981), « Modernité, code, territoire », in *Les Annales de la recherche urbaine*, n°10/11, pp. 3-21.

Barouch G. (1989), *La décision en miettes : systèmes de pensée et d'action à l'œuvre dans la gestion des milieux naturels*, Paris : L'Harmattan, coll. Logiques sociales, 237 p.

Barraqué B. (1997), "Subsidiarité et politique de l'eau", in *Territoires et subsidiarité. L'action publique locale à la lumière d'un principe controversé*, Faure (A.) (Dir.), Paris : L'Harmattan, coll. Logiques politiques, pp.165-201.

Barraqué B. (1999a), "Forum IV", in *Cultures, Usages et Stratégies de l'eau en Méditerranée Occidentale, tensions, conflits et régulations*, Marié M., Larcena D., Derioz P. (Dir.), Paris : L'Harmattan, coll. villes et entreprises, pp. 535-543.

Barraqué B. (1999b), « Aperçu sur les politiques contractuelles de l'eau dans les pays de l'Union européenne », in *La contractualisation, moyen d'approfondissement et de mise en œuvre de la politique de l'eau*, Paris : Cercle Français de l'eau, Sénat, pp. 27-31.

Barreteau O. (2005), Comment gérer ensemble la ressource en eau ? Quelle méthode pour faciliter les négociations entre acteurs ? Colloque « Eau et Agriculture Durable », SIMA, 2005.

Barthélémy L. (2005), « Chute du revenu agricole : l'agriculture prise dans la nasse », FNSEA - Service Economie générale.

Bec Y. & Bernardi V. (2004), « Les aides des premier et second piliers de la PAC et les résultats d'exploitations départementaux en France », *Cahiers du PAC CNASEA* 4(Novembre).

Béhar D., Estebe P. (2000), « Décentralisation ; l'acte II est déjà joué », in *L'Etat de la France. Un panorama unique et complet de la France 2000-2001*, *Politiques publiques et territoires*, 5 p. (mai)

Bel Haj Hassine et A. Thomas (2001), « Aversion au risque des agriculteurs et décisions de production : le cas de l'agriculture irriguée en Tunisie », *Economie Rurale*, 266, 91-108.

Benko G. (1998), *La science régionale*, Paris : PUF, coll. Que sais-je ?, n° 3355, 126 p.

Berger L. (1998), *Développement et ressources en eau dans trois vallées de la bordure orientale du Massif central (XIXème et XXème siècle) : la Turdine, le Gier et la Cance*, Presses universitaires, Septentrion, coll. Thèse à la carte, 583 p.

Bertin A., Desriers M., de Lapasse B. & Sparhubert J. (2004), « Les comptes prévisionnels de l'agriculture 2003 par département et catégorie d'exploitations », *Agreste Primeur* 144 (juin).

Béthemont J. (1999), *Les grands fleuves, entre nature et société*, Paris : A. colin, coll. U Géographie, 255 p.

Béthemont J. (2000), *Géographie de la méditerranée,* Paris : A. Colin, coll. U Géographie, 313 p.

Béthemont J., Faggi P., Zoungrana Tanga P. (2003), *La vallée du Sourou (Burkina Faso). Genèse d'un territoire hydraulique dans l'Afrique soudano-sahélienne.* Paris : l'Harmattan, 230 p.

Bilan du plan de gestion des étiages de l'Adour et du plan de crise interdépartemental, (2005), Rapport MEDD-IGE n° 03-060, 31-01-2005, Nau F., Payen D., Ollivier S. et A. Roux, (reds).

Billaud J.P. (1984), *Marais Poitevin, Rencontres de la terre et de l'eau*, L'Harmattan, 265 p.

BIMAGRI HS n°18, (2006)

Boggess W., Lacewell R. & Zilberman D. (1993), *Economics of water use in agriculture. In Agricultural and environmental resource economics.*, Oxford University Press, Oxford, chapter 8, pp. 319-391.

Bontemps C., Couture S. (2002), Irrigtaion water demand for the decision market, *Environment and development economics,*7, 643-657.

Bouclier-Preclaux M. (2004), La consécration jurisprudentielle des pouvoirs exceptionnels du préfet en matière de restriction des usages de l'eau, *Revue de Droit rural*, n° 320, février 2004, p. 89 et s.

Boyer P. (2003), L'électricité ne coule pas de source, *Droit de l'environnement*, n° 109, juin 2003, p. 109.

Boyer P. (2004), Transposition de la directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, *Environnement* n° 6, Juin 2004, comm. 61.

Brouwer F. (2002), "Effects of agricultural policies and practices on the environment: Review of empirical work in OECD countries", OCDE.

Brun A. (2003), « Aménagement et gestion des eaux en France : l'échec de la politique de l'eau face aux intérêts du monde agricole », in *La revue en sciences de l'environnement – VertigO*, n°3, vol. 4, 15 p.

Brun A., (2003), *Les politiques territoriales de l'eau en France. Le cas des contrats de rivières dans le bassin versant de la Saône*, Thèse de géographie, INA P-G, 376 p.

Buisson G. (2005), « Les effets de la réforme de la PAC de juin 2003 sur la consommation par l'agriculture ». Document de travail série Etudes, N° 05 E 06, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

Butault J. & Barkaoui A. (2004), « Impacts sur l'offre des régions françaises des différentes options de la réforme de la PAC de 2003 », *INRA Sciences Sociales* 4-5/03(février).

Butault J.et Delame N. (2004), « Réforme de la PAC de 2003, découplage des structures et des systèmes de production agricole en France », INRA INA-PG Grignon.

Byé P. et Pernet F. (1978), La sécheresse de 1976. Réflexions sur la position de l'agriculture dans l'économie, INRA-IREP Grenoble.

C.Huglo, Les grandes orientations de la loi du 3 janvier 1992 sur l'eau, Les Petites Affiches, 19 octobre 1992, n° 126, p. 12 et s.

C.I.-Eau, 2005 – Les Français et l'eau. 10 ans d'opinions et d'études (1995-2005). C.I.-Eau

CANS C., La Charte constitutionnelle de l'environnement : évolution ou révolution du droit français de l'environnement, *Droit de l'environnement,* n° 131, septembre 2005, pp. 194-203.

Carey J. & Zilberman D. (2002), "A model of investment under uncertainty: Modern irrigation technology and emerging markets in water", *American Journal of Agricultural Economics* 84(1), 171-183.

Carmantand De B. (1999), « Histoire des Agences de l'eau en France et dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse », in *Cultures, Usages et Stratégies de l'eau en Méditerranée Occidentale, tensions, conflits et régulations*, in Marie (M.), Larcena (D.), Derioz (P.) (Dir.), Paris : l'Harmattan, coll. villes et entreprises, pp. 502-510.

Carraro C. et Lévêque F. (Ed.) (1999), *Voluntary Approaches in Environmental Policy*. Series on Economics, Energy and Environment, Kluwer Academic Publishers, Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM).

Cartier S. (2001), « D'un espace physique à un territoire solidaire, la construction de l'appartenance au bassin versant », in *Dynamique rurale, environnement et stratégies spatiales*, Montpellier : actes de colloque, Mutation des Territoires en Europe, CNRS, Université Paul Valéry, pp. 41-48. (13-14 septembre)

Cemagref (1990), « Eau et agriculture. Leçons d'une sécheresse », Actes du colloque, Paris, 8 mars 1990.

Chambers R., Carlson A., Zilberman D. & Miranowski J., ed. (1988), *Applied production analysis. A dual approach*, Cambridge University Press.

Chambre d'Agriculture de l'Ardèche, SIVU Doux Clair, 1999, *Inventaire des besoins en eau d'irrigation satisfaits par pompage sur le bassin versant du Doux*, 61 p.

Cogoluènhes C. (2005), « Réforme de la PAC 2003 : Quel impact sur la demande agricole en eau ? ». Mémoire de DEA, Université des Sciences Sociales de Toulouse.

Commissariat général du Plan, 1997, *Evaluation du dispositif des Agences de l'eau*, Rapport au Gouvernement, Paris : Editions de la Documentation Française, 215 p.

Commissariat général du Plan, 2001, *La politique de préservation de la ressource en eau destinée à la consommation humaine*, Rapport d'évaluation, Villet-Desmeserets F. (rapporteur général), Paris : Editions de la Documentation Française, 402 p.

Cour des comptes, 2003, « Chapitre VIII, Ecologie et développement durable », in *Rapport au Président de la République, suivi des réponses des administrations, collectivités, organismes et entreprises*, pp. 315-387.

De Lapasse B. & Desriers M. (2003), « Les comptes prévisionnels par catégorie d'exploitations pour 2003 », *Agreste Primeur* 138 (décembre).

De Lapasse B. (2005), « Les comptes prévisionnels par catégorie d'exploitations pour 2005 », *Agreste Primeur* 172 (décembre).

Denozière P. (1985), *L'Etat et les eaux non domaniales*. Lavoisier, TEC& DOC, 1985

Di Méo G. (1994), "Patrimoine et territoire, une parenté conceptuelle", in *Méthodes et enjeux spatiaux, Espaces et Sociétés*, n°78, pp. 15-34.

Di Méo G. (1998), *Géographie sociale et territoire*, Paris : Nathan Université, fac géographie 320 p.

Drain M. (1998), *Régulation de l'eau en milieu méditerranéen risques et tensions*, in *Territoire en mutation*, n°3, 263 p. mars

Duran P., Thoenig J.C. (1996), « L'Etat et la gestion publique territoriale », in *Revue Française de Science Politique*, vol. 46, n°4, pp. 580-623.

Epstein R. (2004), "Après la territorialisation, la différenciation territoriale ?", in *Pouvoirs locaux*, n°63, pp. 35-42.

Etat des lieux du bassin, perceptions des acteurs et propositions d'action, (2005), Rapport Mission régionale sur l'eau Midi-Pyrénées, ARPE. 505 p.

Financement et gestion de l'eau, (2001), Rapport d'information n° 3081, Assemblée Nationale, Tavernier J. (réd).

Flory J.C. (2003), Les redevances des agences de l'eau. Enjeux, objectifs et propositions d'évolution dans la perspective de la réforme de la politique de l'eau, rapport au Premier Ministre et à la Ministre de l'Ecologie et du Développement Durable, 180 p. (octobre)

Gaonac'h, (1999), *La nature juridique de l'eau*, Ed. Johanet

Gautier E. (1996), "Trois cents ans d'aménagements fluviaux dans la vallée du Buëch : de la rivière redoutée à la rivière sacrifiée", in *Buëch et patrimoine : patrimoine, facteur de développement ?* Association départementale de sauvegarde du patrimoine du Pays du Buëch et des Baronnies, actes du colloque de Serre 19-20 avril, pp. 41-55.

Gazzaniga J.L., Ourliac J.P., Larrouy-Castera X. (1998), *L'eau : usages et gestion*. Litec, Paris, 1998, 316 p.

Gazzaniga J.L. (1992), Les principes du droit de l'eau, Les Petites Affiches, 19 octobre 1992, n°126, p. 3 et s.

Gazzaniga J.L. (1993), La loi du 3 janvier 1992 : une nouvelle politique de l'eau ?, *Revue de Droit rural*, décembre 1993, n° 218, p. 445 et s.

Gestion quantitative de la ressource en eau et instruction des demandes d'autorisation ou de déclaration des prélèvements d'eau et des forages, (2004), Circulaire MEDD-Direction de l'eau.

Ghiotti S. (2000), « Irrigation traditionnelle et gestion collective de la ressource en eau en Ardèche : les béalières », in *Approches sociales de l'irrigation et de la gestion collective de l'eau. Démarches et expériences en France et dans le monde*, *Territoires en mutation*, Rivière-Honegger (A.), RUF (T.) (Dir.), n°7-mai**,** pp. 91-99.

Ghiotti S. *(*2001), *La place du bassin versant dans les dynamiques contemporaines du développement territorial. Les limites d'une évidence. Approche comparée en Ardèche et dans les Hautes-Alpes*, thèse de géographie, Université Joseph Fourier, Grenoble I, Institut de Géographie Alpine, 496 p.

Ghiotti S. (2004), « Le bassin versant en question. Le modèle français de gestion de l'eau et les limites de son application au Liban », in *Du Sud au Nord, les territoires au nom du développement*, Antheaume (B.), Giraut (F.) (Dirs.), Paris : IRD.

Glachant M. (1995), Les accords volontaires dans la politique environnementale : une mise en perspective de leur nature et de leur efficacité. Economie et Prévisions, n°117-118, pp. 49-60.

Gohin A. (2004), « La réforme de la PAC de 2003 et le régime du paiement unique : impacts de différentes options de mise en oeuvre au niveau français », *INRA Sciences Sociales* 4-5.

Goussot A. (2003), « Place de l'eau et de sa gestion dans la construction et le développement d'un territoire : le cas de la Bièvre-Valloire (Isère et Drôme, France) », in *Revue de Géographie Alpine*, n°2, tome 91, pp. 41-55.

Goussot A. (2003), « Place de l'eau et de sa gestion dans la construction et le développement d'un territoire : le cas de la Bièvre-Valloire (Isère et Drôme, France) », in *Revue de Géographie Alpine*, n°2, tome 91, pp. 41-55.

Groom B., P. Koundouri, C. Nauges and A. Thomas (2006), "The story of the moment: Cypriot farmers respond to drought management", *Applied Economics*, à paraître.

Grujard E. (2004), « Le projet de barrage de la Trézence : une approche géopolitique d'un projet hydraulique », in *Les territoires de l'eau*, *Revue Développement durable et territoires*, dossier n°6, 13 p.

Guérin M. (coord.), (2005), Horizons 2020 : *Conflits d'usage dans les territoires, quel nouveau rôle pour l'Etat ?* Commissariat Général au Plan (Groupe Manon), mars 2005.

Guyomard H., Le Mouël C. & Gohin A. (2004), “Impacts of alternative income support schemes on multiple policy goals”, *European Review of Agricultural Economics* **31**, 125-148.

Haghe J.P. (1998), *Les eaux courantes et l'Etat en France (1789-1919), du contrôle institutionnel à la fétichisation marchande*, Paris : Thèse de doctorat de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 649 p.

Haghe J.P. (1998), *Les eaux courantes et l'Etat en France (1789-1919), du contrôle institutionnel à la fétichisation marchande*, Paris : Thèse de doctorat de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 649 p.

Hérodote (2003), *Les pouvoirs locaux, l’eau, les territoires*, Paris : La Découverte, n°110, 188 p.

Honegger A. (1990), L’eau en Camargue. Contribution de la géographie culturelle à la définition de paramètres pour une gestion optimale de l’espace de l’eau, *Espace rural*, n°23, 272 p.

Institut de Sondage Lavialle (2004), Débat national sur la politique de l’eau. Synthèse du sondage national. Ministère de l’Ecologie et du Développement Durable, avril 2004, 27 p.

Jaglin S. (2003), « La participation au service du néolibéralisme ? Les usagers dans les services d’eau en Afrique subsaharienne », in *Gestion de proximité et démocratie participative : les « nouveaux » paradigmes de l’action publique*, Bacqué M.H., Syntomer Y. (eds.), Paris : La Découverte, à paraître.

Jaglin S. (2003), « La participation au service du néolibéralisme ? Les usagers dans les services d’eau en Afrique subsaharienne », in *Gestion de proximité et démocratie participative : les « nouveaux » paradigmes de l’action publique*, Bacqué (M-H.), Syntomer (Y.) (eds.), Paris : La Découverte, à paraître.

Kay, T. Franks & L. Smith, ed., Water: Economics, management and demand. Melvyn Kay, Tom Franks and Laurence Smith (eds.). Proceedings of the 18th ICID (International Commission on Irrigation and Drainage) Conference, Oxford University, Oxford, UK.', E & FN Spoon.

La gestion équilibrée de la ressource en eau à l’échelle de bassins versants, (2004), Actes des rencontres techniques nationales, 6 Octobre 2004, Clermond-Ferrand.

Lascoumes P., Valluy J. (1996), Les activités publiques conventionnelles (APC) : un nouvel instrument de politique publique ? L’exemple de la protection de l’environnement industriel. *In Sociologie du Travail*, n°96, avril 1996, 551-573.

Launay J. (2003), *La gestion de l’eau sur le territoire*, Assemblée Nationale, Délégation à l’aménagement et au développement durable du territoire, rapport d’information n° 1170, 93 p. (novembre)

Le Moal R. (1993), Les droits sur l’eau, Revue de Droit rural, n° 218, décembre 1993, p. 449

Lecarpentier, (2004) La protection des cours d'eau domaniaux au moyen de la contravention de grande voirie, *RJ Env. 2004, n° sp. 169.*

Lefevre F. (2003), « Prospective : combien d'agriculteurs à l'horizon 2015 », *Demeter 2003*, 141-162.

Levy J., Bertin M., Combes B., Mazodier J. & Roux A. (2005), « Irrigation durable », *Rapport du Conseil Général du GREF* 2185 (9 février).

Lewis N. (2001), *La gestion intégrée de l’eau en France : critique sociologique à partir d’une étude de terrain (Bassin Loire-Bretagne)*, Université d’Orléans, Thèse de Sociologie, 498 p.

Loinger G., Nemery J.C. (dir.) (1998), *Recomposition et développement des territoires…Enjeux économiques, processus, acteurs*, Paris : L’Harmattan, coll. Administration, Aménagement du territoire, 381 p.

Loubier S., Gleyses G. (2000), « Méthode générale de calcul des coûts. Spécificités pour une application à la mobilisation de la ressource en eau pour l'irrigation », Cemagref. Série Irrigation WP 2000-11.

Mailhol J. (2003), « Analyse de la consommation en eau dans les différents contextes d’agriculture irriguée », Cemagref, UR Irrigation, Montpellier.

Manceron V. (2003), *La carpe, l’épis et le canard. Une société sous tensions entre terres et eaux (La Dombes)*, Thèse de doctorat en Ethnologie, laboratoire d’ethnologie et de sociologie comparative, Nanterre, 496 p.

Marc P. (2005), *Les cours d’eau et le droit*, Université de Toulouse 1, Thèse pour le Doctorat en Droit, 419 p.

Marié M. (1983), "Pour une anthropologie des grands ouvrages. Le canal de Provence", *Les Annales de la recherche urbaine*, n°21, pp. 5-35.

Marié M. (2003), « La formation d’un modèle aménagiste de l’eau. Démocratie, société et communauté de l’eau en Provence », in *Politiques de l’eau en milieu méditerranéen. Le cas de la péninsule Ibérique*, Drain (M.) (coord.), Madrid : Casa de Velázquez, Université de Alicante, coll. Casa de Velázquez, n° 82, pp. 15-27.

Marié M. (1982), *Un territoire sans nom : pour une approches des sociétés locales*, Paris : Librairie des Méridiens, Coll. Sociologie au quotidien, 176 p.

Marié M., Larcena D., Derioz P. (dir.), (1999), *Cultures*, *Usages et Stratégies de l'eau en Méditerranée Occidentale, tensions, conflits et régulations*, Paris : L'Harmattan, coll. villes et entreprises, 543 p.

MATE (2000), « Quels outils économiques pour la gestion quantitative de l'eau en agriculture ? Etude des effets spécifiques de la redevance prélèvement », Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, mai 2000.

MEDD (2004), « Plan d'action sécheresse - mars 2004 », Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

Merlin P. (1997), L’aménagement du territoire, in *Géographie humaine*, Paris : PUF, pp. 381-422.

Mermet L., Treyer S. (2001), « Quelle unité territoriale pour la gestion durable de la ressource en eau ? », in *Les outils d’une bonne qualité de l’eau*, *Annales des Mines*, Paris : Edition ESKA, Coll. Responsabilité et Environnement, pp. 67-79.

Meublat G., Le Lourd P. (2001), « Les Agences de Bassins : un modèle français de décentralisation pour les pays émergents. La rénovation des institutions de l'eau en Indonésie, au Brésil et au Mexique », in *Les nouvelles politiques de l'eau. Enjeux urbains, ruraux, régionaux*, *Revue Tiers Monde*, Meublat (G.) (Dir.), Paris : PUF, Tome XLII, n°166, pp. 375-401. (avril – juin)

Narcy J.B. (2003), « La politique de l'eau face à la gestion des espaces : les Agences de l'eau aux limites de la modernité », in *Ambiances et espaces sonores*, *Espaces et sociétés*, n°115, pp. 179-196.

Narcy J.B. (2004), *Pour une gestion spatiale de l'eau. Comment sortir du tuyau ?*, Bruxelles, P.I.E – Peter Lang, Ecoplis n°4, 342 p.

Narcy J.B., Mermet L. (2003), « Nouvelles justifications pour une gestion spatiale de l'eau », in *Natures, Sciences, Sociétés*, Paris : Ed. Elsevier, vol. 11, n°2, pp. 135-145. (avril-juin)

Nicolazo J.L. (1997), *Les agences de bassin*, Paris : P. Johanet, 223 p.

OCDE (2004), Analyse de la réforme de la PAC. Coordinateur : Catherine Moreddu.

Office International de l'Eau, (2004), Débat national sur la politique de l'eau. Synthèse de l'enquête papier et internet. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, avril 2004, 28 p.

Petit D. (2002), « De l'espace protégé au territoire du développement, du réglementaire au contractuel. Expériences d'une réserve naturelle en Pyrénées-Orientales », in *Les arrière-pays aveyronnais et lozérien. L'innovation dans les IAA Européennes*, *Revue de l'Economie Méridionale*, 4 - vol. 50, n° 200, pp. 385-406.

Petit D., Riviere-Honegger A. (2004), « Le difficile retour du "collectif" dans la gestion de l'eau : regards sur 15 années d'efforts en Camargue gardoise », *Cybergéo*.

Petit D., Riviere-Honegger A. (2005), « L'eau : élément de solidarité spatiales et vecteur d'une construction territoriale ? Une question d'actualité en Camargue gardoise », in *Les territoires de l'eau*, *Revue Développement Durable et Territoires*, dossier n°6, 13 p.

Picon B. (1978), *L'espace et le temps en Camargue, essai d'écologie sociale,* Le Paradou, Ed. Actes sud, coll. Espace-temps, 264 p.

Plan de gestion de la rareté de l'eau, (2005), Communication au Conseil des Ministres.

Poupeau F.M. (2004), *Le service public à la française face aux pouvoirs locaux. Les métamorphoses de l'Etat jacobin*, Paris : CNRS Editions, 336 p.

Pradeau C. (1999), « Réseaux hydrographiques et organisation de l'espace », in *L'Information Géographique*, Paris : SEDES, n°1, vol.63, pp. 3-9.

Puech D., Boisson J.M., (1995), "Eau-ressource et eau-milieu. Une interdépendance croissante impliquant une évolution des modalités de gestion", in Eau-ressource et eau-milieu vers une gestion durable, Les cahiers de l'Economie Méridionale, coll. Rapports d'étude, n°1, pp. 5-47.

Putas I. (1997), Le nouveau contentieux de l'eau**,** *Les Petites Affiches*, 6 juin 1997, n° 68, p. 4.

Qualité de l'eau et de l'assainissement en France, (2003), Rapport à L'Assemblée nationale et au Sénat, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, AN n° 705, 19-03-2003. Miquel G (réd).

Raffestin C. (1980), *Pour une géographie du pouvoir*, Paris : Litec, coll. Géographie économique et sociale, 249 p.

Raffestin C. (1986), « Ecogenèse territoriale et territorialité », in *Espaces, jeux et enjeux*, Auriac F., Brunet R., Paris : Fayard, pp. 175-185.

Redaud J., Noilhan J., Gillet M., Huc M. & Begni G. (2002), « Changement climatique et impact sur le régime des eaux en France », Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES).

Réquillart V., Gavaland A. et Record S., (2003), « Le boisement des terres agricoles peut-il constituer une voie de diversification des revenus des agriculteurs », INRA-ESR, Cahier de recherche 2003-07.

Reynoard E. (2001), « Aménagement du territoire et gestion de l'eau dans les stations touristiques alpine. Le cas de Crans-Montana-Aminona (Valais, Suisse) », in *Revue de Géographie Alpine*, n°3, tome 89, pp. 7-19.

Rieu T. (1999), « L'eau agricole en France : Etat des lieux et perspectives », *Bulletin du Conseil Général du GREF* 53, 63-84.

Rieu T. et Platon J. (1994), « Prévision de la demande en eau pour l'irrigation », *in* Journées nationales d'étude AFEID-CFGB "Petits barrages", Bordeaux 2-3 février 1993, Cemagref-Editions 1994, 71-82.

Roy A. (2005), « La perception sociale des risques naturels », *Les données de l'environnement IFEN* 99.

Ruf T. (2000), "Irrigation gravitaire et patrimoine commun, une approche des règles et usages dans les Pyrénées-Orientales", in *L'irrigation gravitaire*, Les journées techniques Agriculture Environnement, Chambres d'Agricultures PACA, Avignon, 14-15 septembre, pp. 185-198.

Sécheresse : gérer les risques, (1997), Dossier Spécial Mai 1997, Institut de l'Elevage, Pflimlin A., (coord).

Sironneau J., (1994), L'impact de la nouvelle loi sur l'eau sur l'agriculture et l'industrie, *Les Petites Affiches*, 18 novembre 1994, n° 138, p. 4 et s.

Sironneau J. (1998), Prélèvements d'eau en période de pénurie : les pouvoirs contestés du préfet, *Droit de l'environnement*, 1998, n° 60, p. 17

Solagro (2004), "Quel avenir pour la maïs irrigué ?" Contribution de Solagro au débat public sur le projet de réservoir de Charlas.

Sourie J.C., Millet G., Guindé L. et Wepierre A. (2004), « La révision à mi-parcours de la PAC (juin 2003) et les exploitations céréalières des régions intermédiaires », *INRA Sciences Sociales* 4-5/03(février).

Tardieu H. (1999), « Agriculture irriguée, gestion de l'eau et développement territorial », in *La gestion multi-usage de l'eau*, Académie d'Agriculture, 13 p. (disponible en ligne)

Teyssier F. (2005), « Faut-il irriguer en grandes cultures ? Irrigation et agriculture durable en Midi-Pyrénées », DRAF Midi-Pyrénées.

Thomas A. (2000), « Rendements agricoles, fertilisation et pratiques culturales. Etude sur les données de l'enquête "Pratiques culturales 1994 » du SCEES, Ministère de l'Agriculture, rapport interne INRA-LEERNA.

Viard J. (1994), *La société d'archipel ou les territoires du village global*, Paris : La Tour d'Aigues, Editions de l'Aube, coll. Monde en cours, 118 p.

Vieillard-coffre S. (2001), « Gestion de l'eau et bassin versant », in *Géopolitique de l'eau, Hérodote*, Paris : La Découverte, n°102, pp. 139-156.

Vinet F. (2000), "L'agriculture française face aux risques climatiques", *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 11.

Wateau F. (2001), « Objet et Ordre Social. D'une canne de roseau à mesurer l'eau aux principes de fonctionnement d'une société rurale », *Terrain,* 37, Paris : pp. 153-161.

Wateau F. (2002a), *Partager l'eau, irrigation et conflits au nord-ouest du Portugal*, Paris : CNRS Editions, éditions de la maison des sciences de l'homme, 277 p.

Wateau F. (2002b), *La pierre de partage de l'eau* (co-réalisation d'Ana Margarida Campos), film ethnographique, 10', éditions du Laboratoire d'ethnologie et de sociologie comparative de Nanterre et du Musée national d'Ethnologie de Lisbonne, Lisboa.

Wateau F. (2004), *Les Conques d'Arbo*, film ethnographique, 6'20, cellule audio-visuelle, CETSAH – CNRS.

Annexe. **Les principes de l'analyse économique des usages de l'eau**

A.1. Conflits d'usage et partage optimal de la ressource

La question des conflits d'usage et de l'irrigation a fait l'objet d'une très abondante littérature en économie (ce problème était déjà le thème d'un article célèbre de l'*American Economic Review* en 1916…). Tentons d'en résumer les principaux apports et attendus pour une analyse économique des sécheresses.

Pour la clarté du propos, il importe de distinguer en premier lieu ce qu'on appellera l'approche *décontextualisée* de la gestion collective de la ressource en eau d'une approche *contextualisée*. Par approche "décontextualisée", on entend le problème de l'allocation de la ressource à un ensemble d'usagers aux intérêts éventuellement contradictoires selon un objectif de satisfaction *au mieux* des besoins exprimés par ces usagers du point de vue de leur collectivité.

Optimum social

Les approches "décontextualisées" reposent sur la mobilisation du concept *d'optimum de Pareto* (1909). Une allocation de la ressource à ses différents usages sera dite *optimale au sens de Pareto* s'il est impossible d'améliorer la satisfaction des besoins d'au moins un usager sans détériorer la satisfaction des besoins d'aucun autre usager. Ce concept renvoie donc à des solutions gagnant-gagnant, ou plutôt gagnant-non perdant, du problème de partage de la ressource entre les usagers. Une autre manière de définir un optimum de Pareto serait de le décrire comme un partage qui ne "gaspille" pas la ressource, c'est-à-dire qui ne laisse pas de côté une partie de la ressource sans bénéfice pour aucun utilisateur potentiel. Une telle situation est appelée *efficace* en économie, ou parfois *Pareto efficiente*.

Pour un économiste, une société devrait se fixer pour objectif de réaliser, dans toute la mesure du possible, des modalités d'allocation efficaces de toutes ses ressources à l'ensemble de ses membres. Notons que ce concept est totalement distinct de la question de l'équité, ou du juste partage, de la ressource entre les usagers. Une situation où l'un, le "riche", dispose de quasiment toute la ressource disponible, tandis que l'autre, le "pauvre", en est pratiquement dépourvu, est un optimum de Pareto, puisqu'il serait impossible d'améliorer la satisfaction des besoins du pauvre en lui donnant un peu, sans détériorer la satisfaction du riche, en lui prenant ce peu.

Si ces approches sont le plus souvent dénuées de portée pratique, elles jouent un rôle très important dans l'analyse économique en tant que points de repère, décrivant l'ensemble des situations idéales que pourrait espérer atteindre une société, étant donnée la multiplicité de ses besoins et de ses possibilités de les satisfaire.

Acteurs et stratégies : l'importance du contexte

L'économie appliquée est bien davantage concernée par les approches "contextualisées". Ces approches reposent sur la définition d'acteurs économiques, qui peuvent être des usagers ou leurs représentants, acteurs disposant de stratégies dans un jeu dont l'enjeu est le partage de la ressource et les objectifs stratégiques la satisfaction au mieux des intérêts des acteurs ou de ceux de leurs mandants. Par "contexte" l'économiste entend donc ici une description de ces acteurs, de leurs stratégies possibles, des gains et des pertes associées à différentes modalités d'interactions stratégiques entre eux et d'un ensemble de "règles du jeu", règles qui régulent leurs possibilités d'action ou les modalités possibles du partage.

La mise en présence de joueurs autour d'une table de jeu ne prédéfinit généralement pas les règles du jeu auquel ils vont vouloir se consacrer. En d'autres termes, ces règles doivent être définies en amont de la confrontation stratégique. Elles peuvent être définies par les joueurs eux-mêmes avant le commencement du jeu, la littérature parle alors de *precommitment play* pour désigner cette phase

préliminaire, ou encore au travers d'un *métajeu*, si les joueurs doivent au préalable jouer entre eux pour déterminer à quel jeu ils vont jouer. Le plus souvent toutefois, les règles du jeu sont imposées au joueurs par une forme ou une autre d'autorité "supérieure", ou "d'arbitre" si l'on veut, introduisant dans le jeu économique de partage une dimension spécifiquement politique, institutionnelle et juridique.

Les contraintes sur le type de règles du jeu qui peuvent être effectivement arbitrées et les manipulations stratégiques diverses auxquelles les acteurs vont se livrer pour améliorer leur situation dans le partage final vont assez naturellement se traduire par une allocation de la ressource aux acteurs diversement éloignée de l'optimum de Pareto idéal (mais pas nécessairement). L'issue de la confrontation stratégique va être fortement dépendante du contexte, interdisant l'édiction de règles "générales" de partage, renforçant ainsi l'importance de disposer de points de repère "non contextuels", au sens défini plus haut, pour juger des performances du mécanisme institutionnel de partage de la ressource mis en œuvre par les acteurs. Ces points de repère sont aussi particulièrement importants pour la puissance publique dans deux situations d'intérêt : soit lorsque les acteurs, incapables de se mettre d'accord entre eux, s'en remettent à son autorité pour arbitrer leurs conflits d'usage, soit lorsque l'autorité publique souhaite modifier les règles du jeu dans le sens d'un partage plus efficace ou plus équitable de la ressource.

Gestion socialement optimale de l'eau

Examinons à présent ce que seraient des règles socialement optimales de gestion de la ressource en eau. Le discours précédent, centré sur les usagers, a tendance à faire oublier que la ressource en eau n'est accessible à ces mêmes usagers qu'au travers de mécanismes physiques et biologiques complexes, et de surcroît par le biais d'interfaces techniques de mise à disposition coûteuses (barrages réservoirs, canaux, installations de pompage, réseaux de distribution, stations de potabilisation et d'assainissement des effluents), infrastructures adaptées aux spécificités des différents usages de la ressource. Enfin, l'homme n'est pas l'unique usager de la ressource, et les milieux naturels dans leur ensemble requièrent pour leur bon fonctionnement une disponibilité en eau, en quantité et en qualité, suffisante.

Par conséquent, le partage de la ressource entre les usagers résulte de la confrontation entre une "offre", largement déterminée par le milieu naturel et l'infrastructure technologique à la disposition de la société, et des "demandes", volumes requis pour la satisfaction des besoins des usagers.

La demande agricole en eau

Intéressons-nous d'abord aux "demandes", de loin les plus simples à analyser et à décrire. L'expression de ces demandes varie selon la nature des usagers. Pour un exploitant agricole par exemple, sa demande va dépendre de la rentabilité du facteur eau dans son activité. Cette rentabilité s'apprécie généralement sur la base du différentiel entre le gain en recette (gains en rendements, amélioration de la qualité du produit, prix élevés de certaines cultures reposant sur l'irrigation par rapport à d'autres) permis par l'utilisation de l'eau, au-delà de la pluviométrie naturelle, et son coût.

Cette mesure de rentabilité peut être définie de manière différente selon le contexte de décision considéré. Une appréciation sommaire de cette rentabilité est fournie par le gain en marge brute permis par une utilisation accrue du facteur. Cette mesure est suffisante en contexte de décision de court terme, typiquement au cours d'une campagne culturale, l'assolement et l'équipement ayant été définis au préalable.

Dans un contexte de pilotage pluri-annuel de l'exploitation à équipement donné, l'eau sera appliquée à plusieurs cultures et le calcul doit porter sur l'ensemble des spéculations entreprises par l'exploitant sur la période de temps considérée, compte tenu des contraintes de rotation, du parcellaire, de la pédo-climatologie de l'exploitation et des différentiels de marge entre cultures. La notion de rentabilité à la marge de l'eau peut également être définie dans ce contexte, mais elle requiert un raisonnement économique d'ensemble optimisant les choix culturaux vis-à-vis des caractéristiques de l'exploitation et de son environnement économique (prix des intrants et des produits, politiques publiques).

Si maintenant le raisonnement doit porter également sur l'équipement de l'exploitation (décision d'investissement en matière d'équipement de périmètre irrigué ou choix de techniques d'irrigation par exemple) ou sur ses choix de structure (achat ou vente de foncier, reprise de terrains en fermage, superficies équipées ou non pour la culture irriguée, spécialisation ou au contraire diversification de l'activité agricole), la rentabilité du facteur doit s'apprécier au regard d'une optimisation préalable de l'ensemble du projet économique de l'exploitation, choix de structure et d'investissement compris. Il en résulte que selon le critère décisionnel retenu, l'évaluation de la "rentabilité" de l'irrigation peut différer dans une large mesure. Notons que, contrairement à ce qu'on entend souvent, le problème ne se réduit pas à une mesure correcte des "coûts" de l'irrigation mais inclut également les recettes qu'elle procure, celles-ci pouvant varier de manière importante d'une exploitation à l'autre pour une même consommation d'eau selon les projets économiques des exploitants.

A une mesure de rentabilité à la marge, l'économie associe une "disposition maximale à payer", c'est-à-dire la somme monétaire qui annulerait complètement le gain en rentabilité d'une utilisation accrue du facteur "eau" si l'exploitant était obligé de payer cette somme pour pouvoir accéder à cette eau supplémentaire. Au-delà de cette somme, l'exploitant renoncerait à ce volume supplémentaire, faute de rentabilité, et en deçà, il subsisterait un gain en rentabilité et donc une possibilité de lui faire payer plus cher son accès à l'eau. La disposition maximale à payer est souvent appelée "prix implicite de l'eau", définissant pour un volume d'eau consommé le prix maximal que l'exploitant accepterait de payer pour accroître d'une unité sa consommation au-delà du volume déjà utilisé. La mise en correspondance de cette disposition à payer avec différents volumes consommés définit ce qu'on appelle la *fonction de demande* d'eau de l'exploitant agricole.

La "demande en eau" ne doit donc pas être confondue avec une quantité consommée, et moins encore avec un quelconque "besoin" agronomique ou autre à satisfaire, mais est par définition une *relation* entre un niveau de consommation et une disposition maximale à payer pour ce niveau de consommation, appréciée sur la base d'un raisonnement à la marge. Puisque nous avons déjà noté que la "rentabilité" de l'eau variait selon le contexte décisionnel considéré, la fonction de demande en eau est également différente selon le contexte. On distingue classiquement les demandes dites de "court terme", qui correspondent à des rentabilités calculées à partir des marges brutes, et les fonctions de demande de "long terme", qui incluent les retours sur investissement et plus généralement la rentabilité d'ensemble de l'eau pour l'exploitant.

Deux éléments importants pour notre propos vont influencer les demandes en eau des agriculteurs : leurs choix de cultures, et plus particulièrement leur degré de spécialisation dans des cultures irriguées, et le climat. Un degré de spécialisation plus important dans les cultures irriguées devrait se traduire par une demande en eau plus importante, mais ce raisonnement n'est valable qu'à court terme. En effet, une spécialisation en cultures irriguées résulte d'un raisonnement d'optimisation à moyen terme fondé sur un différentiel de rentabilité favorable à ces cultures, mais des baisses de prix pour ces spéculations peuvent entraîner une baisse de la demande en eau de long terme.

L'action du climat sur la demande en eau est plus complexe à prédire. En effet, il faut tenir compte non seulement de l'apport naturel en eau par la pluie mais aussi des températures et du rayonnement solaire, ainsi que de leur chronologie vis-à-vis de la phénologie de la culture. C'est la combinaison de ces différents facteurs qui détermine la manière dont la culture valorise les apports en eau d'irrigation et donc la demande en eau. Si la demande en eau tend généralement à s'accroître en année "sèche" par rapport à une année "humide", selon une logique naturelle de compensation des déficits hydriques par des apports en eau d'irrigation, la comparaison de différentes années sèches montre des profils contrastés d'effets sur la demande en eau à l'échelle de la campagne.

La demande industrielle en eau

La construction de la demande industrielle en eau relève d'une logique de rentabilisation du facteur analogue à celle de la demande agricole. L'analyse est rendue un peu plus complexe par les possibilités plus étendues de substitution partielle de l'usage du facteur "eau" par d'autres facteurs. La mobilisation de technologies dites "propres", comme le refroidissement d'installations en circuit fermé par exemple, peut être vue comme une substitution de l'utilisation de l'eau par du capital additionnel.

De manière générale, les aspects "qualité" de l'eau, tant en amont du *process* technique selon la qualité de la ressource requise, qu'en aval selon la sévérité des normes de rejets auxquels sont soumis les industriels, influent beaucoup sur le raisonnement de l'utilisation du facteur dans l'industrie, et cela de manière bien plus importante que dans l'activité agricole. La rentabilité du facteur doit donc s'apprécier selon une logique de coût dit "complet", c'est-à-dire tenant compte autant des coûts de traitement nécessaire avant utilisation qu'avant rejet dans le milieu naturel.

La demande des consommateurs d'eau potable

La détermination d'une fonction de demande pour l'usage eau potable par les consommateurs est un exercice un petit peu plus complexe. Ici la "rentabilité" du bien eau pour un consommateur suppose de définir au préalable un système de préférences pour l'ensemble des biens consommables par lui. Un système de préférences est une relation d'ordre dans un espace de quantités de biens consommés, relation qui établit un classement partiel entre des vecteurs de quantités consommées des différents biens disponibles. L'économie parle de "paniers" de biens pour désigner de tels vecteurs. A une relation de préférence sur les paniers de biens, il est possible d'associer une fonction, dite fonction "d'utilité", de l'espace des paniers dans l'espace des nombres réels, fonction telle que l'ordre de classement des paniers par le système de préférences est respecté dans le sous-ensemble des réels, image de l'espace des paniers par la fonction d'utilité, au sens de la relation d'ordre naturel dans les réels.

En clair, tout se passe comme si le consommateur assignait une "note" à chaque panier de consommation possible, et qu'il donne des notes d'autant plus élevées à ces paniers qu'il préfère les consommer. Cette note est appelée "niveau de bien-être" associé au panier. Notons, et c'est important, qu'il existe *a priori* une infinité de fonctions d'utilité possibles qui préservent l'ordre des classements des paniers dans le système de préférences. Notons aussi que ces niveaux de bien-être sont également différents pour un même panier d'un consommateur à l'autre. On parle alors de niveau de bien-être "subjectif" pour exprimer l'idée qu'il est impossible de comparer de manière objective le bien-être de deux individus différents. Leurs manières de classer les paniers, ou leurs "échelles de valeur" si l'on veut, sont différentes, et leurs préférences psychologiques sont également différentes. Puisqu'il est par construction impossible de distinguer à partir d'un niveau de bien-être donné quelle part revient au système de préférences psychologique et quelle part revient à l'échelle des valeurs ("l'intensité" relative des préférences pour tel ou tel panier), il est donc impossible de comparer les niveaux de bien-être individuels.

Ceci n'est pas sans conséquence pour une mesure de la "valeur" de l'eau pour un consommateur, cette "valeur" étant nécessairement "subjective" et donc incomparable d'une personne à l'autre. Pour contourner cette difficulté, les économistes utilisent le concept de *surplus* qui est un équivalent monétaire (donc comparable d'un consommateur à l'autre) d'un niveau de bien-être.

L'intuition en est la suivante. Supposons que le revenu du consommateur soit accru d'une certaine somme, disons 100 €. Ce supplément de pouvoir d'achat va être réparti par le consommateur sur ses diverses dépenses, lui permettant ainsi d'accroître ses achats des différents biens, dont l'eau. S'il consacre 3 de ces 100 € à l'achat d'un m^3 d'eau, cette somme d'argent mesure sa disposition maximale à payer pour disposer de ce m^3 d'eau supplémentaire. Cette disposition à payer dépend de sa consommation d'eau avant gain de pouvoir d'achat, mais aussi de l'ensemble des éléments de son niveau de vie. L'exercice peut être répété pour différents niveaux de consommation d'eau et reconstituer ainsi une courbe de demande reliant dispositions maximales à payer et niveaux de consommation d'eau. Par construction, le consommateur a intérêt à accroître sa consommation jusqu'au point où sa disposition maximale à payer pour une unité supplémentaire est juste égale au prix de vente de cette unité. Pour des volumes inférieurs au volume total consommé, la disposition maximale à payer sera supérieure au prix de l'eau.

Il apparaît donc que pour de tels volumes, la dépense supportée par le consommateur, c'est-à-dire le produit du prix par le volume, est toujours inférieur à la somme totale que le consommateur aurait été prêt à payer pour en disposer. La différence entre ces deux grandeurs est appelée *surplus* du consommateur, c'est le montant monétaire qu'aurait pu payer éventuellement le consommateur et qu'il

ne paie en fait pas pour disposer du volume effectivement consommé. Le surplus est donc l'analogue d'une "rentabilité" pour le producteur et il mesure un équivalent monétaire du gain en bien-être apporté par la consommation d'eau au consommateur. S'agissant de montants monétaires, il est maintenant possible de les additionner pour différents consommateurs et de construire par sommation un surplus social des consommateurs rapporté au volume total consommé.

Le surplus marginal, c'est-à-dire la variation marginale de surplus lorsque le volume consommé augmente, mesure ce que l'économie appelle la valeur marginale sociale nette de l'eau potable pour une collectivité de consommateurs. Cette valeur est dite "nette" parce que par construction, les coûts d'accès à l'eau potable (pompage, traitement, distribution, assainissement après utilisation) ont été pris en compte dans le calcul. Notons que pour un agriculteur irriguant ou un industriel, la rentabilité marginale du facteur défalque également les coûts d'utilisation de la ressource. Il est donc possible de les comparer à une même aune, bien qu'en principe il soit difficile de considérer l'eau potable distribuée au robinet comme le même bien que l'eau brute en rivière, ressource que l'agriculteur va devoir pomper et distribuer aux cultures à ses propres frais.

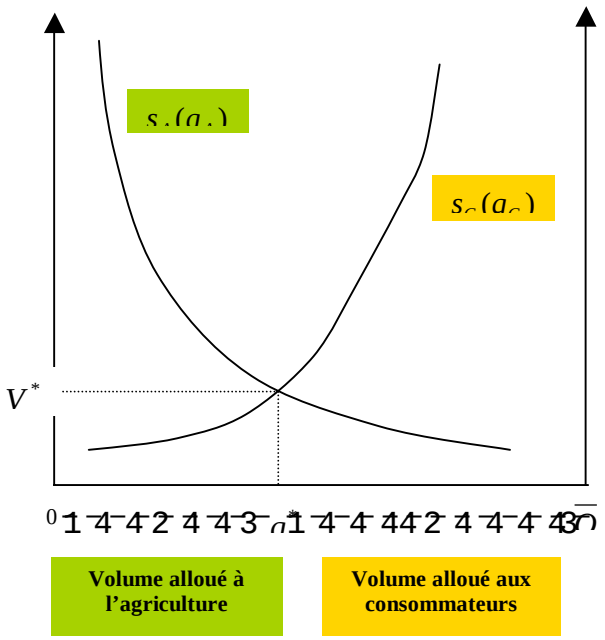
Les surplus marginaux nets sont généralement décroissants avec les volumes consommés, conséquence d'une part de l'effet de saturation progressif des besoins des consommateurs et, d'autre part, de l'augmentation du coût marginal de distribution. Il est en généralement aussi de même pour les exploitants agricoles ou les industriels en vertu des rendements marginaux décroissants des facteurs.

Partage optimal de la ressource

Il est alors possible de construire ce que serait un partage optimal de la ressource à différentes catégories d'usagers. Supposons, pour simplifier, l'existence de deux catégories d'usagers seulement : des consommateurs d'eau potable et des agriculteurs irrigants. On analysera plus loin le problème de "l'offre" du milieu, faisons pour le moment l'hypothèse que ces deux catégories d'usagers doivent simplement se partager un volume d'eau donné $\overline{Q}$.

Le graphique suivant illustre la logique économique du partage. On note q_A et q_C respectivement les volumes consommables par les agriculteurs et par les consommateurs, c'est-à-dire tels que : $q_A + q_C \leq \overline{Q}$. On note également $s_A(q_A)$ et $s_C(q_C)$ les surplus marginaux nets correspondants, fonctions décroissantes des volumes requis par les usagers selon nos remarques précédentes.

Figure A.1. Partage de la ressource entre deux usages



Tant que le surplus marginal net dans un usage pour un volume q est supérieur au surplus marginal net dans l'usage concurrent pour le volume $\overline{Q} - q$, il convient de transférer de la ressource de ce dernier usage (qui valorise "moins bien" la ressource) vers le premier (qui la valorise "mieux"). Ce mouvement de transfert s'arrête au point où les surplus marginaux nets sont égalisés. A ce point est associé le partage socialement optimal de la ressource disponible $\overline{Q}$ entre les deux catégories d'usagers. Ce point définit également un niveau commun de surplus marginal net pour les deux usages, niveau noté V^*, qui est la *valeur* du volume disponible $\overline{Q}$.

Ce résultat appelle plusieurs remarques importantes.

1. On ne saurait parler de "valeur" de l'eau dans un usage que dans le seul cas où cet usage serait l'unique emploi possible de la ressource. Dans tous les autres cas, évaluer la ressource suppose de mettre en concurrence ces utilisations possibles.
2. Si l'autorité publique en charge de la répartition de la ressource décidait d'utiliser un instrument tarifaire, le tarif qui réaliserait le partage optimal serait égal aux surplus marginaux nets des coûts d'accès à la ressource des différentes catégories d'usagers.
3. Le partage ainsi réalisé est un optimum de Pareto. Il alloue entièrement la disponibilité aux usagers et il maximise les bénéfices que la collectivité retire de la ressource. En effet, aucun usager ne souhaiterait céder ou acquérir volontairement un volume supplémentaire de ressource dans un tel partage. Ce qu'il devrait donner monétairement pour avoir davantage que ce partage se traduirait par une perte supérieure au surplus marginal qu'il en retirerait, et, réciproquement, ce qu'il pourrait obtenir en cédant une partie de ses droits serait inférieur à la perte de surplus qu'il subirait.
4. La notion de "valeur" n'a pas de sens dans l'absolu, la "valeur" d'une ressource est un concept nécessairement relatif, dépendant des usagers et de l'intensité relative, et non point absolue, de leurs besoins. Il en résulte que cette valeur peut être modifiée par l'ensemble de l'environnement économique des utilisateurs (niveaux des prix et des revenus), la disponibilité de la ressource (sous l'effet du climat en particulier) comme les déterminants des usages (préférences du consommateur, techniques de production mobilisées par les agriculteurs).

L'intérêt du concept de "valeur" est de permettre de résumer simplement le jeu combiné d'une multitude de facteurs très variés. C'est aussi une de ses grandes difficultés pour le raisonnement : étant sensible à toutes sortes d'éléments, elle ne saurait constituer un point de référence, ou de départ, stable pour un raisonnement économique, mais uniquement un point d'arrivée, point conditionnel à une situation d'optimalité du partage de la ressource.

Toutefois, le constat d'un écart significatif entre les surplus marginaux nets de la ressource dans différents usages est un signal clair de l'inefficacité du partage de la ressource. C'est un argument clé des économistes de l'eau aux Etats-Unis dans leur remise en question de l'attribution, excessivement généreuse à leur goût, des droits d'eau aux agriculteurs dans les Etats du sud-ouest des Etats-Unis.

A.2. Contraintes d'accès et coûts d'opportunité

On vient de montrer qu'une définition de la "valeur" de la ressource supposait de prendre en compte l'ensemble de ses usages concurrents. Nous allons voir à présent que les caractéristiques de "l'offre" de ressource par le milieu influent également sur le niveau de cette valeur.

Le problème de l'évaluation de la ressource va considérablement se complexifier vis-à-vis de l'analyse simple de partage exposée plus haut pour au moins cinq raisons principales :

1. Concurrence entre besoins en eau des acteurs sociaux et besoins en eau des milieux naturels (contraintes dites "environnementales" ou de "bon état écologique") ;

2. Spatialisation de l'accès : influence de l'amont sur l'aval, zones "riches" en eau contre zones "pauvres" en eau, interconnexions naturelles et artificielles entre réseaux de surface, nappes phréatiques et nappes profondes ;
3. Dimension temporelle de l'exploitation des ressources dans une optique de "développement durable" qui va opposer des échelles temporelles différentes du cycle de l'eau ;
4. Interdépendances entre volumes circulant ou stockés dans des nappes et contamination des eaux au travers de phénomènes physico-chimiques et biologiques, parfois très complexes, de dilution, transport, accumulation et biodégradation des polluants ;
5. Aspects largement aléatoires des fluctuations des disponibilités tant pour les réseaux superficiels que pour les réserves de surface (lacs, barrages réservoirs) ou souterraines, ce qui amène à considérer sérieusement la dimension risquée de la gestion publique de la ressource et qui nous concerne au premier chef dans cette expertise "sécheresse".

Un examen systématique de toutes ces questions supposerait la rédaction d'un traité. On se contentera de quelques aperçus synthétiques concernant leurs attendus économiques. Une notion centrale en économie va désormais intervenir dans le raisonnement de l'allocation de la ressource : le *coût marginal d'opportunité* ou *rente de rareté.*

Il a fallu une bonne cinquantaine d'années à l'analyse économique pour parvenir à clarifier cette notion, simple dans son expression, mais d'un maniement subtil dans le raisonnement. Il est donc utile de l'introduire à partir d'un exemple très stylisé.

Considérons une rivière dont l'état écologique suppose de maintenir un débit au moins égal à $\bar{q}$ à tout moment. Supposons qu'un usager (une agglomération, un agriculteur) prélève un débit q dans ce cours d'eau. A ce prélèvement est associé un surplus marginal, net des coûts marginaux d'accès, traitement, etc., surplus marginal noté $s(q)$. En tant que fonction du prélèvement, le surplus marginal décroît avec le volume consommé et l'on suppose qu'il s'annule pour un volume q^*. Ce volume limite correspond à une situation de "point mort" où une augmentation de consommation susciterait un gain en recette agricole, ou en bien-être, exactement compensé par le coût additionnel qu'il entraînerait. Prélever un volume supérieur à q^* n'aurait donc aucun intérêt économique pour l'usager.

On peut alors être dans l'une des deux situations d'intérêt suivantes. Soit $q^* < \bar{q}$, et dans ce cas la contrainte sur le débit "écologique" ne joue pas. La valeur de la ressource pour l'usager, égale par définition à son surplus marginal net, sera donc nulle au niveau de consommation optimal q^*, ou, exprimé autrement, l'eau n'aura aucune valeur "en soi". Ceci ne veut bien sûr pas dire que l'eau "n'a pas de prix" pour l'usager, en particulier il conviendrait de faire supporter le coût marginal de distribution de l'eau au robinet à un consommateur d'eau potable. Mais la limite de débit n'étant pas atteinte, la ressource peut être considérée comme "abondante", au sens où sa limite de disponibilité ne crée aucune contrainte sur le choix du consommateur.

Dans le cas contraire, $q^* > \bar{q}$, la ressource est limitante et donc "rare" vis-à-vis des besoins des usagers. L'usager sera contraint de ne consommer qu'un volume $\bar{q}$ auquel est associé par construction un surplus marginal net $s(\bar{q}) > 0$, strictement positif. Ce niveau de surplus marginal net correspond à la somme monétaire que l'usager serait au maximum prêt à payer pour voir le niveau de contrainte de débit de prélèvement légèrement relâchée et bénéficier ainsi d'un accès plus important à la ressource. Cette disposition maximale à payer est appelée *coût d'opportunité* de la contrainte écologique, et s'identifie à la *rente de rareté d'accès* au flux d'eau en rivière.

L'expression coût "d'opportunité" signale la présence d'un arbitrage économique entre options sous-jacente au calcul. Il exprime le fait que si l'usager devait payer un droit d'accès à un volume supérieur à la contrainte, droit dont le montant serait égal au coût d'opportunité, il serait indifférent entre exercer ce droit à ce montant ou ne pas l'exercer et subir la contrainte.

Prise en compte de l'espace

Ce concept est particulièrement intéressant dès qu'on s'intéresse à la gestion spatialisée ou intertemporelle de la ressource. Donnons en un exemple simple pour fixer les idées.

Supposons une population de préleveurs répartis le long d'un tronçon de cours d'eau, population indicée par $i = \{1,.., I\}$. Pour un débit moyenné en continu à q_i, le préleveur en retire un surplus net des coûts, différent selon sa nature, surplus noté $S_i(q_i)$. Il existe un certain niveau de prélèvement, niveau noté q_i^*, qui annule le surplus marginal, c'est-à-dire une solution de :

$$\frac{dS_i(q_i)}{dq_i} \equiv s_i(q_i)\Big|_{q_i^*} = 0$$

On supposera que le surplus marginal est une fonction décroissante du prélèvement. Donc aucun préleveur ne souhaiterait prélever un débit supérieur à q_i^*, faute de rentabilité.

On suppose que l'autorité publique, pour des raisons de conservation environnementale ou autre, impose qu'en moyenne le débit circulant dans la rivière doive être maintenu au dessus d'un certain seuil $\bar{q}$ sur la totalité du tronçon de cours d'eau. Du fait du transfert de la ressource de l'amont vers l'aval et en supposant l'absence d'apport extérieur supplémentaire à l'eau provenant de l'amont du tronçon, il en résulte que pour satisfaire la contrainte en tout point, il faut et il suffit de la satisfaire à l'aval.

On fait l'hypothèse que chaque préleveur souhaite maximiser son surplus. Sommant sur l'ensemble des préleveurs, un plan de répartition des prélèvements entre les usagers, collectivement optimal, est une solution du problème suivant :

$$Max \sum_{i=1}^{I} S_i(q_i)$$
$$q_0 - \sum_{i=1}^{I} q_i \geq \bar{q}$$
$$0 \leq q_i \leq q_i^*$$

où q_0 désigne le débit moyen en amont du tronçon. Négligeant les contraintes de positivité sur les prélèvements, le Lagrangien de ce problème s'écrit simplement :

$$L = \sum_{i=1}^{I} S_i(q_i) + \lambda(q_0 - \sum_{i=1}^{I} q_i - \bar{q}) + \sum_{i=1}^{I} \gamma_i(q_i^* - q_i)$$

Le prélèvement optimal de chaque préleveur est une solution de :

$$s_i(q_i) = \lambda + \gamma_i$$

De plus $\gamma_i = 0$ si $q_i < q_i^*$ et $_i$! 0 si $q_i = q_i^*$ dans un situation où, rappelons-le, $s_i(q) = 0$. Puisque la fonction de surplus marginal est décroissante, soit la solution de $s_i(q) = !$ est inférieure à q_i^* et dans ce cas on peut définir le prélèvement optimal comme une fonction décroissante de $!$, fonction notée $q_i(!)$, soit ce n'est pas le cas et $q_i = q_i^*$ est la solution optimale et $_i = \#!$.

Il reste à déterminer la valeur optimale de $!$. Puisqu'une somme de fonctions décroissantes de $!$ est elle-même une fonction décroissante de $!$, sa valeur optimale est l'unique solution de :

$$\%_{i=1}^{I} \min[q_i^*, q_i(!)] \quad Q(!) = q_0 \quad \bar{q} \# \quad ! \quad !(\bar{q}; q_0)$$

Il apparaît que quelle que soit la localisation des préleveurs sur le tronçon, le coût d'opportunité $!$ associé à la contrainte de débit réservé est identique pour tous. Ce coût dépend non seulement de la

norme de débit mais aussi des apports en amont du tronçon. Le coût d'opportunité $!$ est d'autant plus faible que ces apports sont importants et/ou que la contrainte de débit est peu sévère. Intuitivement, le coût d'opportunité mesure bien un prix de la "rareté" de la ressource, étant d'autant plus faible que cette rareté est peu ressentie par les usagers.

Gestion intertemporelle de la ressource

La prise en compte du temps dans le calcul économique de l'allocation optimale de l'eau soulève de nombreuses difficultés que l'on n'étudiera pas ici. On en présente ci-dessous les principaux aspects pouvant intéresser notre propos.

Vis-à-vis de la typologie courante qui distingue ressources renouvelables et ressources non renouvelables, l'eau douce en tant que ressource naturelle présente un statut hybride de ressource ***semi-renouvelable***. Elle est en effet disponible dans la nature à la fois sous la forme de flux de surface constamment renouvelés par le cycle de l'eau et de stocks diversement renouvelables. Si la plupart des réservoirs de surface ou des nappes phréatiques se renouvellent à des rythmes plus ou moins rapides à l'échelle humaine, de nombreuses ressources souterraines ne se renouvellent que sur des temps géologiques et sont de fait des "mines" d'eau, stocks relevant de la catégorie des ressources non renouvelables. L'analyse de la gestion conjointe de ces différentes sources possibles d'approvisionnement est par surcroît singulièrement compliquée par les échanges et transferts aux interfaces entre sources.

Les principes économiques de gestion intertemporelle de l'eau sont alors les suivants. Nous avons vu précédemment qu'il était possible, conditionnellement à un partage socialement efficace de la ressource tenant compte des différentiels de capacités de rentabilisation de l'eau dans ses divers usages, de définir pour un volume partagé une valeur de l'eau, valeur correspondant aux points d'égalisation des surplus marginaux nets des différents usagers. Notons $V(Q)$ cette valeur à la marge pour un niveau de consommation collective Q.

Considérons le cas de prélèvements à partir du réseau de surface. Notons $\overline{X}_t$ le volume de ressource *socialement accessible* à la période *t*. On entend par là le volume maximal accessible aux usagers, déterminé conjointement par les caractéristiques physiques du milieu et du climat prévalant au cours de la période, les technologies d'accès disponibles et les contraintes réglementaires pouvant limiter les droits d'accès des usagers. A ce niveau fluctuant, on peut donc associer un surplus net actualisé correspondant : $e^{\#t}V(\overline{X}_t)\,!\,\overline{V}_t$.

L'actualisation a pour fonction de permettre la comparaison entre différents plans d'utilisation de la ressource, pouvant débuter ou finir en des temps différents, en rapportant la totalité des plans possibles à un plan de référence de durée infinie débutant à l'origine du temps présent. On note $!$ le *taux d'actualisation social*, supposé strictement positif et constant et exprimant le degré d'impatience, ou de *préférence pour le présent*, de la société en tout temps.

Le surplus marginal net associé à la disponibilité sociale de la ressource, $\overline{V}_t$, peut varier en tous sens selon les fluctuations des entrées de ressource dans le système, l'évolution des besoins et de la réglementation, ainsi que le jeu de la préférence pour le présent de la société. Cette valeur peut donc être momentanément nulle, exprimant le fait que la disponibilité de la ressource est suffisante pour couvrir toutes ses utilisations rentables dans la société, quel que soit le point du temps, présent ou futur, auquel on se place pour l'évaluer. Dans ce cas la ressource en eau n'a aucune valeur économique *per se*, et l'on parlera d'état *d'abondance* de la ressource. L'approche peut être raffinée en prenant explicitement en compte les coûts résultant d'un excès d'eau en surface (inondations), sans modifier la logique d'ensemble du raisonnement.

Une situation de *rareté* correspond à un niveau strictement positif du surplus net actualisé de la disponibilité sociale. Le montant correspondant du surplus mesure le coût d'opportunité d'un accès physiquement ou socialement limité à la ressource superficielle. Il est en d'autres termes la *rente différentielle de rareté* de la ressource renouvelable. Par "différentiel", on veut mettre l'accent sur le

fait que cette rente fluctue au cours du temps, établissant ainsi implicitement un système de préférences pour certaines périodes de disponibilité de la ressource vis-à-vis d'autres périodes de temps. C'est le cas si l'on veut comparer les besoins agricoles en eau des cultures d'été, en période d'étiage, par rapport à des périodes automnales ou printanières où l'eau aurait "moins de valeur".

Dans le cas d'une ressource non renouvelable souterraine assimilable à une "mine d'eau", consommer la ressource aujourd'hui signifie ne plus pouvoir en disposer plus tard. Une gestion collective optimale de cette ressource doit donc être "sans regret" comme disent les anglo-saxons, c'est-à-dire que la satisfaction des besoins du présent ne doit pas obérer le satisfaction des besoins futurs et que, réciproquement, la satisfaction des besoins futurs ne doit pas obérer ceux du présent, un point fréquemment oublié par ceux qui ont une lecture idéologique de la notion de développement durable. En d'autres termes, la ressource sera utilisée de manière collectivement optimale si la société est rendue indifférente entre consommer maintenant ou plus tard la ressource.

Notons $s_t(q_t)e^{!t}$ le surplus marginal net actualisé, dont l'expression peut différer éventuellement au cours du temps du fait de besoins variables d'une période à l'autre. Dire que la société doit être indifférente entre consommer aujourd'hui ou demain signifie que les niveaux de consommation doivent égaliser les surplus marginaux nets actualisés pour tout couple de dates t et $t!$, $t \quad t!$. En d'autres termes les consommations q_t et $q_{t!}$ doivent vérifier :

$$s_t(q_t)e^{\&t} = s_{t!}(q_{t!})e^{\&t!} = \% \ \# \ t,t! \quad t \quad t!$$

La valeur commune $!$ mesure le coût d'opportunité de l'utilisation de la ressource non renouvelable, ou la *rente de rareté* associée au stock non renouvelable. Cette valeur est généralement une fonction du montant total des réserves disponibles.

Dans le cas d'un système de flux et de réservoirs interconnectés, la logique de l'allocation intertemporelle de la ressource combine les éléments décrits précédemment. Pour le mettre en évidence, on va considérer l'exemple du système hydrographique très simplifié illustré sur le schéma suivant.

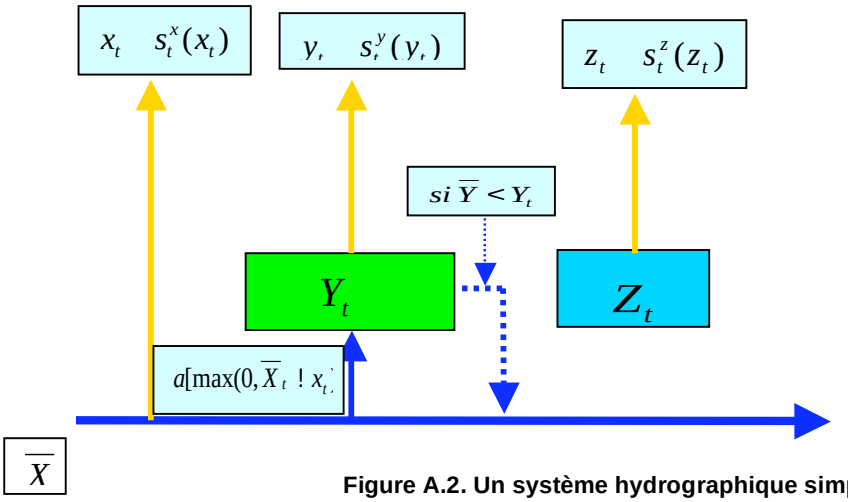


Figure A.2. Un système hydrographique simplifié

Le système est composé d'un flux de surface dont le débit de renouvellement est donné par $\overline{X}_t$, variable dans le temps ; d'un réservoir renouvelé *Y* et d'un réservoir souterrain non renouvelable *Z*, réservoir supposé isolé du précédent. Le réservoir renouvelé (lac, nappe phréatique) bénéficie d'un apport de surface égal à une fraction (*a<1)* de la partie non directement consommée des apports extérieurs en surface. Le réservoir renouvelable possède une capacité limitée donnée par $\overline{Y}$, et lorsque ce réservoir est rempli, l'excédent retourne en surface. Pour simplifier, on raisonne en échanges nets et les prélèvements directs de surface sont supposés être effectués avant transfert en nappe renouvelable,

de sorte que la fraction du flux de surface non directement prélevée et non transférée en nappe, augmentée de l'éventuel débordement du réservoir renouvelable, est supposée définitivement perdue et transférée à la mer.

La collectivité prélève simultanément dans les trois sources disponibles des montants (x_t, y_t, z_t) respectivement dans le flux de surface, le réservoir renouvelable et le réservoir non renouvelable. Elle en retire des surplus marginaux nets $(s^x(x_t), s^y(y_t), s^z(z_t))$ dépendants des prélèvements et conditionnels à la nature de la source, soit en raison de coûts d'exploitation différents, soit pour des motifs de qualité variable.

Les différentes catégories d'usagers : consommateurs d'eau potable, agriculteurs, industriels, répartissent leurs prélèvements sur les trois sources disponibles selon un objectif de minimisation de leurs coûts d'exploitation et d'accès à la ressource dont la qualité est la plus appropriée à la nature de l'usage qui en est fait. Il en résulte un partage entre les usagers des prélèvements à partir des sources possibles d'approvisionnement qui, une fois optimisé, détermine les surplus marginaux nets associés aux ressources accessibles. A ces surplus marginaux nets on peut alors associer des surplus nets totaux par intégration sur les espaces de volumes consommés. Une allocation intertemporelle optimale doit maximiser une somme actualisée en temps infini des différents surplus sous les contraintes de dynamique des disponibilités. Formellement ce problème pourrait s'écrire de la manière suivante (en temps continu).

$$Max \int_0^{\infty} e^{-\rho t}[S_t^x(x_t) + S_t^y(y_t) + S_t^z(z_t)]dt$$
$$\dot{Y}_t = a(\overline{X}_t - x_t) - y_t \quad si\ Y_t < \overline{Y}\ et = 0\ sinon$$
$$\dot{Z}_t = -z_t$$
$$0 \le x_t \le \overline{X}_t \quad , \quad (Y_0, Z_0)\ donnés$$

Le Lagrangien de ce problème (Hamiltonien augmenté des contraintes) s'écrit :

$$L_t = e^{-\delta t}[S_t^x(x_t) + S_t^y(y_t) + S_t^z(z_t)] + \mu_t[a(\overline{X}_t - x_t) - y_t] - \lambda_t z_t$$
$$+ \underline{\lambda}_t x_t + \overline{\lambda}_t(\overline{X}_t - x_t) + \phi_t Y_t + \overline{\phi}_t(\overline{Y} - Y_t)$$

où l'on a tenu du compte du fait que le stock disponible de ressource non renouvelable n'étant pas un argument du problème, la variable duale associée est nécessairement une constante, constante notée λ. Supposons d'autre part que la contrainte de positivité sur les prélèvements directs en rivière est toujours vérifiée. La maximisation du Lagrangien par rapport aux variables de contrôle conduit tout d'abord au système suivant :

$$\frac{\partial L_t}{\partial x_t} = 0 \qquad e^{-\delta t} s_t^x(x_t) = a\mu_t + \overline{\lambda}_t$$
$$\frac{\partial L_t}{\partial y_t} = 0 \qquad e^{-\delta t} s_t^y(y_t) = \mu_t$$
$$\frac{\partial L_t}{\partial z_t} = 0 \qquad e^{-\delta t} s_t^z(z_t) = \lambda$$

En vertu du principe du maximum de Pontryagine, ces conditions doivent être nécessairement vérifiées à tout instant le long d'une trajectoire optimale d'emploi des ressources. Elles constituent donc ce que les économistes appellent le système de conditions d'optimalité "statique". Elles décrivent pour un vecteur de variables duales (μ_t, λ), correspondant en fait aux coûts d'opportunité d'accès aux réservoirs renouvelable et non renouvelable, variables encore appelées *prix implicites* des réserves, le vecteur socialement optimal de prélèvement dans les différentes sources $(x(\mu_t, t), y(\mu_t, t), z(\lambda, t))$ à chaque instant.

On note que la règle d'optimalité dans le réservoir renouvelable est identique au cas simple d'exploitation de la nappe souterraine sans exploitation conjointe. Les prélèvements sur la nappe non renouvelable doivent égaliser à tout instant les surplus marginaux nets actualisés.

Les prélèvements en flux obéissent à une logique plus subtile. Si l'on est dans une situation où le prélèvement direct n'est pas suffisamment important pour épuiser les apports extérieurs de surface (cas : $x_t < \overline{X}_t$), alors nécessairement :

$$s_t^x(x_t) = a\, s_t^y(y_t)$$

Le surplus marginal net procuré par le prélèvement direct en flux est proportionnel au surplus marginal net du prélèvement en nappe renouvelable, le coefficient de proportionnalité étant donné par le taux de transfert en nappe du flux de surface. Puisque ce taux est inférieur à 1, le surplus marginal net des prélèvements en surface doit être inférieur ou égal au surplus marginal net des prélèvements en nappe renouvelable. L'existence de pertes par transfert implique qu'il faille donner, dans la mesure du possible, la priorité aux prélèvements directs vis-à-vis des prélèvements, en quelque sorte "différés", opérés à partir des nappes renouvelables. Accorder cette priorité aux prélèvements directs permet de minimiser les pertes par transfert et donc d'éviter de gaspiller la ressource. Bien entendu, ceci ne signifie pas qu'il faille prélever "davantage" de ressource en rivière plutôt qu'en nappe. Le surplus net tient compte des coûts d'accès à la ressource, coûts qui peuvent être plus importants pour des prélèvements en rivière qu'en nappe (en raison d'une qualité éventuellement plus médiocre de l'eau de surface ou de la localisation du point de demande). La prise en compte des différentiels de coûts peut donc entraîner des *volumes* prélevés (et non pas des *valeurs* des prélèvements) plus importants en nappe qu'en rivière.

Maximiser les surplus revient à minimiser les surplus marginaux nets. Donc si les débits d'entrée sont suffisamment élevés, les prélèvements en rivière et en nappe vont pouvoir être accrus jusqu'au point de saturation des demandes, c'est-à-dire d'annulation des surplus marginaux. Notons x_t^* et y_t^* ces niveaux de prélèvement annulant respectivement les surplus marginaux nets pour l'eau en rivière et en nappe. Rappelons que ce sont des fonctions du temps car l'on a supposé que l'intensité des besoins pouvait se modifier au cours du temps. Il résulte de la condition d'optimalité statique que si les contraintes sur les apports extérieurs au système ne sont pas liantes, les prélèvements en nappe et en rivière annuleront les surplus marginaux nets et donc que la variable duale optimisée μ_t^* sera nulle. Ceci signifie qu'en période "d'abondance" de la ressource, le coût d'opportunité des prélèvements en nappe renouvelable est nul et donc que l'épuisement possible de la nappe via les prélèvements n'induit aucune rente de rareté spécifique. L'eau, en nappe comme en rivière, n'a aucune "valeur" en soi au-delà des coûts d'approvisionnement. Rappelons encore une fois qu'il ne s'agit pas d'abondance "physique" mais d'abondance "économique", prenant en compte les coûts d'accès et l'intensité relative des besoins. Il peut donc se faire que le bilan des recharges et des prélèvements sur les nappes renouvelables soit positif, conduisant la nappe jusqu'à la pleine capacité et donc au retour au flux de surface de l'excès des transferts vis-à-vis des prélèvements. Cette ressource est définitivement perdue car elle est alors transférée à la mer, mais il n'y a pas là de "gaspillage" de ressource, celle-ci n'ayant aucune valeur économique *per se*.

Puisque le surplus marginal net des prélèvements sur la ressource non renouvelable est généralement positif du fait du caractère irréversible des prélèvements en nappe non renouvelable, il est optimal de ne pas l'exploiter, les prélèvements en surface et en nappe renouvelable pouvant couvrir la totalité des besoins solvables.

Considérons à présent les effets d'une sécheresse se traduisant par des apports insuffisants pour la couverture des besoins. Les prélèvements en surface seront contraints par le niveau $\overline{X}_t = x_t$ et le niveau de surplus marginal correspondant sera donné par $s_t^x(\overline{X}_t)$. La réalimentation de la nappe renouvelable étant momentanément interrompue, elle acquiert le statut d'une ressource non renouvelable et le prélèvement optimal sur cette nappe est simplement la solution de $s_t^y(y) = \mu_t e^{!t}$

tant que la nappe n'est pas vide. Puisque le surplus marginal net associé au prélèvement dans la nappe souterraine non renouvelable est égal à λ, l'ordre de priorité d'exploitation sera donné à la nappe renouvelable si et seulement si $\mu_t < \lambda$. Cet ordre de priorité est donc entièrement dépendant de la dynamique d'ensemble du système et, selon les cas, les prélèvements sur la nappe renouvelable seront suspendus au profit de prélèvements sur la nappe non renouvelable ou, au contraire, se substitueront aux prélèvements sur les ressources souterraines non renouvelables.

Pour poser un diagnostic d'ensemble sur les règles de gestion des ressources, il convient donc de s'intéresser à leur dynamique. Il nous faut à présent introduire deux types de conditions d'optimalité dynamique supplémentaires : des conditions relatives aux équations différentielles gouvernant la dynamique des variables adjointes ainsi que des conditions, dites de "transversalité", exprimant la valeur à très long terme des réserves. Ces conditions vont également faire apparaître le rôle des contraintes sur la vidange ou le remplissage des réserves renouvelables, se traduisant par l'apparition d'une nouvelle catégorie de coûts d'opportunité, ceux-ci non plus liés à l'importance des apports ou des réserves disponibles mais aux capacités naturelles ou artificielles de stockage de la ressource dans le milieu naturel. En d'autres termes, ces coûts d'opportunité vont mesurer la valeur des capacités de stockage existantes dans le système hydrographique et donc par là la valeur sociale d'un investissement dans des capacités artificielles supplémentaires de stockage (barrages réservoirs, lacs collinaires).

Les dynamiques des variables adjointes sont solution de :

$$\dot{\mu}_t = \lambda - \frac{\partial L_t}{\partial Y_t} \qquad \dot{\mu}_t = \rho_t \lambda - \rho_t \quad et \quad \rho_t Y_t = 0, \quad \rho_t(\overline{Y} - Y_t) = 0$$

$$\dot{\lambda}_t = \frac{\partial L_t}{\partial Z_t} \qquad \dot{\lambda}_t = 0 \quad \lambda_t = \lambda \quad cste$$

La deuxième relation n'exprime rien d'autre que la constance du coût d'opportunité en valeur actualisée le long d'un plan optimal d'exploitation des ressources souterraines non renouvelables.

La première relation exprime le fait que μ_t est nécessairement constant au cours de toute période de temps où le réservoir renouvelable n'est ni vide, ni à pleine capacité. Lorsque le réservoir est vide, son coût d'opportunité d'accès devrait décroître, et il devrait au contraire augmenter lorsque le réservoir est rempli à pleine capacité.

Les valeurs à long terme des réservoirs sont solutions des relations suivantes (dites conditions de "transversalité") :

$$\lim_{t \to \infty} \mu_t Y_t = 0 \quad et \quad \lim_{t \to \infty} \partial Z_t = 0$$

La première relation exprime le fait qu'à très long terme, soit le réservoir renouvelable est épuisé, soit son coût d'opportunité d'accès est nul, et la seconde que la nappe non renouvelable devrait être épuisée à très long terme.

Intéressons nous à présent aux principes généraux de la dynamique optimale du système. Puisque la variable duale associée au réservoir non renouvelable est toujours constante, d'une part, et que, d'autre part, la variable duale associée au réservoir renouvelable est constante sur des sous intervalles, sous intervalles séparés par des phases où elle progresse vers le haut en phase de débordement ou vers le bas en phase de vidange, la discussion peut être conduite à partir de la dynamique de la fonction $v_t^x \quad e^{-\delta t} s_t^x(\overline{X}_t) a^{-1}$ qui correspond au surplus marginal net actualisé associé au prélèvement de la totalité du flux socialement disponible défalqué du transfert. On appellera *valeur du flux* cette fonction. On notera qu'elle est nécessairement supérieure au coût d'opportunité d'un prélèvement dans les nappes renouvelables au cours d'une phase de rareté puisque $\overline{\lambda}_t$, égal le long d'un sentier optimal à $a(v_t^x - \mu_t)$, est positif au cours d'une telle phase.

On a déjà montré qu'au cours de phases d'abondance de la ressource, cette valeur était nulle. Si cette phase durait éternellement, on serait ramené au cas d'absence de restriction d'accès par les disponibilités du milieu. Supposons au contraire la présence de phases de rareté où $v_t^x > 0$. Le raisonnement exposé précédemment suggérait que la valeur des nappes renouvelables devrait être nulle au cours de phases d'abondance et positive au cours de phases de rareté. Mais si le système ne bute sur aucune contrainte de vidange ou de saturation de capacité, cette valeur doit être constante. Il en résulte que même au cours de phases d'abondance du flux, le prélèvement direct en surface ne doit pas être égal à x_t^*, le niveau qui annule la rentabilité des prélèvements, mais se situer à un niveau inférieur. L'économie de ressource ainsi réalisée va être transférée en nappe, contribuant ainsi à une recharge plus importante. Lorsque le système sera en situation de rareté, le produit de cette recharge sera mobilisé au travers de prélèvements sur la nappe renouvelable.

Pour fixer les idées, considérons un cas simple où une phase temporaire de rareté est encadrée par deux phases d'abondance. Supposons également que la valeur du flux en tant que fonction du temps augmente, passe par un pic avant de diminuer au cours de la phase de rareté où elle est strictement positive. A tout niveau de disponibilité en nappe renouvelable *Y*, on peut associer une valeur $\mu(Y)$ qui serait la valeur constante du coût d'opportunité relatif aux prélèvements en nappe renouvelable au cours d'une phase consistant à épuiser cette réserve au rythme y_t solution de $e^{!t} s_t^y(y_t) = \mu(Y)$ au cours d'un intervalle de temps $[t_0(Y), t_1(Y)]$ tel que $\mu(Y) = v_{t0}^x = v_{t1}^x$.

Si la société disposait de réserves égales à *Y*, réserves qu'elle devrait utiliser au cours de la phase de rareté, il serait optimal pour elle de concentrer cette utilisation autour du pic de rareté correspondant au maximum de la fonction v_t^x. Puisque, on l'a vu, v_t^x ! μ_t au cours d'une phase de rareté, la période d'exploitation des nappes renouvelables est comprise entre les dates correspondant aux points d'intersection de la fonction de valeur du flux v_t^x avec le plan $\mu(Y)$. A des niveaux de Y plus élevés correspondent des niveaux de surplus marginal net actualisé, et donc de coût d'opportunité, plus faibles. Il en résulte que la longueur de la phase de mobilisation des réserves renouvelables augmente lorsque *Y* augmente.

Notons que le début de la phase de mobilisation de l'eau en nappe renouvelable correspond à un instant où la valeur du flux est en phase ascendante. Il en résulte que $v_t^x < \mu(Y)$ pour $t < t_0$. Considérons à présent la phase initiale $[0,t_0]$. Au cours de cette phase, il ne saurait être optimal de consommer la totalité du flux puisque la condition $e^{\#!t} s_t^x(x_t) \quad \mu(Y)$ doit être vérifiée, ce qui serait impossible si $x_t = \overline{X}_t$. Il en résulte que la société devrait, tout au long de cette première phase, restreindre ses prélèvements directs sur le flux renouvelable en deçà du maximum socialement possible, en vue de recharger les nappes renouvelables pour affronter la phase suivante de rareté de la ressource. Notons $x_t^0(\mu(Y))$ le prélèvement direct solution de $e^{!t} s_t^x(x) = a\mu(Y)$ au cours de la première phase. La restriction des prélèvements sur le flux de surface permet d'accumuler un stock noté Y^1 défini par :

$$Y^1 = Y_0 + \int_0^{t_0(\mu(Y))} [a(\overline{X}_t \quad x_t^0(\mu(Y)) \quad y_t] dt$$

Un point fixe de cette relation définit un niveau de coût d'opportunité correspondant à $Y^1 = Y$. A ce point fixe, on peut donc associer le niveau optimal de réserves en nappes dont il faudrait disposer au début de la phase de vidange de la nappe renouvelable pour soutien de la consommation en période de pénurie, mais aussi les dates optimales de début et de fin de cette phase ainsi que le niveau optimal de coût d'opportunité correspondant.

Le niveau du coût d'opportunité *!* associé aux nappes non renouvelables ne saurait être inférieur au niveau optimal du coût d'opportunité des prélèvements dans les nappes renouvelables. Si tel n'était pas le cas, en effet, les efforts consentis pour constituer des réserves en nappes renouvelables par

restriction d'usage du flux de surface pourraient être avantageusement évités par des prélèvements accrus dans les réservoirs non renouvelables. Dans le cas très simple considéré, la politique optimale d'utilisation de l'eau souterraine non renouvelable serait de l'exploiter en permanence pour deux motifs différents. Au cours de la première phase de constitution de réserves, le prélèvement en nappe souterraine permet d'atténuer le coût social de la politique de restriction d'utilisation du flux de surface. Au cours de la phase de pénurie où les réservoirs renouvelables sont sollicités, l'utilisation de l'eau souterraine non renouvelable constitue un appoint appréciable.

La politique décrite précédemment est socialement optimale tant au regard des usagers que de l'allocation dans le temps de la ressource à condition qu'au cours de la phase de constitution de réserves dans les réservoirs renouvelables, on ne bute pas sur les capacités limitées de ces réservoirs. Si tel est le cas, il n'est plus possible de lisser le plan de valeur de l'eau en nappe renouvelable. Cette valeur devra faire un saut vers le haut à la date de saturation de la capacité de stockage. L'amplitude de ce saut est donnée par la valeur du multiplicateur de Lagrange $!$ à la date de saturation de la capacité. Ce multiplicateur mesure en fait la disposition sociale maximale à payer pour disposer de réservoirs additionnels. Par comparaison entre cette valeur et le coût de construction de nouvelles capacités de stockage, la société est à même de dimensionner de manière collectivement optimale sa politique de constitution de réserves en vue d'affronter des pénuries temporaires de ressource.

On vient de voir comment les outils de la théorie du contrôle optimal peuvent être utilement mobilisés pour concevoir des schémas de planification de l'accès aux ressources en eau pour de multiples usages. Du point de vue de l'analyse économique, l'accès optimal à l'eau des usagers peut être rationalisé au travers du concept de coût d'opportunité (on parle "d'analyse par la dualité" pour désigner cette approche). Ce concept peut s'appliquer aussi bien à des problèmes de gestion de la ressource dans l'espace qu'au cours du temps. On note que l'analyse par la dualité permet également de traiter conjointement des problèmes d'allocation de flux et d'allocation de stocks. La gestion des réservoirs naturels ou artificiels est ainsi ramenée aux principes usuels de gestion des actifs, ou biens capitaux, en économie, ce qui permet de raisonner la performance économique des investissements dans les infrastructures et les services d'eau.

L'approche déterministe esquissée ici pourrait être étendue à des environnements aléatoires, la principale différence étant que les coûts d'opportunité deviendraient alors des variables aléatoires, selon une méthodologie générale exposée dans Chow (2000) par exemple. Une alternative couramment mobilisée par les ingénieurs et la recherche opérationnelle est de s'appuyer sur les outils de la programmation dynamique stochastique. C'est à partir de tels outils que les producteurs d'hydroélectricité gèrent et planifient leurs équipements.

On peut donc difficilement prétendre que les difficultés vécues par les acteurs de l'eau lorsqu'il s'agit de construire et de mettre en œuvre des schémas de planification de l'accès à l'eau, même en situation de sécheresses aléatoires, soient un problème de moyens techniques ou de systèmes de calculs. Rappelons que l'électricité n'est pas stockable et que les fournisseurs d'énergie font face à des demandes aléatoires, au moins autant, sinon plus, volatiles que les demandes agricoles en eau d'irrigation.

Il semblerait plutôt que la difficulté réside dans l'accord sur les finalités collectives de la gestion de l'eau et sur les modalités d'une gouvernance nécessairement décentralisée à l'échelle de bassins versants de l'accès à la ressource. Une multitude d'acteurs aux compétences souvent enchevêtrées interviennent sur la gouvernance dans l'eau par des canaux divers : financiers, réglementaires, juridiques, politiques et institutionnels. L'opinion, mais aussi les acteurs publics, s'ils reconnaissent que le système fonctionne bien dans l'ensemble, ressentent son opacité et son manque de finalités et de domaines de responsabilités clairement établis.

Le législateur n'a pas ménagé ses efforts pour remédier à cette situation, pas loin de deux lois sur l'eau successives ayant été établies en moins de dix ans, tandis qu'une troisième loi, en attente depuis quatre ans maintenant, est censée fournir le cadre juridique approprié à la mise en application de la Directive Cadre européenne sur l'Eau en France. Ce projet de loi a suscité des débats nombreux, de multiples missions d'information parlementaire et la ratification du texte a pris beaucoup de retard par rapport

au calendrier initial. Ceci montre que les responsables politiques et les parlementaires ont conscience de l'importance des enjeux collectifs de la gestion de l'eau, mais aussi qu'ils éprouvent les plus grandes difficultés à dégager des priorités politiques claires pour l'organiser de manière durable dans le sens de l'intérêt général.

A cet égard, le surgissement d'épisodes rapprochés de sécheresse depuis le début des années 2000, en portant au premier rang des préoccupations la gestion quantitative de la ressource, ne peut que compliquer une réflexion politique nationale jusqu'alors surtout concernée par les questions de qualité de la ressource et d'organisation des services publics et privés de distribution d'eau potable.

1.3. Evolutions climatiques et économiques : enjeux et questions

Les chapitres 1.1. et 1.2. ont permis d'établir un état des lieux. Pour aborder le point central de l'élaboration des stratégies d'adaptation, il convient de se projeter dans le futur proche (de l'ordre des 10 à 20 ans à venir) en analysant les principaux déterminants qui vont encadrer les évolutions de l'agriculture à cette échéance, à savoir d'un côté le cadre du milieu physique par le biais du changement climatique, et de l'autre le cadre socio-économique qui fait intervenir à la fois le futur de la PAC et la tension accrue sur la ressource en eau.

1.3.1. Le changement climatique

Bernard Seguin (INRA, Avignon), Emmanuel Cloppet (Météo-France, Toulouse)

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1.1., les interrogations sur les variations en fréquence et en intensité de la sécheresse sont au cœur du débat. De façon générale, les questions sur la stabilité du climat, au-delà de sa variabilité que l'on pourrait qualifier de naturelle, ne datent pas d'aujourd'hui, et les progrès des sciences ont permis progressivement d'en reconstituer l'histoire marquée par des fluctuations de grande ampleur (Acot, 2003). Pour en rester à l'épisode le plus récent (l'holocène) qui a suivi la dernière grande glaciation, il s'est traduit par un retour à des conditions moins froides, en gros supérieures de 4 à 5°C en température moyenne globale, qui sont restées globalement stables (dans une fourchette de 1 à 2°C) depuis environ 12 000 ans. Et ceci malgré des fluctuations locales assez rapides (jusqu'à 10°C en une centaine d'années, découverte récente à partir d'analyses de sédiments) ou des variations plus globales correspondant, de manière schématique et pour l'Europe, aux périodes de l'optimum médiéval des Xe au XIIIe siècle ou du petit âge glaciaire allant du XIVe au XVIIIe, bien mises en évidence par les historiens à partir de l'analyse des séries historiques d'avancée des glaciers ou de dates de ban de vendange (Le Roy Ladurie, 1983). Dans les années 1970, le climat apparaissait globalement stable, à condition que l'on élimine les fluctuations inter-annuelles par la prise en compte d'une durée minimale de 30 années, suivant les normes fixées par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Et les projections futures pariaient sur un retour inéluctable à des conditions glaciaires… dans 10 ou 20 000 ans. C'est alors que sont apparues les interrogations sur l'accroissement de l'effet de serre par l'action de l'homme et ses conséquences sur un réchauffement du climat, du coup tout aussi inéluctable, avec des ordres de grandeur de la même ampleur (de l'ordre de 4 à 5°C), mais cette fois à l'échéance du siècle à venir.

1.3.1.1. Le contexte de l'effet de serre et de son renforcement anthropique

L'effet de serre est un phénomène naturel, qui résulte de la présence dans l'atmosphère de gaz absorbant le rayonnement infrarouge thermique émis par les surfaces terrestres, et sans lequel la température moyenne du globe s'établirait aux alentours de -18°C au lieu de +15°C. C'est l'observation, au début des années 70, d'une augmentation notable de la concentration de certains de ces gaz à effet de serre (GES), en lien évident avec l'activité anthropique, qui a conduit à envisager l'éventualité d'un changement climatique par le renforcement induit de cet effet de serre. Au premier rang de ces gaz figure le dioxyde de carbone CO_2, dont le niveau actuel avoisine les 370 ppm (parties par million), contre 260 à l'époque préindustrielle, et qui devrait atteindre de 450 à 1 000 ppm à la fin du siècle, suivant l'évolution des politiques énergétiques. Depuis la prise de conscience de cette influence de l'homme sur le climat global (qui n'est d'ailleurs qu'une des composantes de ce qu'on dénomme changement global), les prévisions des spécialistes du climat se sont progressivement à la fois affinées et affermies, au travers des rapports successifs du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat, GIEC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC en anglais).

Les interrogations sur l'influence possible des activités humaines sur le climat de la planète sont apparues dans les années 1970, en lien avec les observations sur l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone CO_2, dont le niveau actuel dépasse les 370 ppm, contre 260 à l'époque préindustrielle.

Le renforcement anthropique de l'effet de serre *(d'après Dupouey et al., 2005)*

On sait que l'effet de serre naturel est dû à la propriété de certains gaz de l'atmosphère (dont les molécules contiennent au moins trois atomes) d'absorber le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, et de le renvoyer vers cette surface, entraînant son réchauffement. La différence entre ce rayonnement émis par la surface (390 $W.m^{-2}$ en moyenne) et le rayonnement émis par la Terre vers l'espace (240 $W.m^{-2}$) représente le forçage radiatif (150 $W.m^{-2}$) lié à l'effet de serre naturel de l'atmosphère. Ce forçage est augmenté par l'accroissement des concentrations en gaz à effet de serre provoqué par les activités humaines, qui augmente l'opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge. On a pu ainsi calculer qu'un doublement de concentration du seul CO_2 par rapport à sa concentration préindustrielle entraînait un forçage additionnel de 4 $W.m^{-2}$ environ. Depuis 1750, la concentration atmosphérique de gaz carbonique (CO_2) s'est accrue d'un tiers. La concentration actuelle n'a jamais été dépassée depuis 420 000 ans, comme l'indique l'analyse de bulles d'air piégées dans les glaces polaires. Le taux d'augmentation de la concentration en CO_2 de l'atmosphère a atteint 0,4% par an durant les deux dernières décennies. Ce taux n'a jamais été aussi élevé depuis au moins 20 000 ans (IPCC, 2001). L'accroissement de 30% de la concentration en CO_2 pendant les cent dernières années résulte de la combustion de combustibles fossiles et des changements d'utilisation des terres, notamment la déforestation.

Outre le dioxyde de carbone, appelé communément gaz carbonique, d'autres gaz, présents naturellement à l'état de traces, comme le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_2O) s'accumulent dans l'atmosphère. Les sources de méthane sont à la fois naturelles (agriculture, rizières, zones humides, feux de biomasse) et industrielles (gaz naturel, charbon). Quant au protoxyde d'azote, s'il est émis en partie par l'industrie, ce sont les sols agricoles et les décharges qui sont responsables de la majorité des émissions en France.

Les capacités de réchauffement de l'atmosphère par ces gaz sont caractérisées par 2 indicateurs :
- le coefficient de forçage radiatif additionnel (en $W.m^{-2}$), qui traduit la relation entre l'énergie reçue et l'augmentation de température qu'elle engendre dans le système surface terrestre - troposphère, selon la définition spécifique qui en a été donnée par l'IPCC (Tegart et al., 1990 ; Houghton et al., 1992) ;
- le potentiel de réchauffement global (PRG), un indicateur qui intègre à la fois les propriétés de forçage radiatif des composés actifs et leur durée de vie dans l'atmosphère. Il a été défini comme le rapport entre le forçage radiatif intégré dans le temps consécutif à l'émission instantanée d'un kg de substance trace dans l'atmosphère et le forçage radiatif correspondant lié à l'émission d'une quantité équivalente du gaz de référence, à savoir le CO_2 (Tegart et al., 1990). Cet indicateur permet ainsi d'établir des équivalences entre les gaz impliqués dans l'effet de serre sur une période de temps choisie et de les convertir en équivalents CO_2.

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (Tableau 1) mélangés de façon homogène à la troposphère est maintenant admise comme la première cause du réchauffement (IPCC, 2001). Même si les travaux récents font intervenir un effet complémentaire de l'ozone et des aérosols ou du volcanisme et des modifications de l'énergie solaire absorbée par la surface terrestre par suite des modifications de l'occupation du sol dans la modélisation du climat, leur effet reste dominant. Au niveau global, leur part respective dans le renforcement anthropique de l'effet de serre reste proche des estimations de l'IPCC (2001) traduites dans la figure 1, à savoir environ 60% pour le dioxyde de carbone, 20% pour le méthane et 6% pour l'oxyde nitreux. Il faut noter qu'au niveau de la France, les estimations du CITEPA pour la même période faisaient apparaître des parts respectives assez différentes, car, si le premier reste largement majoritaire en s'approchant des 70%, c'est l'oxyde nitreux qui se trouve au deuxième rang avec presque 16% (essentiellement du fait des émissions en agriculture), le méthane n'intervenant que pour 12%.

Tableau 1. Concentration des principaux GES anthropiques mélangés de façon homogène à la troposphère et évaluation de leur contribution respective au forçage radiatif (d'après IPCC, 2001).

Gaz trace	CO_2	CH_4	N_2O	CFC-11	CFC-12	HCFC-22	CF_4
Concentration pré-industrielle*							
	280 ppmv	700 ppbv	275 ppbv	0	0	0	40 pptv
Concentration en 1998*							
	365 ppmv	1745 ppbv	314 ppbv	268 pptv	533 pptv	132 pptv	80 pptv
Augmentation annuelle*							
	1,5 ppmv/an 0,4%/an	7 ppbv/an 0,6%/an	0,8 ppbv/an 0,25%/an	-1,4 pptv/an 0%/an	4,4 pptv/an 1,4%/an	5 pptv/an 5%/an	1 pptv/an 2%/an
Durée de vie (années)							
	50 à 200	8,4 à 12	114 à 120	45	100	12	>50 000
Contribution au forçage radiatif							
($W.m^{-2}$)	1,46	0,48	0,15	0,07	0,17	0,03	0,003
(%)	60	20	6,2	2,9	7,0	1,2	0,1
Potentiel de réchauffement global							
	1	62	275	6300	10200	4800	3900

* ppmv : partie par million en volume (10^{-6}) ; ppbv : partie par milliard en volume (10^{-9}) ; pptv : partie par trillion en volume (10^{-12}).

La contribution au forçage radiatif est calculée depuis l'ère préindustrielle (1750) jusqu'à l'époque actuelle (fin des années 1990). Le potentiel de réchauffement global (PRG) est calculé pour un horizon de 20 ans en équivalents massiques CO_2. Par exemple, une tonne de CH_4 aura, à cet horizon, 62 fois le PRG d'une tonne de CO_2.

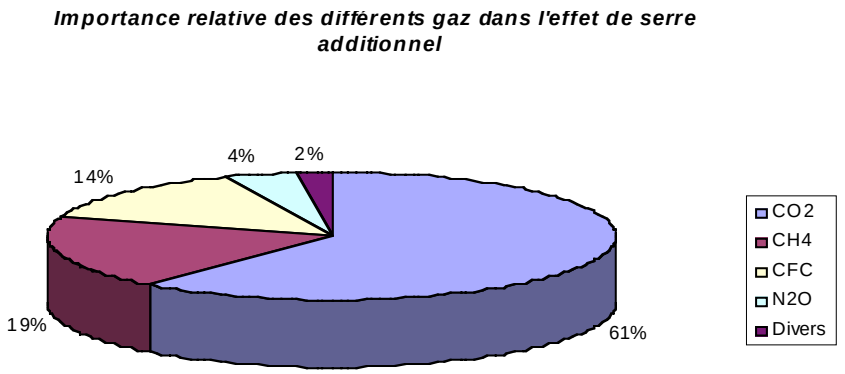


Figure 1. Contribution relative des différents GES dans l'effet de serre à l'échelle globale de 1850 à 2000 (d'après Joussaume, 1999)

> *Depuis 1750, la concentration atmosphérique de gaz carbonique (CO_2) s'est accrue d'un tiers. D'autres gaz, présents naturellement à l'état de traces, comme le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_2O), s'accumulent également dans l'atmosphère et contribuent donc au renforcement de l'effet de serre naturel. Pour la fin du siècle, les modèles prévoient des concentrations atmosphériques en CO_2 situées entre 540 et 970 ppm.*

1.3.1.2. Le changement climatique : les prédictions pour le futur

A la fin du siècle, les modèles prévoient des concentrations atmosphériques en CO_2 situées entre 540 et 970 ppm, à comparer avec une concentration avant la révolution industrielle de 280 ppm et avec une concentration actuelle d'environ 367 ppm. L'accroissement moyen de la température de surface est estimé devoir être de 1,5 à 6°C de 1990 à 2100. Cette augmentation serait sans précédent dans les

10 000 dernières années. Il est presque certain que toutes les surfaces continentales se réchaufferont plus rapidement que la moyenne, particulièrement celles situées à haute latitude en saison froide. Une élévation du niveau des mers de 0,14 à 0,80 m est prévue de 1990 à 2100, ce qui est deux à quatre fois le taux observé pendant le XXe siècle. En revanche, une perte majeure de glace de l'Antarctique et une élévation accélérée du niveau des mers sont maintenant jugées comme très peu probables au XXIe siècle.

Une comparaison des scénarios les plus récents d'évolution de la pluviométrie saisonnière dans 32 régions du monde faite par le groupe II de l'IPCC montre une tendance à l'augmentation pour l'Europe du Nord (0 à +3% par décennie) au printemps, à l'automne et en hiver. En revanche, pour la zone Europe du Sud et Afrique du Nord, les modèles prédisent une réduction de la pluviométrie estivale (de -0,2 à -6% par décennie), qui pourrait également intervenir en Europe du Nord (de -1,8 à +0,8% par décennie). Une tendance similaire à un assèchement estival se retrouve dans les simulations concernant d'autres régions de l'hémisphère Nord (Amérique du Nord, Chine, Méditerranée), même si cette tendance est loin de constituer une certitude.

Les conclusions de l'IPCC concernant les tendances observées et prévues pour différents événements climatiques extrêmes peuvent être classées selon leur niveau de probabilité. On retiendra parmi les conclusions très probables (à plus de 95%) : une augmentation des températures maximales et de la fréquence des jours chauds, une augmentation des températures minimales et une diminution de la fréquence des jours froids (ou encore des gelées). Les conclusions probables (probabilité supérieure à 2/3) concernent une diminution de l'amplitude thermique journalière, des précipitations plus fréquentes et plus intenses, des vagues de chaleur plus fréquentes et, inversement, des vagues de froid moins fréquentes, une augmentation des épisodes de fortes pluies hivernales et, enfin, une augmentation de la fréquence des sécheresses estivales dans les régions continentales situées à des latitudes intermédiaires. Enfin, la vitesse maximale du vent, ainsi que l'intensité des précipitations, devraient augmenter lors des cyclones tropicaux.

Au niveau de la France, les tendances principales peuvent être brièvement résumées dans le tableau 2 (d'après Planton, 2005), et illustrées par la figure 2.

Il résulte de ces sorties une tendance claire, d'une part à un réchauffement moyen, d'autre part, à une réduction de la pluviométrie, en particulier en été et dans la partie sud du territoire.

Tableau 2. Valeurs typiques de changements climatiques moyennés sur la France entre la période 2070-2099 et la période 1960-1989 (Simulations climatiques Météo-France et IPSL)

	Températures			Précipitations		
	Année	Hiver	Eté	Année	Hiver	Eté
Scénario B2	+2 à +2,5°	+1,5 à +2°	+2,5 à +3,5°	-5 à 0%	0 à +10%	-25 à -5%
Scénario A2	+3 à +3,5°	+2,5 à +3°	+4 à +5°	-10 à 0%	+5 à +20%	-35 à -20%

L'accroissement moyen de la température de surface est estimé devoir être de 1,5 à 6°C de 1990 à 2100. Il est presque certain que toutes les surfaces continentales se réchaufferont plus rapidement que la moyenne, particulièrement celles situées à haute latitude en saison froide. Les prédictions sur la pluviométrie sont un peu plus incertaines, compte tenu de la complexité du cycle de l'eau, mais elles font état en général d'une légère augmentation de la pluviométrie, avec une tendance à la diminution de la pluviométrie estivale dans les zones tempérées de moyenne latitude, qui serait plus marquée autour du pourtour méditerranéen. Par ailleurs, en dehors de ces variations de climat moyen, il est vraisemblable que le changement climatique s'accompagne d'un accroissement de la variabilité et des extrêmes.

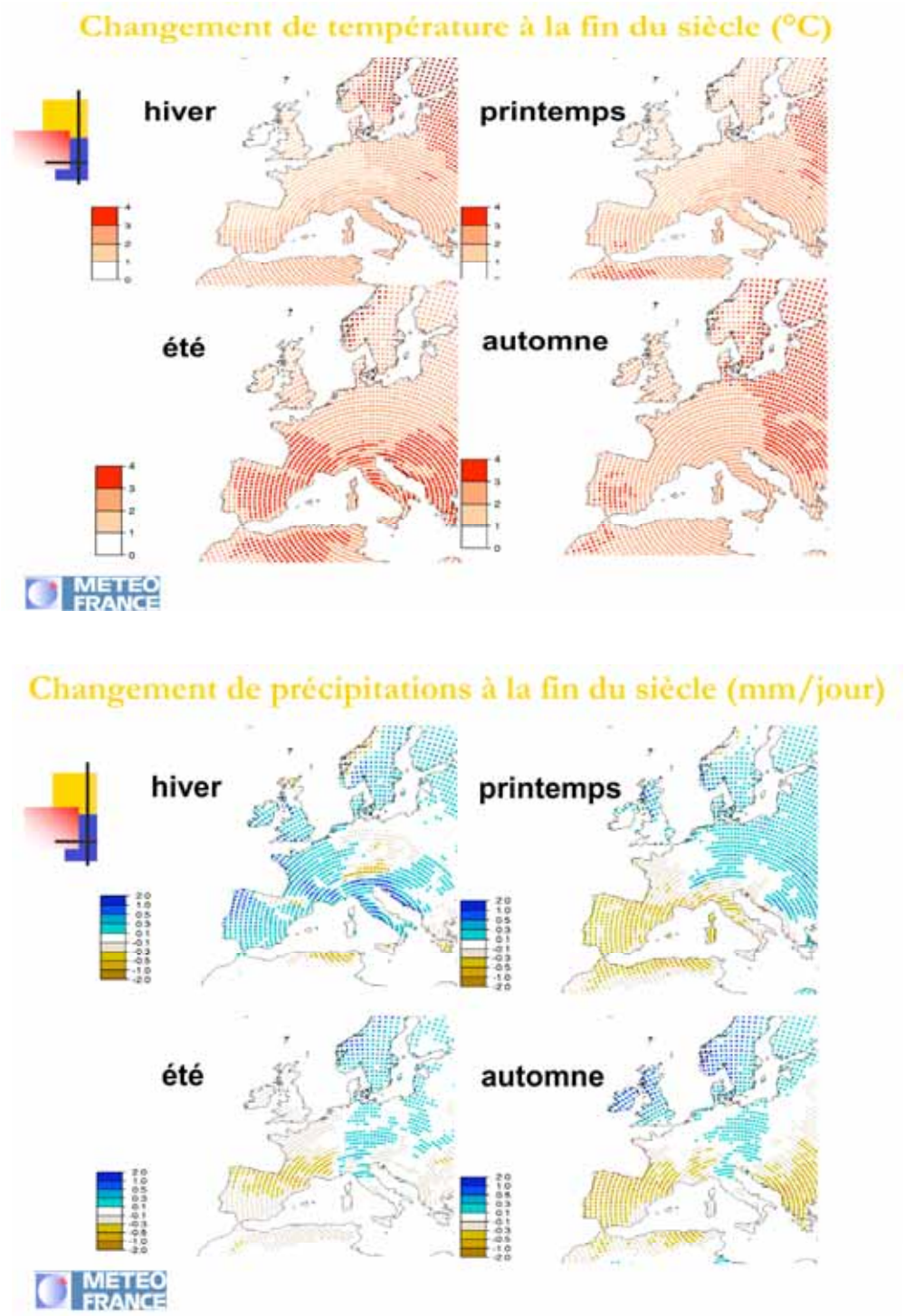


Figure 2. Sorties régionalisées des scénarios 2070 B2 du CNRM (Perarnaud et al., 2005)

1.3.1.3. Le changement climatique : les impacts sur la production végétale

La traduction de ces scénarios climatiques en termes d'impact sur l'agriculture a fait l'objet, pour la France, de travaux combinant expérimentation et modélisation des cultures (Delecolle et al., 1999 ; Soussana, 2001). Un bilan actualisé de ces travaux a été récemment établi (Seguin et al., 2005), et nous en présentons ci-après les grandes lignes.

Avant d'en venir à l'impact du réchauffement climatique proprement dit, il est nécessaire de prendre en compte un effet spécifique aux couverts végétaux qui concerne la stimulation de la photosynthèse par l'augmentation du gaz carbonique (ou dioxyde de carbone) atmosphérique CO_2. Avec l'hypothèse d'un doublement du CO_2 pour la fin de ce siècle, les travaux permettent de prévoir une stimulation de la photosynthèse de l'ordre de 20 à 30%, conduisant à une augmentation résultante de l'assimilation nette de l'ordre de 10 à 20% (en prenant en compte l'augmentation de la respiration liée à l'effet de l'augmentation de la température). Par ailleurs, il faut s'attendre à une amélioration de l'efficience de l'eau par suite de la diminution de la conductance stomatique.

Cet effet sur la photosynthèse sera combiné à l'effet propre du réchauffement climatique sur la température en premier lieu, mais également sur les autres facteurs, en particulier la pluie. Bien que la réponse physiologique des plantes à un enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique et à une augmentation concomitante de la température entraîne en théorie une production plus importante de biomasse, les effets sur le rendement des espèces cultivées, à l'échelle du peuplement, risquent d'être beaucoup plus contrastés. Cela est particulièrement vrai pour le sud, où l'optimum thermique pour la photosynthèse est souvent déjà atteint (par exemple pour le riz, dont la fertilité des épillets décroît fortement au-delà de 34°C, ou pour le maïs, dont la viabilité du pollen baisse au-delà de 36°C), sinon dépassé dans certaines conditions. Dans les conditions tempérées, l'augmentation de température peut favoriser la plupart des processus physiologiques, mais elle aura également un impact négatif sur les cultures telles que pratiquées actuellement en accélérant leur rythme de développement et donc en raccourcissant les cycles de culture et, par suite, la durée de fonctionnement de l'usine photosynthétique. Au bout du compte, le bilan résultant en la production de biomasse peut prendre des aspects variés, en fonction du type de couvert et des conditions climatiques associées aux conditions culturales pour les plantes cultivées (Figure 3).

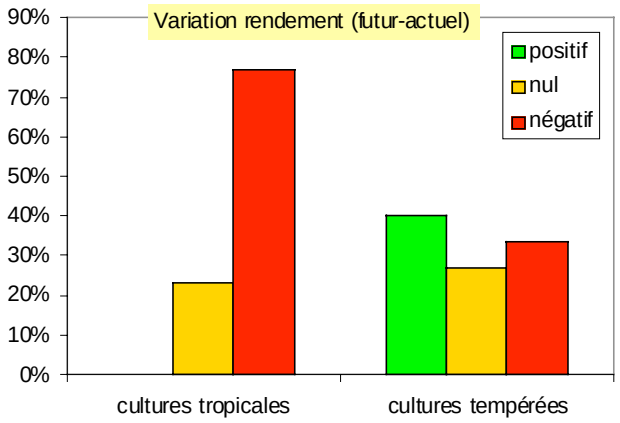


Figure 3. Effet du changement climatique sur le rendement des cultures, à partir de 43 études répertoriées dans le 3e rapport de l'IPCC (d'après Seguin et al., 2005)

Au niveau des **grandes cultures**, les résultats des simulations effectuées avec les modèles de culture sur le blé et le maïs permettent de conclure à des effets légèrement positifs sur le premier (avec des augmentations de rendement allant de 2,5% à 5,7%), et des effets plus variables sur le maïs (+10% à -16% dans le cas d'une culture irriguée dans le Sud-Est).

Au niveau des **prairies** (Soussana et al., 2002), la conjugaison de travaux expérimentaux (sous serre et en enrichissement naturel à l'extérieur) et de modélisation à partir d'un modèle d'écosystème prairial conduit à envisager, dans les conditions du Massif Central, une augmentation de la production de biomasse aérienne de l'ordre de 25% (dont 18% attribuables au seul doublement de CO_2). En termes de système d'élevage, la valorisation de cette augmentation de production devrait permettre une augmentation du chargement animal (en gros de 20%) ou une augmentation de la saison de pâturage de l'ordre de trois semaines, avec un accroissement de l'ingestion de 7 à 20% et de 2 à 20% pour la production de viande.

En ce qui concerne les **cultures pérennes** (arbres fruitiers et vigne), le facteur primordial devrait être l'avancée des stades phénologiques, d'autant plus marquée que l'on s'éloigne en cours de saison de la levée de dormance, qui risque elle d'être plus tardive à cause du manque de froid. Pour certaines espèces telles que l'abricotier, les hivers doux risquent même de créer des troubles physiologiques (chute de bourgeons, fruits avortés). Ensuite, l'action de la chaleur reprendra vite le dessus et l'avancée de la date de floraison peut conduire paradoxalement à augmenter le risque de gel, et à envisager des conditions climatiques moins favorables pour la fécondation et la pollinisation, en dépit du réchauffement des températures. Pour la vigne, la période de la maturation sera décalée d'après le 15 août à courant juillet, avec des conséquences certaines sur la qualité de la vendange, plus chargée en sucre (et donc en degré alcoolique) et moins chargée en acide.

Il faut relativiser la portée de ces prévisions en notant que la disponibilité de l'eau peut devenir un facteur limitant prédominant, susceptible de fortement handicaper les cultures en cas de sécheresse forte et récurrente comme le montre l'expérience des années récentes, en particulier bien sûr 2003. Par ailleurs, les éléments qui viennent d'être présentés s'appuient uniquement sur les valeurs moyennes des facteurs climatiques. L'éventualité d'événements extrêmes et, de façon plus large, la prise en compte de la variabilité de ces facteurs pourraient conduire à des impacts différents, par le dépassement de valeurs-seuils encore mal cernées. Enfin, il faudrait considérer l'impact sur les adventices (mauvaises herbes), les insectes et les maladies cryptogamiques, encore mal cerné à l'heure actuelle. Il a ainsi pu être constaté que, dans certains cas, le carpocapse des pommes est passé, dans le midi, de deux à trois cycles par an. A l'inverse, le phoma du tournesol a été sans doute limité ces dernières années dans le Sud-Ouest par les fortes températures, et pratiquement éradiqué pour le moment par la sécheresse de 2003. Au-delà des bouleversements des systèmes écologiques complexes que représentent les relations entre hôtes et parasites (il est possible que les décalages de cycles en réponse à l'augmentation de température soient significativement différents pour les deux composantes), il faut également prendre en compte la possibilité de mouvements géographiques qui amènent certaines maladies ou ravageurs, véhiculés par les moyens modernes de transport, à s'installer dans des régions où les conditions climatiques le leur permettront. Des recherches sont en cours pour établir, par exemple, le rôle du réchauffement sur l'apparition dans les serres du Sud d'une aleurode (*Bemisia tabacci*).

Au niveau des impacts, le changement climatique va modifier la donne en créant des conditions, souvent plus favorables, parfois plus défavorables suivant les productions. L'augmentation du CO_2 va potentiellement stimuler la photosynthèse des couverts végétaux et créer des conditions permettant d'augmenter la production de biomasse de l'ordre de 20%. A priori, les grandes cultures et les prairies devraient être plutôt favorisées, sauf dans le Sud où apparaît le risque de sécheresses accentuées, accompagnées de températures élevées. Pour les arbres fruitiers et la vigne, l'avancée généralisée de la phénologie peut poser des problèmes de risque de gel au moment de la floraison, et de qualité par avancée des stades sensibles. Une adaptation locale basée sur les composantes techniques (choix des variétés, pratiques culturales), qui a fait ses preuves dans le passé, paraît en mesure d'amplifier les effets positifs et de limiter les effets négatifs, sous réserve que l'eau soit disponible pour l'irrigation. Un déplacement géographique vers le nord est à anticiper, mais il n'est pas directement envisageable pour les productions liées au terroir, comme le sont les AOC.

Adaptations de l'agriculture

S'adapter sur place… Les perspectives présentées plus haut ont, pour le moment, surtout considéré les systèmes tels qu'ils sont pratiqués actuellement. Mais, en admettant implicitement leur stabilité géographique, une marge appréciable d'adaptation apparaît possible en mobilisant l'expertise agronomique au sens large pour les adapter aux conditions climatiques modifiées (recours au matériel génétique approprié, mise au point d'itinéraires techniques adaptés, ajustement de la fertilisation et de l'irrigation, etc.). De façon générale, on peut estimer que l'adaptation des grandes cultures pourrait s'effectuer sans trop de problèmes, dans la mesure où les années passées ont montré la capacité des agriculteurs à les faire évoluer rapidement en fonction, en particulier, des contraintes résultant de la

PAC. Il en est de même pour les prairies et l'élevage. Il faut cependant relativiser cette vision optimiste sur une capacité d'ajustement rapide (en quelques années), en soulignant une fois de plus les incertitudes actuelles sur la pluviométrie et le bilan hydrique. Pour les cultures pérennes, si le diagnostic sur l'adaptation des systèmes de culture reste identique dans ses grandes lignes, la capacité d'adaptation paraît moins forte. Elle nécessite de prendre en compte une durée plus longue, de l'ordre de dix à vingt années. D'ores et déjà, pour les arbres fruitiers, devant les évolutions phénologiques constatées, il faut se préoccuper maintenant du choix du matériel végétal adapté. Quant à la vigne, elle pose des problèmes spécifiques, à cause du lien au terroir, qui seront abordés dans le paragraphe suivant.

Ou se déplacer… Au-delà de ce premier niveau, il doit être envisagé un second niveau d'adaptation, passant par un déplacement géographique des zones de production ou de plantation. A l'heure actuelle, il n'apparaît pas encore de signe tangible de déplacement géographique des systèmes de production. Et pourtant, le réchauffement observé équivaut, sur le siècle, à un déplacement vers le Nord de l'ordre de 180 km ou en altitude de l'ordre de 150 m. Ce qui traduit la plasticité déjà évoquée, mais jusqu'où ou jusqu'à quand ? On peut donc légitimement envisager l'éventualité de la remontée (vers le Nord ou en altitude) de certaines cultures, ou l'introduction de nouvelles cultures au Sud.

Cependant, dans l'hypothèse de déplacements géographiques, la nature du lien avec le caractère local jouera un grand rôle : s'il apparaît possible, a priori, de cultiver du blé ou du maïs dans des régions différentes, cela n'irait pas de soi pour les productions plus typées (au premier rang desquelles figure évidemment la vigne) dont une grande partie de la valeur ajoutée provient de l'existence d'une zone d'appellation ou d'un terroir. Dans la mesure où la notion de terroir implique une étroite adéquation entre le milieu physique (sol et climat), les variétés (cépages pour la vigne) et les techniques culturales, elle implique évidemment un risque de fragilité particulière par rapport à une évolution du climat. Les AOC ne se délocalisent pas ! L'année 2003 a été plutôt rassurante sur ce point : même s'il est encore trop tôt pour en connaître le millésime, et si la conjonction de la sécheresse et de la canicule a eu des effets néfastes par certains aspects, la vigne a démontré une capacité certaine d'adaptation à ces conditions exceptionnelles.

1.3.1.4. Le changement climatique : les évolutions récentes à l'échelle globale

L'analyse de séries historiques provenant de milliers de stations réparties sur l'ensemble du globe a nécessité la mise en œuvre de procédures complexes d'homogénéisation (pour prendre en compte les problèmes causés par les évolutions techniques des stations et des capteurs, ainsi que des changements de site ou d'environnement de ces sites). C'est donc seulement depuis quelques années qu'il a été possible d'établir sans ambiguïté les éléments suivants (voir le dernier rapport de l'IPCC en 2001, repris par Salinger, 2005).

• Pour la température : un réchauffement de l'ordre de 0,6°C depuis 1860, la date la plus ancienne pour laquelle des données suffisantes existent à l'échelle du globe. Le réchauffement du XXe siècle est probablement le plus important de ceux constatés depuis les dernières mille années, et la dernière décennie est la plus chaude de toutes celles considérées : 9 des années les plus chaudes se situent entre 1995 et 2004 (la plus chaude étant 1998, avec 0,58°C au dessus de la moyenne 1961-90), avec la seule année 1996 remplacée par 1990 dans ce classement (Jones et Moberg, 2003 ; figure 4). Deux périodes de réchauffement apparaissent à partir de ces travaux: de 1910 à 1945, avec une augmentation de 0,14°C, puis 0,17°C pour 1976-1999.

Au niveau de la distribution spatiale, la première phase a vu un réchauffement plus marqué de l'hémisphère Nord, contrairement à la phase suivante. Par contre, depuis 1976, le réchauffement est le plus net aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, et sur les surfaces continentales, qui se réchauffent plus que les surfaces océaniques. Il faut également noter que les températures minimales augmentent deux fois plus vite que les maximales.

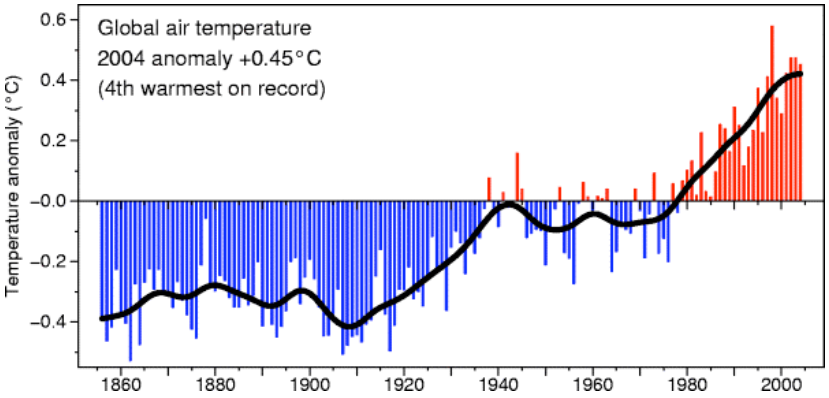


Figure 4. Evolution de la température de l'air depuis 1860
(site http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/).

• Pour les précipitations, la tendance est moins claire : les mêmes sources indiquent une tendance à la hausse de la pluviométrie annuelle à l'échelle globale, cependant très modérée (2%) et surtout très variable dans le temps et l'espace : elle peut atteindre 7 à 12% dans les latitudes élevées de l'hémisphère Nord, surtout à l'automne et en hiver pour les régions boréales. La pluie a diminué sur la plupart des terres intertropicales (-0,3% par décennie), quoiqu'il y ait une reprise durant les dernières années. Il est probable qu'une augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes s'est produite dans les latitudes moyennes et hautes de l'hémisphère Nord. Les épisodes chauds du phénomène *El Niño* ont été plus fréquents, plus durables et plus intenses depuis le milieu des années 1970. En Europe, les observations sont plus contrastées (EEA, 2004) : elles font état d'un accroissement pouvant aller de 10 à 40% sur le siècle passé pour les régions du nord, en particulier en hiver, et d'une baisse significative de la pluviométrie en zone méditerranéenne (jusqu'à 20%, dont 10% en période estivale, en grande partie sur les vingt dernières années ; Giannakopoulos et al., 2005).

• Au niveau des autres facteurs, il a surtout été détecté une baisse (de 4 à 6%) du rayonnement solaire global sur la période 1950-1990 (Roderick et Farquahr, 2002), mais cette tendance paraît s'inverser pour une augmentation sur les 15 dernières années (Wild et al., 2005).

Ces évolutions des facteurs climatiques s'accompagnent d'observations sur les évolutions de la cryosphère et des océans. La surface de la couverture neigeuse a diminué d'environ 10% depuis la fin des années 1960 et la période de glaciation des lacs et des rivières a été réduite de deux semaines dans l'hémisphère Nord durant le XXe siècle. Il y a eu un retrait général des glaciers de montagne dans les régions non polaires durant le XXe siècle. La superficie de la glace de mer a diminué de 10 à 15% dans l'hémisphère Nord depuis les années 1950. Une diminution de l'épaisseur de la glace de 40% en Arctique s'est probablement produite à la fin de l'été pendant les dernières décennies, ce déclin étant beaucoup plus prononcé en hiver. Les données sur les marées montrent que le niveau moyen des mers s'est élevé de 10 à 20 cm pendant le XXe siècle. Ce rythme de variation du niveau d'élévation des mers a été environ dix fois plus important que pendant les derniers 3 000 ans.

Pour le territoire français, ces grandes lignes se retrouvent, avec des nuances (Moisselin et al., 2002). Pour la température (Figure 5), on observe un réchauffement plus marqué en moyenne, de l'ordre de 0,9°C, en particulier dans le nord et l'ouest pour les minimales et le sud pour les maximales.

Pour les pluies, en reprenant le texte de Moisselin et al. (2002), les séries homogénéisées de précipitations dessinent une pluviométrie plutôt en hausse sur le XXe siècle et un changement de sa répartition saisonnière : moins de précipitations en été et davantage en hiver. Des contrastes nord-sud apparaissent : on trouve quelques cumuls annuels de précipitations en baisse sur le sud du territoire français. L'étude de l'indice de sécheresse de De Martonne montre des noyaux de sécheresse accrue sur les régions les plus méridionales. Au nord du territoire, au contraire, l'augmentation conjuguée des précipitations et des températures conduit à un climat plus humide, ce qui traduit une accélération du cycle de l'eau.

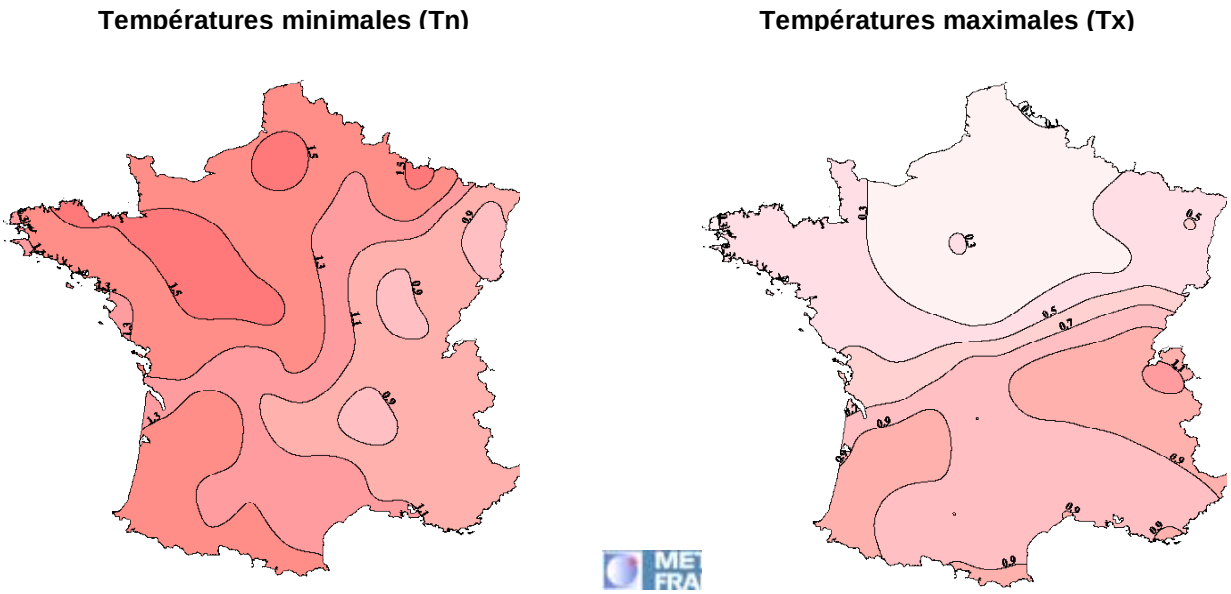


Figure 5. Augmentation des températures minimales et maximales en France au cours du XXe siècle (d'après Moisselin et al., 2002)

Au niveau de l'insolation apparaît une tendance nette à une diminution dans le nord (-11%) et une augmentation dans le sud (+7%) (Moisselin et al., 2003).

Quant aux événements extrêmes, si l'on a pu noter un peu partout dans le monde, et dans le cas de la France en particulier, des épisodes récents ayant eu des conséquences dramatiques (tempête de décembre 1999, plusieurs épisodes cévenols automnaux intenses, sécheresses fréquentes depuis 1976, avec la répétition de 2003, 2004 et 2005), il est encore difficile pour les climatologues de conclure à une tendance significative. Et ceci, malgré l'impact de plus en plus marqué, en particulier pour les compagnies d'assurance, dû pour partie à une amplification par les évolutions des modes d'occupation des sols et des modes de vie en général.

La température moyenne de surface a augmenté de 0,6°C (avec une incertitude en plus ou en moins de 0,2°C) depuis 1860. Le XXe siècle a probablement été le siècle le plus chaud depuis 1 000 ans et la décennie 1990 a connu le réchauffement le plus important de ce siècle. Ces données purement climatiques sont corroborées par des observations sur des indicateurs qui en dérivent directement : diminution de la surface de couverture neigeuse et des glaciers de montagne ou de la glace de mer, élévation du niveau de la mer, etc.

1.3.1.5. Les impacts observés sur les écosystèmes terrestres

Comme le climat, et en partie à cause de lui, les écosystèmes terrestres, qu'ils soient naturels ou cultivés, conjuguent une variabilité à différentes échelles temporelles et une évolution à long terme qui traduit un déplacement de l'état d'équilibre qui permet de le considérer comme stationnaire sur une période donnée. L'attribution d'un changement écologique à ce réchauffement climatique récent n'est pas une question scientifique facile, d'une part parce que de nombreux facteurs autres que le climat agissent sur les réponses de différents systèmes ou secteurs (en premier lieu les facteurs anthropiques allant de l'économie à l'utilisation de la surface ou la modification du type d'occupation, en passant par les pollutions diverses dans l'atmosphère, les eaux et les sols), d'autre part parce que les impacts éventuels ne se répercutent pas forcément en réponse immédiate au forçage climatique, et qu'un temps de latence de durée variable caractérise l'inertie de différents systèmes. Il est donc logique que ces impacts soient seulement réellement identifiés depuis peu, avec quelques années de recul par rapport à la mise en évidence effective du réchauffement qui date seulement de la fin des années 90. Il faut aussi

que des chercheurs de diverses disciplines soient stimulés afin de se mobiliser pour analyser une tendance éventuelle à travers leurs propres données, ce qui se fait progressivement actuellement.

Au niveau global, les effets observés peuvent être résumés ainsi :

- pour la cryosphère, une fonte accélérée qui se traduit par un recul généralisé des glaciers, une augmentation du ruissellement et des débits dans les zones glaciaires ou nivales, ainsi que des avalanches de glaces et de rochers, le déplacement des mammifères dans l'Arctique et de la faune de l'Antarctique, la fonte du permafrost dans les hautes latitudes, le déplacement vers le haut de stations de ski, etc. ;

- pour l'hydrologie et les ressources en eau, l'accroissement des sécheresses en zone aride et semi-aride, les inondations et les glissements de terrain pendant la saison chaude en zones montagneuses ;

- pour les eaux douces, fleuves et rivières se réchauffent, avec des conséquences bien établies sur la stratification thermique et la composition chimique, l'abondance et la productivité des espèces, la composition des communautés, la phénologie, la distribution et la migration des espèces végétales et animales ;

- pour les systèmes biologiques terrestres, des réponses bien établies dans l'hémisphère Nord avec une avancée généralisée de la phénologie au printemps, et une saison de végétation plus longue. La population de certaines espèces a diminué ou même disparu, et des mouvements vers le nord ou des altitudes plus élevées ont été observés ;

- pour l'agriculture et la forêt, une avancée similaire de la phénologie en Europe et en Amérique du nord, avec une saison de végétation sans gel allongée (en partie sans doute à l'origine de l'augmentation de la productivité forestière, de l'ordre de 30 à 40%, maintenant confirmée par des observations satellitaires). En dehors de l'observation d'une avancée systématique des dates de floraison des arbres fruitiers, l'illustration la plus nette se situe en viticulture, particulièrement sensible à ce réchauffement : l'ensemble des régions viticoles de ces mêmes zones montre une avancée des stades phénologiques, qui se répercute sur les dates de vendange, ainsi qu'une augmentation de la teneur en sucre et du degré alcoolique qui conduit, pour les vingt dernières années, à des vins généralement de haute qualité. Pour la forêt, on a observé également une avancée des dates de débourrement de l'ordre de 5 à 8 jours sur l'Eurasie, une migration vers le nord de la limite forêt-toundra et une augmentation des feux de forêt au Canada, ainsi qu'une extension de certains insectes aux Etats-Unis.

Au niveau européen, le récent état des lieux effectué par l'Agence européenne de l'environnement (EEA, 2004) retient les tendances constatées sur une sélection d'indicateurs qui recoupe les systèmes et secteurs considérés par le GIEC : retrait des glaciers pour 8 sur 9 des régions concernées (avec un recul d'ensemble évalué à 1/3 de la surface et ½ de la masse entre 1850 et 1980, et 20 à 30% de perte supplémentaire depuis cette période, dont 10% pour le seul été 2003) ; diminution de la période de couverture neigeuse (entre 45 et 75°N, de 8,8 jours par décennie entre 1971 et 1994) ; augmentation de la saison de végétation de 10 jours entre 1962 et 1995 et de la productivité de la végétation de 12%, migration vers le nord et vers le haut de plantes (diversité enrichie de l'Europe du Nord-Ouest et en montagne pour 21 de 30 sommets alpins) ; accroissement du taux de survie de populations d'oiseaux hivernant en Europe, etc.

Au niveau français, si les agriculteurs (et les éleveurs) font état d'une modification des calendriers culturaux qui pourrait être liée à cette particularité climatique, d'ailleurs confirmée par des analyses récentes sur les dispositifs expérimentaux de l'INRA (pratiquement un mois d'avance depuis 1970 sur les dates de semis du maïs pour quatre sites couvrant l'ensemble du territoire, voir figure 6), il n'a pas encore été possible de l'apprécier de manière objective, pas plus que d'évaluer son poids éventuel dans l'évolution récente des rendements. Par contre, l'analyse des données phénologiques (dates d'apparition des stades de développement) sur les arbres fruitiers et la vigne, cultures *a priori* beaucoup moins dépendantes sur ce point des décisions culturales, a permis de mettre en évidence des avancements significatifs de stades tels que la floraison des arbres fruitiers (une dizaine de jours en trente ans sur des pommiers dans le Sud-Est ; Seguin et al., 2004) ou la date de vendange pour la vigne (presque un mois dans la même région au cours des cinquante dernières années ; Ganichot, 2002).

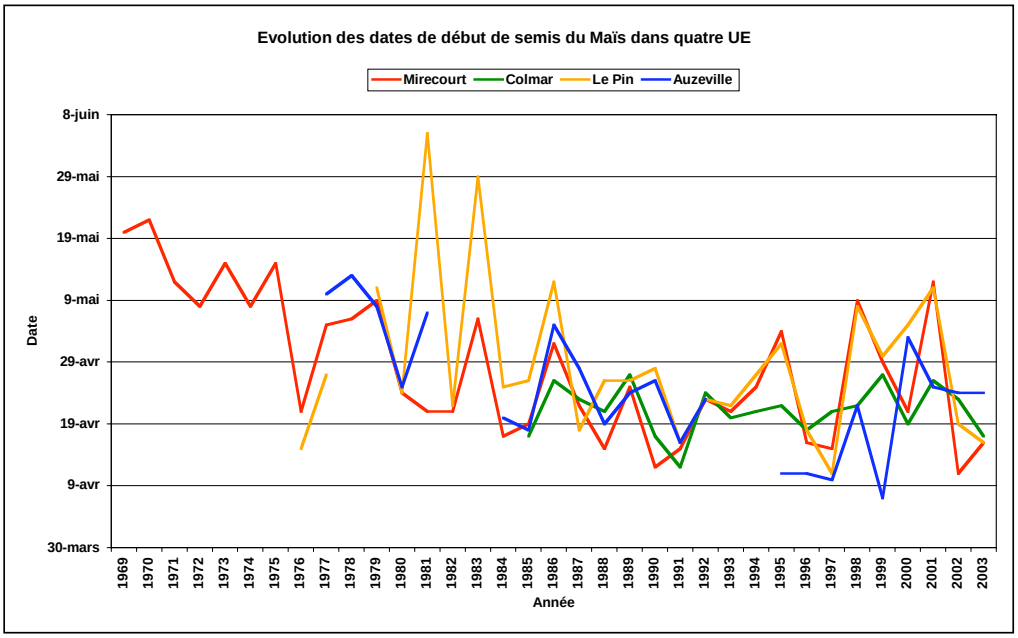


Figure 6. Evolution de la date de semis du maïs sur quatre domaines expérimentaux de l'INRA (d'après Benoit et de la Torre, 2004)

Pour la vigne, l'augmentation de température moyenne s'est traduite par des conditions globalement plus favorables et avec moins de variabilité inter-annuelle pour tous les vignobles français, avec une augmentation de teneur en alcool (de 1 à 2 degrés suivant les régions) et une diminution de l'acidité. La même avancée phénologique est également détectable pour les forêts, qui ont par ailleurs notablement augmenté leur productivité depuis le début du siècle (de l'ordre de 30 à 40%), sans qu'il soit encore possible de l'attribuer à un effet déjà marquant de l'augmentation du gaz carbonique, du réchauffement ou d'une fertilisation par l'azote contenu dans les pluies.

Au niveau des **insectes et maladies**, il apparaît encore peu de signes indiscutables que l'on pourrait relier directement au changement climatique : extension vers le nord et en altitude de la chenille processionnaire du pin et observations sur le cycle du carpocapse qui a vu l'apparition d'une troisième génération ; à l'inverse, extinction du phomopsis du tournesol dans le Sud-Ouest après la canicule de 2003. Il faut également prendre en compte la possibilité de mouvements géographiques qui amènent certaines maladies ou ravageurs, véhiculés par les moyens modernes de transport, à s'installer dans des régions où les conditions climatiques le leur permettront. D'où les interrogations actuelles sur des maladies émergentes dans le monde animal (fièvre du Nil sur les chevaux en Camargue), mais aussi végétal : une mouche blanche (*Bemisia tabaci*) originaire des régions subtropicales a été repérée depuis une dizaine d'années en Europe, et menace actuellement les cultures sous serre du sud du continent.

Ces différentes observations proviennent, pour l'essentiel, des travaux de l'INRA dans les domaines de l'agriculture et de la forêt. Pour une vision plus large sur les milieux naturels, elles peuvent être complétées par celles rassemblées dans l'ouvrage de Dubois et Lefevre (2003) et le livret édité par le RAC-F (2005).

> *La confrontation des prédictions issues des scénarios climatiques et des observations récentes renforce de plus en plus notablement la conviction sur l'attribution de ces changements, au-delà des facteurs naturels, à l'accroissement de l'effet de serre par l'action anthropique. Par ailleurs, même s'il est généralement très délicat d'isoler l'action éventuelle du réchauffement climatique de celui d'un grand nombre d'autres facteurs, les impacts déjà observés sur les écosystèmes, en particulier au niveau de leur phénologie mais aussi, dans certains cas, de leur productivité, attestent de la réalité d'un climat actuel significativement différent de celui des années 1940-1970 et très vraisemblablement en cours d'évolution sous l'action de l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère.*

1.3.1.6. Réchauffement climatique et ressources en eau

Il paraît donc souhaitable, à l'heure actuelle, de considérer l'hypothèse à l'avenir de sécheresses plus fréquentes et plus marquées, en particulier dans la région Sud de la France. S'il est possible, à partir de scénarios climatiques illustrés dans la figure 2 d'identifier les grandes lignes des impacts du réchauffement climatique sur l'agriculture et la forêt en France (Seguin et al., 2005), ceux-ci prennent surtout en compte une évolution moyenne du climat et ne peuvent pas encore intégrer correctement l'évolution des risques liés aux événements extrêmes tels que les sécheresses.

A l'échelon international, des études existent, telles que celles aux Etats-Unis de Brunbelow et Georgakak (2001) et de Thomson et al. (2005) (qui montrent des risques de réduction significative, plus de 50%, dans les régions semi-arides du Midwest et du Sud-Ouest, avec de plus un accroissement de la variabilité inter-annuelle) ou pour un grand nombre de régions agricoles mondiales en Argentine, Brésil, Chine, Hongrie, Roumanie et Etats-Unis par Rosenzweig et al. (2004) qui concluent à un effet peu significatif pour le maintien de l'irrigation dans les superficies actuelles, mais par contre à une impossibilité d'augmenter les superficies irriguées, sauf pour le cas du Brésil.

Par contre, au niveau national, si des travaux ont permis d'évaluer les conséquences du réchauffement climatique sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants du Rhône et de la Seine dans le cadre du programme GICC, il n'apparaît pas encore d'évaluation précise sur les ressources en eau disponibles pour l'agriculture. L'étude préliminaire de Bouraoui et al. (1997) sur le site de la Côte Saint-André dans l'Isère avait bien conclu en 1997 à une augmentation très forte de l'ETP, qui passerait en valeur annuelle de 850 à 1260 mm alors que la pluviométrie augmenterait seulement de 1050 à 1100 mm dans un scénario de 2 x CO_2, conduisant à un accroissement très important du déficit pluviométrique P-ETP, en particulier en période estivale. Mais, si la tendance apparaît bien conforme à ce qui est attendu, les valeurs obtenues pour l'ETP apparaissent surestimées par la méthode de calcul employée, et ces chiffres demanderaient à être revus à la baisse. De plus, au niveau des couverts végétaux, des travaux plus récents (Seguin et al., 2005) ont établi que l'augmentation de la résistance stomatique résultant de l'accroissement du CO_2 atmosphérique (et conduisant à une amélioration de l'efficience de l'eau) devrait avoir pour effet de contrebalancer l'augmentation de la composante purement climatique de l'ETP. Par ailleurs, la tendance à un raccourcissement généralisé du cycle (en l'absence de mesures d'adaptation) aurait également pour effet de diminuer la durée de la période de transpiration du couvert. C'est d'ailleurs ce qui a été constaté, en particulier en 2003 sous l'effet des fortes températures : l'ETM des cultures d'été s'est située proche des valeurs normales, en grande partie à cause d'une augmentation notable (15%) du rayonnement solaire.

Au niveau de la demande en eau pour l'irrigation, si l'augmentation de température et surtout celle du rayonnement solaire liée à une couverture nuageuse plus faible conduisent à une demande climatique accentuée, le raccourcissement du cycle du végétal (et à plus long terme l'accroissement de la résistance stomatique avec l'élévation du CO_2 atmosphérique) introduisent des effets de compensation. C'est donc finalement plutôt la baisse prévue de la pluviométrie qui représenterait la composante majeure d'une tendance à l'accentuation de la sécheresse au niveau purement climatique.

1.3.1.7. Conséquences pour l'expertise

Aussi bien la revue des scénarios prévus par les modélisateurs du climat que celle des observations récentes sur son évolution, attestée par ses impacts, conduisent à retenir avec un degré de confiance élevé la probabilité pour la fin du siècle et pour la France d'un réchauffement moyen se situant entre 2 et 3°C, plus marqué en été, accompagné d'une augmentation de la pluviométrie en hiver et d'une réduction de la pluviométrie pouvant atteindre 30% en période estivale. Pour la sécheresse spécifiquement, l'augmentation des précipitations en hiver devrait plutôt tendre à une diminution de la sécheresse hydrologique et leur réduction en été à une accentuation de la sécheresse agricole.

Cette tendance générale pour la fin du siècle ne peut donner qu'une indication partielle, dans la mesure où ne sont pas encore disponibles des données plus complètes sur la variabilité et les événements extrêmes. Les travaux récents sur ce point effectués dans le cadre du projet IMFREX soutenu par le programme GICC coordonné par le MEDD (site <http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex>) permettent bien d'avoir une information quantitative détaillée sur ceux-ci pour la variable "température" et sur les épisodes de pluie intense, mais l'information relative à la sécheresse est limitée à l'indicateur "nombre de jours consécutifs sans pluie > 0,1mm", qui est d'une portée applicative très limitée.

Par ailleurs, il est très important de noter que Météo-France se refuse, à l'heure actuelle, à proposer des scénarios climatiques dits "de transition" (avant 2070) car les années entre 2000 et 2050 sont dominées par la variabilité inter-annuelle d'une seule simulation. Il n'y a pas de signal climatique visible, et leur utilisation, très tentante au demeurant, conduirait à dire que les années 2020 vont être plus pluvieuses, les années 2030 plus froides, etc., alors que ce n'est que "l'imagination" du modèle.

L'horizon de ce travail d'expertise est clairement centré sur les 10 à 20 prochaines années. Il ne nous est donc pas paru souhaitable de recourir à l'utilisation des scénarios climatiques de transition existant au niveau international, ce qui nous conduit à considérer les épisodes récents (en particulier 2003, très proche en été des conditions prévues par les scénarios "fin de siècle", mais aussi 2005 avec une sécheresse hydrologique marquée) comme représentatifs des tendances globales liées au réchauffement. En conséquence, l'essentiel du travail a été basé sur la prise en compte des données climatiques en gros des trente dernières années (1972-2005 plus précisément). Sur un plan scientifique, cette démarche se justifie par son appartenance à la catégorie dite des "scénarios analogues" (Carter, 2006). L'analogie temporelle sur laquelle elle s'appuie utilise l'information climatique passée comme analogue du futur climatique possible. Beaucoup utilisée en paléoclimatologie à partir de l'information obtenue sur des enregistrements géologiques, elle a été reprise récemment avec les enregistrements climatiques, généralement du siècle passé, par exemple pour situer les épisodes marqués de sécheresse en Amérique du Nord (Sauchyn et al., 2003). La principale limitation de cette démarche pour se projeter dans le futur (Carter, 2006) est que les épisodes passés se situent dans un contexte qui n'était pas encore marqué par le renforcement anthropique de l'effet de serre. Mais elle ne paraît pas constituer un obstacle majeur, dans la mesure où l'horizon des vingt prochaines années ne sera pas marqué, ni par un effet majeur de l'augmentation du CO_2 sur la production photosynthétique, ni par l'augmentation moyenne de la température (de l'ordre de 1°C, identique à celui constaté pendant les vingt dernières années), au moins pour le cadre de notre analyse.

Si les prédictions pour la fin du siècle sont largement diffusées par les modélisateurs du climat, il leur apparaît encore délicat de proposer des scénarios qui se voudraient fiables pour un horizon plus proche, du type 2025. En tablant sur un réchauffement moyen de l'ordre de 1°C, on peut estimer que le climat d'ici cette échéance restera dans la limite haute de la gamme de résilience de l'agriculture. Dans la mesure où les 20 dernières années ont déjà expérimenté un tel réchauffement moyen, avec une variabilité très forte, voire exceptionnelle au niveau d'une année comme 2003, proche des scénarios 'fin de siècle' pour l'été, il apparaît indiqué, plutôt que de se baser sur des simulations à partir de scénarios hasardeux, d'utiliser cette série récente en la considérant par analogie comme la plus probable pour représenter ce futur proche (à l'exception du réchauffement moyen attendu de l'ordre de 1°C).

Rappel des points essentiels

Les observations récentes attestent, au minimum, d'un réchauffement significatif depuis 1860 au niveau global, avec une accentuation marquée depuis les années 1980. Il est évidemment variable à la fois dans le temps et dans l'espace, mais la tendance générale paraît indiscutable et bien établie par les impacts directs ou indirects sur les milieux naturels et certaines activités humaines. Il est maintenant fortement probable qu'il soit causé par l'augmentation de l'effet de serre évalué dans les modèles climatiques, comme devrait l'établir encore plus clairement le prochain rapport du GIEC prévu pour 2007.

Bien évidemment, les projections sur les impacts reposent sur la crédibilité des scénarios du futur. Si la perspective d'une augmentation significative de la température moyenne apparaît fortement crédible, sa répartition saisonnière et sa variabilité, ainsi que la fréquence des extrêmes demeure un sujet de questionnement, au même titre que les prévisions sur les pluies qui ont un impact tout aussi primordial.

En se projetant dans un avenir proche (horizon 2020-2025), il est permis de penser qu'un réchauffement limité (de l'ordre de 2°C) ne provoquerait qu'un léger déplacement d'équilibre, restant dans les limites des capacités d'adaptation presque traditionnelles : le siècle passé a bien surmonté des variations des températures estivales de l'ordre de plus ou moins 1°C, et la génétique a permis de remonter la culture du maïs-grain au nord de Paris par rapport à l'ancienne limitation géographique au Sud-Ouest ou dans certaines régions de Rhône-Alpes.

Mais le principal changement serait sans doute à attendre de l'accentuation de la sécheresse estivale, en particulier pour la partie sud de l'hexagone. Elle s'accompagnerait d'une tendance accentuée à une avancée généralisée du calendrier agricole et à un raccourcissement de la durée des cycles des cultures. Cet effet sera à prendre en compte pour raisonner les systèmes de culture en fonction du risque de sécheresse. L'exemple de l'été 2003 a montré un impact significatif de cette tendance. Sur un épisode isolé, les conséquences à court terme ont pu être réduites, mais la perspective d'un retour fréquent de tels épisodes met au premier rang des préoccupations les tensions vraisemblables sur la ressource hydrique et la compétition de l'irrigation avec les autres usages.

Références bibliographiques

Acot P. (2003). *Histoire du climat*, Perrin, Paris, 309 p

Benoit M., de la Torre C. (2004). *Changement climatique et observation à long terme en unités expérimentales ; évolution des pratiques agricoles et des réponses physiologiques des couverts végétaux*. Journées MICCES 2004, http://www.avignon.inra.fr/MICCES

Bouraoui F., Vachaud G., Chen T., Li L.X., Le Treut H. (1997). Changements climatiques et évolution des ressources en eau souterraines : aspects spatio-temporels, *actes du colloque 'Les temps de l'environnement', journées du PEVS, Toulouse 5-7 novembre 1997, CNRS (ed*), 45-51

Brunbelow K., Georgakakos A. (2001). An assessment of irrigation needs and crop yield for the United states under potential climate changes, *Journal of Geophysical Research*, 106, 27, 383-27, 405

Carter T. (2006). *General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*. Rapport pour le groupe de travail TGICA de l'IPCC, juin 2006, 70 p.

Delecolle R., Soussana J.F., Legros J.P. (1999). Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française*, Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 85, 45-51

Dubois P.J., Lefevre L.P. (2003). *Un nouveau climat. Les enjeux du réchauffement climatique*, La Martinière, Paris, 255p.

Dupouey J.L., Arrouays D., Balesdent J., Gabrielle B., Gosse G., Pignard J., Seguin B., Soussana J.F. (2005). Rôle de l'agriculture et des forêts dans l'effet de serre. In : Colonna. P (ed). *Chimie verte*, Lavoisier, Paris, 447-486

EEA (2004). *Impacts of Europe changing climate. An indicator-based assessment,* EEA report n°2/2004, 107 p.

Ganichot B. (2002). Evolution de la date des vendanges dans les Côtes du Rhône méridionales, *Actes des 6e rencontres rhodaniennes*, Institut Rhodanien, Orange, 38-41

Giannakopoulos C., Bindi M., Moriondo M., LeSager P., Tin T. (2005). *Climate change impacts in the Mediterranean resulting from a 2° C global temperature rise*, rapport pour le WWF, 66 p.

Houghton J.T., Callander B.A., Varney S.K. (1992). *Climate change 1992, The supplementary report to the IPCC scientific assessment*, IPCC Scientific Assessment Working Group, Houghton *et al.* ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 200 p.

IPCC (2001). *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC,* Cambridge University Press, Cambridge

Jones P.D., Moberg A. (2003). Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001, *Journal of Climate*, 16, 206-223

Joussaume S. (1999). *Climat d'hier à demain,* CNRS Editions, 143 p.

Le Roy Ladurie E. (1983). *Histoire du climat depuis l'an mil*, Collection champs, Flammarion, Paris, deux volumes (tome I : 287 p., tome II : 254 p.).

Moisselin J.M., Schneider M., Canelas M., Mestre C.O. (2002). Les changements climatiques en France au XXème siècle : étude des longues séries homogénéisées de température et de précipitations*, La Météorologie*, 38, 45-56.

Moisselin J.M., Canelas M., Schneider M., Dubuisson B. (2003). Les longues séries de référence pour l'étude des changements climatiques, *Actes des journées AMA édités par Météo-Franc*e, Toulouse, 95-98

Perarnaud V., Seguin B., Malezieux., Déqué M., Loustau D. (2005). Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry adapt to 21st century climate change, *Climatic Change*, 70, 319-340

Planton S. (2005). Changements climatiques futurs en France. In : Greenpeace (ed), *Impacts climatiques en France*, 48-54 (rapport disponible sur le site www.impactsclimatiquesenfrance.fr)

RAC-F (2005). *Changement climatique : la nature menacée en France,* brochure éditée collectivement avec FNE, WWF, LPO, Greenpeace, 24 p.

Roderick M.L., Farquahr G.D. (2002). The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years, *Science*, 298, 1410-1411

Rosenzweig C., Strzepek K.M., Majo D.C., Iglesias A., Yates D.N., Mc Cluskey A., Hillel D. (2004). Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies ,*Global Environmental Change, part A*, 14, 345-360

Salinger J.M. (2005).Climate variability and change :past, present and future- an overview, *Climatic Change*, 70, 9-29

Sauchyn D.J., Stroich J., Beriault A. (2003). A paleoclimatic context for the drought of 1999-2001 in the northern Great Plains of North America, *The Geographical Journal,* 169, 158-167

Seguin B., Domergue M., Garcia de Cortazar I., Brisson N., Ripoche D. (2004). Le réchauffement climatique récent : impact sur les arbres fruitiers et la vigne, *Lettre Pigb-Pmrc France Changement Global*, 16, 50-54

Seguin B., Brisson N., Loustau D., Dupouey J.L. (2005) *Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt*. In : L'homme face au climat, actes du symposium du Collège de France, Paris, 12-13/10/2004, Odile Jacob, Paris,177-203

Soussana J.F. (2001). *Changement climatique. Impacts possibles sur l'agriculture et adaptations possibles.* In : Demeter, Armand Colin, Paris, 195-222.

Soussana J.F., Teyssonere F., Picon-Cochard C., Casella E., Besle J.M., Lherm M., Loiseau P. (2002). Impacts des changements climatiques et atmosphériques sur la prairie et sa production, *Fourrages*, 169: 3-24

Tegart W.J.McG., Sheldon G.W., Griffiths D.C. (1990). *Climate change: the IPCC impacts assessment*, Australian Government Publishing Service, Canberra, Australie

Thomson A.M., Brown R.A., Rosenberg N.J., Srinivasar R., Cesar Izaurralde R. (2005). Climate change impact for the conterminous USA: an integrated assessment., part 4 water resources, *Climatic Chan*ge, 69,67-88

Wild M., Gilgen G., Roesch A., Ohmura A., Long C.N., Dutton E.G., Forgan B., Kallis A., Russak V., Tsvetskov A. (2005). From dimming to brightening :decadal changes in solar radiation at earth's surface, *Science*, 308, 847-850

1.3.2. Enjeux économiques et politiques

Jean-Pierre Amigues (INRA, Toulouse), Isabelle Doussan (Université de Nice), Stéphane Ghiotti (CNRS, Montpellier), Alban Thomas (INRA, Toulouse)

Cette partie présente des éléments d'évaluation de l'incidence de la modification du contexte auquel fait face l'agriculture irriguée, et au-delà, le secteur dans son ensemble dans sa relation avec la ressource en eau. Dans un premier temps, nous montrons en quoi la dernière réforme de la Politique Agricole Commune (PAC) de juin 2003 va modifier les différentiels de rentabilité entre les différents choix de production des exploitants agricoles. Une première étude menée par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable est commentée, dans laquelle figurent à notre connaissance les premiers éléments d'évaluation quantitative portant sur l'impact de la réforme de la PAC et ses conséquences en matière de consommation d'eau pour irrigation. Dans un deuxième temps, nous discutons en détail du second élément important de contexte, celui de la Directive Cadre sur l'Eau de 2000. Cette seconde partie débouche naturellement sur une interrogation relative à l'articulation entre les niveaux local et global d'une part, entre le sectoriel et le spatial d'autre part.

1.3.2.1. Les conséquences de la réforme de la PAC

En conformité avec l'Agenda 2000, l'accord de Luxembourg de juin 2003, faisant suite à la première réforme de 1999 de la Politique Agricole Commune (PAC), a confirmé l'idée d'un soutien à l'agriculture qui irait vers un abandon progressif du couplage des aides à la production, en faveur d'aides directes dépendant des surfaces.

Dans le système précédent de la PAC, le calcul du paiement à la surface dépendait du rendement régional moyen des cultures (plan de régionalisation) : le rendement de référence. Le montant de l'aide à l'hectare était obtenu en multipliant le montant unitaire des aides (63 € par tonne pour les céréales) par le rendement de référence. Le montant total des aides pour les céréales en France était par exemple de 3,93 milliards d'Euros l'an passé. Mentionnons enfin que les aides étaient plafonnées à 300 000 Euros par exploitation.

Le règlement communautaire autorisait les Etats membres à pratiquer des taux de prime différenciés selon la culture céréalière (maïs ou autre) et en distinguant les cultures irriguées ou non. La France a choisi cette option, qui a conduit à des différences notables dans les paiements à la surface, selon le mode retenu par département : a) rendement unique, b) général et spécifique maïs, c) général sec et spécifique irrigué, d) général, spécifique maïs sec et spécifique maïs irrigué, e) général sec, spécifique irrigué, spécifique maïs sec et spécifique maïs irrigué.[1]

Le système d'aide communautaire conduisant les agriculteurs à aller vers les cultures les plus rentables, tout en limitant les distorsions sur les marchés agricoles via la baisse des prix d'intervention compensée par des paiements directs, a poussé les exploitants à privilégier les cultures irriguées. En effet, non seulement les primes étaient supérieures en raison de rendements plus importants, mais encore le surcoût lié à l'augmentation des volumes d'eau d'irrigation ne compensait pas la hausse de la marge brute.[2] Le problème provient de la liberté qu'avaient les Etats de l'Union Européenne de choisir le mode de rendement de référence, en isolant les cultures irriguées (le maïs, en particulier) des autres céréales. Cette prime à l'irrigation, alors justifiée par la volonté de subventionner une partie des coûts

[1]Par exemple, en 2004, le taux d'aide à l'hectare était de 402 € pour les surfaces COP (céréales-oléagineux-protéagineux) dans la Marne, 449 € pour le maïs sec et 555 € pour le maïs irrigué dans les Landes, et 487 € pour les céréales et protéagineux irrigués dans le Gers (contre 310 € pour le groupe COP sec).

[2]La Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées a par exemple estimé une marge brute comprise entre 460 et 755 € par hectare pour le maïs dans la région, selon les conditions locales (sols profonds, rivière basse, etc. sur une base de 52 à 75 quintaux / ha), contre une marge brute comprise entre 712 et 900 € par hectare pour le maïs irrigué (sur une base de 85 à 110 quintaux / ha). Le coût de l'eau d'irrigation étant estimé à 0,064 € par m^3, le volume nécessaire pour atteindre un rendement de 110 quintaux n'est que de 128 € pour 2000 m^3 / ha, soit environ 14% des charges totales.

d'investissement et de fonctionnement des équipements d'irrigation, a incité les exploitants à augmenter leurs prélèvements en eau.

Si la réforme de la PAC de 1992 a instauré des montants d'aides à l'hectare supérieurs pour les cultures "en irrigué" que pour les cultures "en sec", la nouvelle réforme de la PAC de 2003 (règlement 1782/2003 du 29 septembre 2003), en découplant à 75% les aides des surfaces dédiées aux céréales et aux protéagineux, limite fortement l'effet de cette prime à l'irrigation.

1.3.2.1.1. Effets de la réforme de la PAC 2003 (jusqu'en 2013)

Depuis l'accord de Luxembourg en 2003, deux nouveautés importantes apparaissent dans la réforme de la PAC, avec une échéance au 1er janvier 2005, 2006 ou 2007 selon les Etats membres (2006 pour la France). Tout d'abord, les paiements à l'hectare font l'objet d'une subordination au respect de certaines exigences environnementales (par un audit agricole), de sécurité et de gel obligatoire des terres. Ensuite, un paiement unique par exploitation ou "régime de paiement unique" est prévu, dissocié de la production, n'excluant cependant pas le maintien d'éléments de couplage, dans une mesure limitée, pour éviter l'abandon de certaines productions. Par exemple, la position française est de conserver 25% de l'aide couplée à la production des cultures arables (comme dans le régime précédent). Les aides seront, dans le nouveau dispositif, calculées en fonction de la moyenne des primes entre 2000 et 2002 et de la surface agricole ayant donné droit à ces primes. Les droits de paiement propres à chaque exploitant pourront être transférés dans le même Etat membre, avec ou sans la terre en cas de transactions foncières ou de location. Avec ce système, il n'y a plus d'obligation à produire, mais l'agriculteur s'engage à maintenir ses terres dans de bonnes conditions agronomiques et environnementales (éco-conditionnalité).

Les changements à la PAC devant être appliqués à partir de 2004 par les Etats membres sont résumés dans Moreddu (2003). Relevons en particulier pour les céréales, le maintien du prix d'intervention et du paiement direct de 63 €/tonne. L'aide sera intégrée au paiement unique par exploitation en 2005, et les majorations mensuelles des prix d'intervention seront diminuées de moitié. Pour le blé dur, le montant du supplément pour les zones "traditionnelles" (qui était égal à 344,5 € en 2002) est fixé à 313 €/ha en 2004, 291 € en 2005 et 285 € à partir de 2006. Une nouvelle prime spéciale à la qualité de 40 €/ha sera octroyée, sur la base d'une quantité minimale de semences certifiées, et dans la limite des superficies maximales garanties. L'aide spécifique appliquée aux régions "non traditionnelles" (139,5 €/ha) sera supprimée progressivement sur 3 ans à partir de 2004. Pour les oléagineux, aucun changement n'est prévu avant intégration du paiement à la surface dans le paiement unique, et pour les protéagineux, le paiement en vigueur (9,5 €/ha) est converti en une aide à la surface de 55,57 €/ha, non intégrée au paiement unique par exploitation.

Par ailleurs, la réforme met en œuvre le **principe d'éco-conditionnalité.** Les Accords de Berlin (1999) ont introduit le principe de l'éco-conditionnalité des aides (règlement 1259/99), selon le principe de subsidiarité (pour des engagements agri-environnementaux, des exigences environnementales générales ou des exigences environnementales spécifiques). L'éco-conditionnalité a été introduite en France dès 2000 sur les cultures irriguées. En effet, depuis cette date, l'octroi de la majoration aux cultures irriguées est subordonné au respect de la loi sur l'eau de 1992 sur deux points : disposer de l'autorisation de prélèvement (condition mise en œuvre à partir de 2000) et d'un équipement de mesures des volumes consommés (condition mise en œuvre à partir de 2001).

La réforme de la PAC de 2003 généralise ce principe de conditionnalité : l'octroi des aides directes sera désormais soumis au respect de 18 textes réglementaires européens et de "Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales" (BCAE) à définir par chaque Etat-membre.

L'irrigation peut se trouver concernée par ces nouvelles mesures à travers les systèmes de production dans lesquelles elle est pratiquée, notamment en ce qui concerne :
- le maintien des zones humides ;
- le maintien de la teneur en matière organique des sols (principe de rotation des cultures) : 3 cultures ou 2 familles de cultures, avec une dérogation permettant de remplacer cette obligation par l'implantation d'une culture intermédiaire en hiver.

L'on voit donc que les dispositions prises en 2003 dans le cadre de la réforme de la PAC semblent aller dans le bon sens : d'abord en supprimant toute référence dans les aides à la nature de la culture (irriguée ou non, maïs ou autres céréales), et ensuite en conditionnant les aides directes au respect de directives environnementales (protection des ressources en eau et de l'habitat naturel, lutte contre l'érosion, par exemple). Même si le mode de référence historique favorise les grandes exploitations ayant pratiqué des cultures céréalières irriguées entre 2000 et 2002, la seule incitation pour les producteurs à choisir de telles cultures sera à présent la possibilité de profiter de prix relativement avantageux pour ces dernières, par rapport à d'autres productions. Par conséquent, les fluctuations de prix sur les marchés agricoles deviendront à terme des déterminants essentiels de l'assolement, et par voie de conséquence, du changement dans les volumes d'eau captés pour irrigation. Il demeure que l'éco-conditionalité des aides publiques vise plus à préserver ou restaurer la qualité des ressources en eau, la biodiversité et le paysage, qu'à modifier de façon significative le comportement des irrigants par une incitation à moins prélever dans la ressource.

De façon générale, on peut considérer que la nouvelle PAC, en découplant les aides de la production, assurera un revenu certain plus ou moins permanent aux producteurs, à la condition de respecter le code de bonnes pratiques exigé (éco-conditionnalité). L'autre partie du revenu par contre, associée à des prix d'intervention de plus en plus limités, sera donc affectée par des variations de prix plus importantes, mais aussi par des variations de rendement (le risque de production). En fonction de la proportion du revenu agricole tributaire des aides découplées (droits à paiement unique, Single Payment Scheme), le comportement des exploitants risque d'être très hétérogène. Un producteur de grandes cultures doté de droits conséquents (calculés sur la période 2000-2002) pourra ainsi avoir tendance à pratiquer des systèmes plus risqués si son aversion au risque diminue avec son revenu total (et donc avec la part certaine de ce dernier). Un producteur disposant de droits limités (si sa SCOP, surface en céréales, oléagineux et protéagineux, était faible sur la période précédente) aura probablement tendance à rechercher un système réduisant le plus possible le risque de production (ainsi que le risque de prix).

La logique même du découplage est de neutraliser l'effet des aides sur les décisions de productions des agriculteurs. Néanmoins l'obtention de revenus sécurisés est susceptible de modifier les choix économiques des producteurs en influençant leurs stratégies de diversification des risques, tant de cours que de production. Selon les degrés d'aversion au risque des exploitants, on devrait donc constater des évolutions divergentes de leurs paniers de cultures, avec des conséquences encore mal mesurées sur les productions à l'échelle agrégée.

Le travail de Barkaoui et Butault (2004) présente les résultats de trois scénarios à l'horizon 2008 : découplage total des aides au sens de la réforme de 2003 ; découplage partiel PMTVA (découplage à 75% des grandes cultures, maintien de la prime au maintien du troupeau de vaches allaitantes couplée à 100%, maintien de la prime aux caprins et ovins couplée à 50%) ; découplage partiel PSBM (découplage à 75% des grandes cultures, maintien de la prime spéciales aux bovins mâles couplée à 75% et maintien de la prime compensatoire ovine couplée à 50%). Un découplage total au sens de la réforme de la PAC de juin 2003 entraînerait selon les simulations une diminution de 8% des surfaces céréalières en Poitou-Charentes, 5% en Midi-Pyrénées-régions de plaine, 40% en Midi-Pyrénées-régions de montagne, 19% en Pays de Loire, et une stabilité en Ile-de-France. La Surface Fourragère Permanente (SFP) augmenterait quand à elle dans toutes ces régions (16% en Poitou-Charentes, 26% en Midi-Pyrénées-plaine et 7% en Midi-Pyrénées-montagne, 14% en Pays de Loire). Pour la France entière, la surface en céréales diminuerait à l'horizon 2008 de 5,4%, et la SFP augmenterait de 7,7%. Les auteurs insistent sur le fait que, contrairement aux options de recouplage de la PAC, un découplage total n'aurait que peu d'incidence à court terme dans le secteur des grandes cultures, dans la mesure où une prime unique à l'exploitation n'est pas fondamentalement différente d'un prime homogène à l'hectare.

Il existe une concordance avec les résultats de modèles agrégés de type macro-économique (Gohin, 2004), sur les impact suivants d'un découplage total :
- effet mineur pour les grandes cultures,
- incertitude pour les nouveaux secteurs (tabac, houblon, coton),

- incidence forte dans l'affectation des surfaces entre grandes cultures et fourrages pour bovins-viande et ovins, avec augmentation des prairies notamment.

Butault et Delame (2004) notent qu'au niveau des exploitations, le découplage (partiel ou total) des aides incite à une simplification des assolements, les exploitants choisissant le cultures les plus rentables. Avec une prime unique à l'hectare initiée par l'Agenda 2000, les céréales sont déjà favorisées par rapport aux oléagineux. Poussée à l'extrême, cette simplification des assolements pousserait même au développement de la mono-culture ; cependant, les mesures de conditionnalité joueront dans le sens contraire, en imposant des assolements diversifiés avec trois cultures ou deux familles de cultures minimum, afin de limiter la baisse de la surface consacrée aux oléagineux.

Le seul travail mené à ce jour sur l'impact de la réforme PAC de 2003 sur les consommations en eau pour l'agriculture a été proposé par Buisson (2005). Utilisant une modélisation par Programmation Mathématique Positive (PMP), l'auteur simule l'impact d'un découplage total puis partiel (l'option retenue par la France), pour 7 orientations techniques (OTEX) et 9 régions françaises différentes, sur les assolements et ensuite sur les consommations en eau.

Le tableau 1 résume l'impact d'un découplage partiel sur les surfaces et les consommations en eau. On constate que l'impact sur les surfaces irriguées est particulièrement notable pour les grandes régions potentiellement affectées par la sécheresse (Aquitaine, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes) dans le cas du découplage partiel, que le prix du maïs augmente fortement ou non. Un résultat important est cependant que, dans une hypothèse de stabilité de ce dernier prix, l'élasticité de la consommation d'eau à la variation de la surface irriguée est dans la majorité des cas supérieure à 1 (la consommation réagissant plus que proportionnellement, et dans le même sens, à une variation des surfaces). Par contre, l'impact sur la consommation est quasiment nul, voire positif dans certains cas, lorsque l'on introduit comme scénario une (forte) augmentation du prix du maïs (+25% par rapport à son prix de 2002). Ces résultats indiqueraient par conséquent la possibilité d'une intensification de la production : un rendement supérieur, obtenu sur une surface plus petite mais avec dans certains cas une consommation plus forte de la demande en eau (et *a priori*, d'autres facteurs de production).

Tableau 1. Prévision de l'impact de la réforme PAC 2003 (découplage partiel) sur les surfaces irriguées et les volumes d'eau consommés pour l'irrigation

	A prix du maïs inchangé		Avec hausse du prix du maïs de 25%	
Région	Surfaces irriguées	Volumes d'eau	Surfaces irriguées	Volumes d'eau
Midi-Pyrénées	-16,4%	-20,8%	-13,3%	-4,9%
Poitou-Charentes	-11%	-12%	-9%	+3,1%
Aquitaine	-7,4%	-8,3%	-6,5%	-0,3%
Rhône-Alpes	-5,3%	-10,3%	-4,8%	+3%
Pays de Loire	-4,6%	-7,3%	-4,2%	+2,9%
Alsace	-3,5%	-3,9%	-3,1%	+5,9%
PACA	-1,3%	-0,2%	-1,3%	0%
Languedoc-Roussillon	0,2%	-0,3%	+0,2%	0%
Ensemble	-7,9%	-7,9%	-6,9%	0%

Source : G. Buisson (2005)

L'étude mobilisait les techniques de programmation mathématique positive avec calibrage par les surfaces. Ce choix de calibration est logique au vu du peu de précision des données disponibles sur les volumes d'eau consommés, les surfaces irriguées étant mieux connues. Mais l'on sait que la méthode retenue peut être sensible au choix de calibration. C'est ainsi qu'une autre étude (CACG), conduite selon une autre méthodologie, conclut à des réductions de surfaces irriguées pour le Sud-Ouest d'un même ordre de grandeur mais assorties d'un accroissement des consommations, par effet d'intensification du maïs sur les zones les plus favorables à cette culture. Il est donc encore nécessaire de poursuivre l'effort d'étude avant de pouvoir avancer des conclusions définitives.

1.3.2.1.2 Autres éléments de contexte

De la même façon qu'il était important de préciser les impacts des réformes des politiques agricole et environnementales en termes d'occupation des sols et de niveau de production, afin d'en déduire des niveaux d'irrigation anticipés, les modifications structurelles du secteur agricole sont également importantes à considérer.

- **Démographie des exploitations agricoles**

Butault et Delame (2004) présentent une analyse quantitative de l'évolution des effectifs d'exploitations à l'horizon 2009. Entre 1988 et 2000, le taux de disparition des exploitations agricoles était en France de 3,5%, et est estimé à 3,39% entre 2000 et 2009. L'enquête Structures évaluant le nombre d'exploitations à 590 000 en 2003, Lefevre (2003) estime, à partir de données MSA, le nombre d'exploitations entre 466 000 et 428 000 en 2010. Butault et Delame (2004) estiment pour leur part le nombre d'exploitations à environ 486 000 en 2010 (contre 663 000 en 2000). Ces valeurs correspondent aux chiffres couramment évoqués dans la presse, d'environ 25 000 disparitions nettes d'exploitations par an en France sur la période actuelle. La projection conduite par les auteurs, à partir d'une analyse statistique par chaînes de Markov, évalue également la variation du nombre d'hectares exploités. Concernant la déprise agricole, le taux annuel de diminution de la surface globale est de 0,23% entre 1963 et 2000 (0,21% après 1993). Comme le notent Butault et Delame (2004), dans la mesure où la réforme de la PAC de 1992 a renforcé le poids des aides liées à la surface, elle a donc joué en faveur d'un maintien des surfaces exploitées. A surface agricole constante, la surface moyenne par exploitation passerait de 42 à 57 hectares entre 2000 et 2009.

- **Dépendance énergétique de l'agriculture**

D'après la FNSEA, les consommations d'énergie, lubrifiants et engrais représentent environ 15% des consommations intermédiaires de l'agriculture française. Et l'élasticité du revenu agricole à ces dernières est évaluée à -0,35 (une hausse de 10% des consommations intermédiaires entraîne une baisse de 3,5 % du revenu). De plus, l'élasticité des consommations intermédiaires au prix du pétrole étant estimée à -0,15 toutes choses égales par ailleurs, une hausse du prix du pétrole brut peut avoir comme impact une baisse du revenu d'environ 0,5%, soit une élasticité de -0,05. Une tendance à la hausse du prix du pétrole brut dans les années à venir aura donc des conséquences non négligeables sur le revenu agricole, concernant les charges d'exploitation proportionnelles à la production.

- **Débouchés et marchés**

L'intérêt d'une substitution entre productions pour faire face aux sécheresses est largement dépendant de la vitalité économique des filières de débouchés de ces productions. Or leur situation est assez contrastée, ce qu'on peut illustrer par les exemples du tournesol, du sorgho, du maïs et des filières énergétiques.

Le marché du tournesol

Les débouchés existent pour des surfaces supérieures à ce qu'elles sont actuellement. L'huile de tournesol est la première huile alimentaire consommée en France. L'arrivée sur le marché, ces dernières années, de variétés oléiques agronomiquement performantes, offre de nouveaux débouchés : en alimentation humaine ; en tant que culture énergétique, en complément du colza, pour la fabrication de biodiesel (la culture est possible soit sur jachère, soit sur la SCOP où elle bénéficie alors de l'aide aux cultures énergétiques de 45 €/ha) ; en tant que culture industrielle (autorisée sur jachère), destinée surtout au secteur des biolubrifiants. Les tourteaux de tournesol constituent par ailleurs une source de protéines qui contribue à réduire l'important déficit protéique européen.

Le marché du sorgho

La France est le premier producteur de sorgho de l'Union européenne, avec environ 50% de la production. Les surfaces (moins de 60 000 ha) restent inférieures au potentiel actuel de 100 000 ha au

niveau des débouchés. Il constitue un substitut intéressant au maïs en cas de sécheresses répétées en raison de ses moindres besoins en eau. L'essentiel des débouchés concerne l'alimentation animale, avec une demande communautaire (principalement espagnole) supérieure au marché intérieur. Ce dernier reste modeste alors que le remplacement du maïs par du sorgho ne pose aucun problème nutritionnel ou technique pour l'alimentation animale. Les sorghos français sont d'ailleurs les seuls en Europe à être garantis 100% sans tanins. Les cas étrangers (Espagne...) confirment que les filières peuvent s'adapter à cette substitution. Reste en France un problème d'adaptation de filière (collecte, stockage...), et de gestion des surcoûts pour une matière première supplémentaire marginale dans les approvisionnements des coopératives.

On constate un léger accroissement des surfaces semées en 2006 qui atteignent environ 60 000 ha, soit +10-15% par rapport à 2005 (source semenciers) ; alors que le prix du sorgho a peu décroché en 2006 par rapport au maïs (-2 à -3 €/t).

Le marché du maïs

Au total, la culture du maïs occupe 3,33 millions d'hectares (Mha) en moyenne : 1,5 Mha pour le maïs fourrage, 1,75 Mha pour le maïs grain consommé, 50 000 ha pour le maïs semences, et 30 000 ha pour le maïs doux. Si les surfaces en maïs grain et semences restent stables depuis une dizaine d'années, on constate des ajustements à la baisse des surfaces et des rendements significatifs lors de sécheresses (en 2003 notamment).

L'Europe est le 4e producteur mondial de maïs grain avec environ 40 millions de tonnes (Mt), derrière les Etats-Unis, la Chine et le Brésil. Les utilisations totales de maïs en Europe sont d'environ 41 Mt, dont les ¾ sont destinés à l'alimentation animale. Le secteur industriel (amidon, semoule, corn flakes...) transforme environ 9 Mt. La France produit environ 41% (soit 16 Mt) du maïs grain européen. Le marché intérieur français en utilise 40% (soit 6,5 Mt environ), dont 3,5 Mt pour l'alimentation animale, et 2 Mt pour le secteur industriel (dont 1,5 Mt exportés par la suite). L'amidonnerie et la semoulerie représentent environ 1,8 Mt et 0,5 Mt respectivement. La France est l'un des très rares pays européens non déficitaires en maïs (avec l'Autriche et la Hongrie), avec un solde excédentaire de 9 Mt, qui lui permet de couvrir les déficits de ses pays partenaires, jouant ainsi un rôle central en Europe.

La France est un acteur majeur de la filière semence. Cette filière représente un chiffre d'affaires d'environ 650 millions d'Euros, ce qui fait de la France le leader européen de la production de semences de maïs (12 millions de doses, dont la moitié est exportée) et le premier exportateur mondial. A l'exception du marché de niche constitué par les semences, la filière maïs française est de plus en plus soumise à la compétition mondiale, et, dans un moindre mesure, des nouveaux états membres de l'Union (Hongrie).

Les débouchés énergétiques

La France s'est engagée à accroître significativement la part des biocarburants dans sa consommation (d'environ 1% actuellement à 7% en 2010). Le développement d'une production nationale repose pour l'instant sur l'utilisation d'espèces déjà cultivées pour des usages alimentaires. Le développement des cultures énergétiques est une opportunité pour le colza et le tournesol (filière biodiesel) que l'on peut considérer comme positive pour l'économie d'eau. On estime à 2 millions d'ha le potentiel de surfaces en colza pour la production de bio-carburants. Le sorgho a également une carte à jouer dans le cadre du plan gouvernemental sur les énergies renouvelables, puisqu'il est source à la fois d'amidon (bioéthanol) et de biomasse (thermique et production d'électricité). Il est prévu que le sorgho soit utilisé comme matière première dans l'installation en projet de Lacq.

Le débouché énergétique devrait donc être favorable à l'ensemble de la filière céréales et oléo-protéagineux. La question de la compétitivité de cette filière reste néanmoins posée, face à des perspectives de concurrence accrue des Etats-Unis et du Brésil sur le bio-éthanol. A ce nécessaire bilan économique doit s'adjoindre un bilan environnemental, en matière de pression sur les ressources en eau, en particulier. La perspective de débouchés nouveaux pour certaines productions devrait profiter aux cultures économes en eau.

Le marché des énergies renouvelables pourrait aussi conduire à l'introduction de nouvelles productions, dédiées à cet usage énergétique : Miscanthus, canne de Provence, taillis à (très) courte rotation..., dont l'intérêt par rapport à la consommation en eau devrait être étudié.

1.3.2.1.3. Le sorgho peut-il être une solution ?

Le sorgho est présenté de plus en plus comme un substitut intéressant au maïs, en raison de sa moindre consommation en eau. Une étude récente d'Arvalis-Institut du Végétal (Arvalis, 2005) présente une comparaison de rentabilité entre le maïs irrigué et le sorgho irrigué, sur la base du découplage partiel initié par l'accord de Luxembourg. Le tableau 2 présente la décomposition des recettes et des charges pour ces deux cultures.

Tableau 2. Comparaison maïs irrigué – sorgho irrigué, avec découplage partiel

	Sorgho irrigué	Maïs irrigué
Rendement (q/ha)	77	97
Prix (€/tonne)	91	95
Aides (€/ha)	122	122
Recettes (€/ha)	822,70	1043,50
Charges intrants hors eau (€/ha)	260	400
Irrigation (€/ha)	70	130
Marge brute (€/ha)	492,70	513,50

Source : Arvalis - Institut du Végétal (2005).

Il est frappant de constater que, le découplage des aides conduisant à des taux de compensation à la surface identiques entre le maïs et le sorgho, pour des prix à la tonne sensiblement identiques, les écarts constatés de marge brute ne reflètent pratiquement que des différences de rendement (à l'avantage du maïs) et de charges proportionnelles. Ainsi, l'écart de recettes entre le maïs et le sorgho (environ 220 €/ha) est presque compensé par le différentiel de charges (environ 200 €/ha).

Une autre étude partielle régionalisée, sur la base d'un échantillon réduit de 21 exploitants dans les régions Midi-Pyrénées, Rhône-Alpes et Poitou-Charentes, fournit des différentiels de rentabilité entre le sorgho d'une part, le maïs et le tournesol d'autre part. Toujours avec le scénario de découplage partiel à 75% retenu pour la France, et avec des prévisions de prix pour l'année 2006, les résultats sont donnés dans le tableau 3.

Tableau 3. Rentabilité comparée du sorgho avec d'autres cultures

Midi-Pyrénées			
	Sorgho sec	Sorgho irrigué	Tournesol sec
Rendement (q/ha)	59	77	25
Charges opérationnelles (Euros/ha)	228	347	227
Marge brute (€/ha)	433	525	371
Rhône-Alpes			
		Sorgho irrigué	Maïs irrigué
Rendement (q/ha)		89	127
Charges opérationnelles (Euros/ha)		389	637
Marge brute (€/ha)		613	788
Poitou-Charentes			
	Sorgho sec		Tournesol sec
Rendement (q/ha)	66		27
Charges opérationnelles (€/ha)	278		246
Marge brute (€/ha)	462		397

Source : Arvalis - Institut du Végétal (2006). Basé sur un échantillon de 21 exploitants. Les marges brutes sont calculées sous le scénario PAC 2003 (découplage partiel de 75%).

Si le sorgho tire profit du système actuel de paiements compensatoires (relativement à d'autres cultures) combiné à des coûts opérationnels moindres en ce qui concerne l'irrigation, la question de la commercialisation possible, en d'autres termes, des débouchés, se pose cependant. Les calculs de rentabilité présentés ci-dessus se basent en effet sur des hypothèses particulières de prix de vente et d'écoulement maximal des productions.

Les surfaces cultivées en cette céréale sont relativement faibles en France (environ 51 000 ha en 2004 et un pic de 71 000 ha en 2002), le rendement étant également relativement fluctuant (54 q/ha en 2004, contre 38 q/ha en 2003). Sur un volume produit estimé à 262 000 tonnes en 2005 (estimation ONIC), 71 000 tonnes sont autoconsommées et 191 000 sont collectées pour le marché final, s'ajoutant à 18 000 tonnes provenant de stocks initiaux et à 1 tonne importée. Au total sur les 210 000 tonnes disponibles, 55 000 tonnes sont achetées sur le marché français (dont 30 000 tonnes par les fabricants d'aliments du bétail) et 102 000 tonnes sont exportées (le stock final étant donc de 53 000 tonnes). Il faut noter que l'année 2005 est exceptionnelle à cet égard, la proportion des tonnages mis en stock étant plus faible lors des années précédentes : 18 000 tonnes sur 196 000 tonnes disponibles en 2004 et 24 000 tonnes sur 248 000 en 2003. En moyenne sur la période 2001-2005 et cela également pour chaque année, la moitié de la production est exportée, le reste étant mis en stock, autoconsommé ou utilisé localement. Il convient de noter que si la production de sorgho augmente régulièrement depuis 2003, les exportations et l'utilisation sur le marché intérieur diminuent sur la même période. Le tableau 4 fournit des statistiques de production et d'utilisation sur la période 2001-2005.

Tableau 4. Statistiques sur la production et l'utilisation du sorgho en France, 2001-2005

	2001	2002	2003	2004	2005
Surfaces (1000 ha)	67	71	61	48	51
Production (1000 tonnes)	395	453	214	254	262
Commercialisation	339	328	224	178	157
Dont marché français	106	113	112	68	55
Dont exportations	233	215	112	110	102
Stock final (1000 tonnes)	23	57	24	18	53

Source : Arvalis-Institut du Végétal et ONIC, "Récolte 2005". Les données 2004 sont provisoires, celles pour 2005 sont estimées (ONIC).

La France est manifestement un acteur majeur sur le marché du sorgho, avec la moitié de la production européenne en 2005 (42% pour l'Italie et 8% pour l'Espagne). L'Espagne est le premier client de la France (50% environ des exportations françaises), mais les volumes exportés diminuent de façon régulière depuis 5 ans. En comparaison, les Etats-Unis exportaient environ 5 millions de tonnes en 2005, l'Australie 500 000 tonnes et l'Argentine environ 200 000 tonnes. Les plus gros importateurs sont le Mexique (3,6 millions de tonnes en 2005), le Japon (3,6 millions de tonnes) et l'Union Européenne (200 000 tonnes). Cette position intéressante sur le marché européen ne doit pas faire oublier la tendance reflétée dans le tableau 4 concernant la baisse tendancielle des niveaux commercialisés (et donc exportés). Une étude plus fine des reports de flux commerciaux et d'attribution des certificats d'importation est certainement nécessaire pour évaluer le potentiel du sorgho en termes de débouchés. Le tableau 5 rappelle l'évolution des surfaces et des rendements du maïs grain, sorgho et tournesol en France, entre 2000 et 2005.

Tableau 5. Surfaces et rendement en maïs, sorgho et tournesol, France entière, 2000-2005

	2000	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**
Maïs grain : superficie (ha)	1 721 988	1 867 079	1 780 150	1 634 924	1 766 575	1 614 793
rendement (q/ha)	92	87	91	73	92	84
Sorgho : superficie (ha)	59 576	67 661	71 231	61 006	47 876	50 824
rendement (q/ha)	62	59	64	38	54	52
Tournesol : superficie (ha)	728 555	707 709	614 732	694 405	615 769	643 729
rendement (q/ha)	25	22	24	22	24	24

Source : la Statistique Agricole Annuelle, Agreste, 2006.

1.3.2.2. Les enjeux de la politique de l'eau

Lors de son intervention au Comité Sécheresse national réuni le 15 février 2006, Madame Nelly Ollin, Ministre de l'Ecologie et du Développement Durable, a clairement exposé que "*la gestion de la sécheresse ne saurait bien sûr se résumer à la gestion de crise*". Pour elle, "*il convient de mener une action structurelle pour rétablir durablement l'équilibre entre offre et demande en eau*". Dans cette optique, elle avait d'ailleurs présenté en Conseil des Ministres le 26 octobre 2005 un "plan de gestion de la rareté de l'eau" qui prévoit "*une affirmation renforcée de la priorité à l'eau potable*" et des expérimentations de "*nouveaux modes de gestion collective*" dans dix bassins versants pilotes ; ces dernières doivent permettre de réduire les déséquilibres entre offre et demande en eau en utilisant "*toute la panoplie des actions possibles : économies d'eau, mobilisation de ressources ou développement de nouvelles techniques*". Elle précise que "*dans le cas particulier de l'eau agricole, cette démarche peut déboucher à la fois sur des mesures de réduction des volumes d'eau affectés à l'irrigation, sur le renforcement de la gestion collective, ou sur la mise en place de retenue de substitution dès lors que cela est écologiquement faisable, et notamment sans perturbation de la réalimentation des nappes*". Elle ajoute qu'"*au-delà de ces mesures, nous devons également réfléchir à des modèles agricoles qui seront structurellement plus résistants aux aléas climatiques*".

Les récentes sécheresses surgissent donc aujourd'hui sur l'agenda politique comme un "imprévu", suscitant un regain d'intérêt pour la gestion quantitative de la ressource, peu ou prou "sanctuarisée" dans les années 90, avec l'abandon de la politique des grands aménagements hydrauliques et la mise en place d'actions locales concertées en zones de fortes contraintes de disponibilité de la ressource. L'attention des acteurs publics dans la période récente s'était en effet bien davantage focalisée sur les problèmes de protection de la qualité de la ressource et des milieux aquatiques ainsi que sur la lutte contre toute forme de pollution tant des rivières que des nappes souterraines. Le texte de la DCE illustre très bien cette préoccupation centrale, l'essentiel des mesures portant sur la protection de la qualité de la ressource.

Si l'on définit une politique par un ensemble de priorités, de moyens et d'acteurs en charge de l'atteinte de certains objectifs, force est de constater que la politique de l'eau a perdu beaucoup de visibilité depuis une dizaine d'années. La priorité implicite à la protection des milieux naturels par la DCE semble par exemple peu réaliste au vu des exigences de satisfaction des besoins en eau des populations. Le défaut d'attribution claire de priorités à l'agriculture irriguée alors qu'elle constitue une poste de consommation très important ne fait qu'ajouter à cette impression de confusion.

Par ailleurs, la politique de l'eau se situe nécessairement au carrefour de multiples politiques publiques : santé, environnement, aménagement du territoire, agriculture, industrie, énergie pour l'essentiel. Il est donc difficilement concevable de définir une politique de l'eau dénuée d'articulation organisée avec ces autres enjeux de politique publique. Cela n'a pas toujours été le cas et il importe en premier lieu de retracer les évolutions récentes de la politique de l'eau pour tenter d'en cerner les inflexions possibles dans un proche avenir.

1.3.2.2.1. L'évolution de la politique de l'eau

Les motivations des auteurs de la loi de 1964 répondaient pour l'essentiel à un double souci de reconquête de la qualité de l'eau et de création d'un cadre administratif cohérent et efficace pour l'action publique en matière de gestion de la ressource. On ne relève guère dans les attendus de la loi de préoccupation particulière pour la "sécurisation" de l'approvisionnement des usagers.

L'eau en France était alors considérée comme une ressource naturellement abondante qu'il convenait toutefois de gérer efficacement dans le sens de l'intérêt public et d'en ménager la qualité. L'irrigation, comme la consommation d'eau potable, était bien moins importante qu'aujourd'hui, et le risque de pénurie ne semblait pouvoir concerner que des zones très limitées du territoire français ou des épisodes de sécheresse localisée exceptionnels. Dans ce contexte, les missions assignées aux Agences de l'Eau vont surtout consister à, d'une part, asseoir leur légitimité d'organismes financiers de bassin vis-à-vis des acteurs publics et privés, et, d'autre part, œuvrer dans le sens d'une réduction des pollutions d'origine industrielle.

Le développement de l'irrigation, mais aussi les leçons de la sécheresse de 1976 vont pourtant amener les Agences à s'intéresser plus directement à la gestion quantitative de la ressource à partir du début des années 80. L'Agence de l'Eau Adour-Garonne lance à cette époque le PDRE *(Plan décennal pour la ressource en eau)* dans ce but. A partir du début des années 90, des étiages sévères assortis de mesures de restriction des irrigations en situation de crise vont relancer le débat sur l'avenir des politiques de création de ressources. Parallèlement, le développement de l'agriculture irriguée en Charente va faire apparaître des phénomènes de sur-exploitation localisée des ressources souterraines, menaçant la durabilité des approvisionnements en eau de cette région. C'est dans ce contexte que se mettent en place les termes du débat sur l'eau et l'irrigation en France, termes qui vont rester inchangés jusqu'à l'irruption des sécheresses du début du XXIe siècle. Tentons-en un résumé rapide.

Tout d'abord, sous l'impulsion des directives européennes (eaux résiduaires urbaines, nitrates), la collectivité nationale est engagée dans un effort considérable de reconquête de la qualité de l'eau. Si l'action passée des Agences de l'Eau a permis de substantielles améliorations de la situation en matière de pollutions industrielles, elle peine à réduire significativement les pollutions des agglomérations urbaines, faute de moyens financiers suffisants. Ces moyens seront fournis par un accroissement significatif des redevances, se traduisant par un doublement du prix de l'eau destinée à la consommation humaine entre 1992 et 1993. Cet effort sera assez bien accepté par les particuliers, un consensus s'étant établi dans la société en faveur d'eaux brutes de bonne qualité au bénéfice de la vie aquatique et des "hydrosystèmes". La loi sur l'eau de 1992 ne va faire qu'accentuer ce mouvement, en étendant les missions des Agences de l'Eau à la protection des milieux aquatiques et la conservation des zones humides, en mettant en place une planification par objectifs à l'échelle des grands bassins, les SDAGE, et en ouvrant la voie à la gestion concertée de la ressource à l'échelon local par le biais des SAGE ou des Contrats de Rivière.

Plus récemment, on a vu apparaître dans le contexte des SDAGE de nouveaux instruments de gestion, comme les zones de répartition des eaux (ZRE). Ces ZRE ont été étendues en 2003 ; elles concernent à peu près toutes les régions de forte irrigation, mais pas toutes les ressources de ces régions. L'ensemble de ces dispositifs est aujourd'hui repris au travers des SDAGE dans le processus de mise en application de la DCE, processus discuté plus loin.

Mais un acteur important apparaît comme singulièrement absent dans ce mouvement général alors même qu'il impacte sérieusement les milieux aquatiques, tant au plan de la qualité de la ressource que de sa disponibilité en période d'étiage, c'est le monde agricole. Le débat public commence à fustiger le comportement de l'agriculture en matière de pollutions (nitrates, pesticides, eutrophisation des eaux, algues vertes) des cours d'eau, des nappes et des littoraux comme de dégâts à la vie aquatique provoqués par une irrigation mal maîtrisée.

Il apparaît aussi que, bien qu'en principe assujettis aux redevances "prélèvement" ou "qualité des eaux" par la loi de 1964, la profession agricole ne contribue en fait pratiquement pas à l'effort financier consenti par les autres usagers pour l'amélioration de la qualité de l'eau et des milieux associés.

Pour apprécier l'importance de cet effort, rappelons que l'ensemble des collectivités publiques consacrent chaque année 4,58 milliards d'€ aux investissements et 15 milliards d'€ aux dépenses de fonctionnement des services d'eau. Ce sont les consommateurs d'eau potable qui supportent pour l'essentiel le coût de cette politique, d'une part de manière directe, en finançant le coût de fonctionnement du service, et, d'autre part, de manière indirecte au travers des redevances prélevées par les Agences de l'eau. Pour une facture moyenne de 300 €, montant correspondant à la consommation moyenne d'un ménage de l'ordre de 120 m^3/an, 48 € (15%) sont prélevés sous forme de redevance pollution par les Agences de l'Eau et 5 € (2%) au titre de la redevance prélèvement, pour un montant total de redevance de l'ordre de 53 €. Notons que les redevances dites "pollution", abondent 80% des ressources financières des six Agences de l'eau, dont le budget annuel global avoisine les 1,5 milliards d'€ (Tavernier, 2005).

Si les industriels sont parvenus à "neutraliser" l'effet des redevances, en obtenant des aides d'un montant équivalent aux sommes qu'ils acquittent pour leur rejets polluants, la profession agricole n'acquitte elle que 1% de la redevance pollution totale alors même qu'elle est responsable de 33% de

la pollution organique et de 75% de la pollution azotée. En dépit de cela, la profession agricole perçoit par ailleurs 15% des aides des agences, essentiellement dans le cadre du PMPOA *(Programme de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole)*, auquel il convient d'ajouter 15% du budget du FNDAE *(Fonds National de Développement des Adductions d'Eau)* , fonds destiné à l'origine au financement de l'adduction d'eau en zone rurale par prélèvement forfaitaire de 1% sur la facture d'eau des usagers urbains au titre de la solidarité ville-campagne.

Par ailleurs, l'agriculture rentre en surproduction chronique pour de nombreux produits à partir de la fin des années 80 et la nécessité de réformer la Politique Agricole Commune pour en réduire le poids financier sur les deniers publics est à l'ordre du jour des agendas politiques nationaux et européens. Assez paradoxalement, la mise en place de systèmes de primes par culture assises sur les surfaces va se traduire par une accélération de l'extension des superficies irriguées, bien qu'il ne faille pas non plus négliger l'effet des obligations contractuelles imposées par les transformateurs aux producteurs. L'irrigation des cultures, ou du moins la possession de l'équipement nécessaire, apparaît en effet fréquemment comme une clause imposée de ces contrats, l'objectif étant de sécuriser tant les volumes que la qualité des produits délivrés.

Par conséquent, au moment même où l'agriculture fait l'objet de critiques pour ses impacts négatifs sur la qualité de la ressource en eau et son refus d'en assumer les conséquences financières, l'accroissement de ses prélèvements pour l'irrigation va amplifier un effet d'amalgame dans l'opinion publique, prenant la forme d'une remise en question du modèle dit "productiviste" de l'agriculture française. C'est donc dans un contexte socio-politique tendu que la profession agricole aborde les sécheresses de la première décennie du siècle.

Au début des années 2000, la "durabilité", pour employer une expression à la mode, de l'agriculture irriguée en France apparaît donc peu assurée. D'une part, les pouvoirs publics se sont désengagés des politiques d'aménagement d'hydraulique agricole lourde et du financement des ASA, laissant les exploitants assumer quasiment seuls la maintenance des réseaux collectifs d'irrigation, tandis que la politique européenne entend substituer aux aides à la production des systèmes d'aides directes découplées des productions et par surcroît soumises à l'éco-conditionnalité, en matière de pollution de l'eau en particulier. D'autre part, l'opinion publique est de plus en plus réticente au développement de l'agriculture irriguée, accusée, à tort ou à raison, d'être un facteur de nuisances pour l'environnement et de répondre davantage à des préoccupations opportunistes d'accès aux concours publics qu'à une réelle nécessité économique.

C'est dans ce contexte qu'il nous faut à présent considérer l'impact de la DCE sur l'irrigation. L'atteinte du "bon état écologique" sur la plus grande partie des masses d'eau du territoire français va supposer, en particulier pour les eaux superficielles, le maintien de débits de transport et de dilution suffisants des pollutions à la mer. Il en résultera des contraintes de prélèvement plus importantes pour l'ensemble des usagers, particulièrement en période d'étiage, et ceci même en année climatique "normale", c'est-à-dire hors épisode particulier de sécheresse. A côté de ces objectifs essentiellement "qualitatifs", la politique européenne de l'eau s'est également fixée pour objectif l'amélioration des fonctionnalités écologiques des écosystèmes aquatiques (protection et développement des espèces piscicoles, et plus généralement de la vie aquatique), ce qui correspond à un investissement dans la durée pour protéger des écosystèmes souvent fortement perturbés par des pressions anthropiques de toutes sortes. La durabilité de tels investissements suppose par conséquent un renforcement des contraintes de prélèvement en été même en situation de pénurie d'eau, une évolution encore plus défavorable à l'agriculture irriguée. En effet, même si les prélèvements agricoles sont d'un ordre de grandeur comparable à celui des autres grandes catégories d'usage, ils sont naturellement très fortement concentrés en été.

On conçoit donc aisément que la combinaison des contraintes de débits pour la salubrité des cours d'eau imposées par les normes européennes jointes aux contraintes spécifiques en été résultant des impératifs de protection continue des écosystèmes aquatiques ne peuvent se traduire que par des impacts forts sur les possibilités d'irriguer les cultures, et cela même en année climatique "normale", l'irrigation étant presque sûrement sacrifiée en priorité en cas de sécheresse si les autorités publiques entendent respecter "à tout prix" les normes imposées par la Directive. Ceci amène à considérer plus précisément ses modalités et ses enjeux.

1.3.2.2.2. Le renforcement de la protection de la ressource en eau

L'évolution de la législation a pour but de renforcer la protection de la ressource en eau, à travers tant de la mise en œuvre de la Directive-Cadre sur l'Eau que du futur projet de loi sur l'eau.

• La Directive-Cadre sur l'Eau du 23 octobre 2000

La DCE 2000/60/CE du 23 octobre 2000, qui a pour objectif la reconquête de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques, a des implications en matière de gestion quantitative de l'eau de diverses façons :
- tout d'abord, parce qu'elle a explicitement pour finalité d'atténuer les sécheresses (article 1er – cf. Encadré 1.) ;
- parce qu'elle cherche à restaurer les zones humides souvent dégradées par des prélèvements en eau trop importants (article 1er) ;
- parce qu'elle introduit par ailleurs (article 9) un principe de récupération des coûts et des services liés à l'utilisation de l'eau et demande notamment à ce que "*la politique de tarification de l'eau incite les usagers à utiliser les ressources en eau de façon efficace*" et à ce que "*les différents secteurs économiques, décomposés en distinguant au moins le secteur industriel, le secteur des ménages et le secteur agricole, contribuent de manière appropriée à la récupération des coûts des services de l'eau*".

Encadré 1. Objet de la DCE 2000/60/CE du 23 octobre 2000 (article 1er)

"La présente directive a pour objet d'établir un cadre pour la protection des eaux intérieures de surface, des eaux de transition, des eaux côtières et des eaux souterraines, qui :
a) prévienne toute dégradation supplémentaire, préserve et améliore l'état des écosystèmes aquatiques ainsi que, en ce qui concerne leurs besoins en eau, des écosystèmes terrestres et des zones humides qui en dépendent directement ;
b) promeuve une utilisation durable de l'eau, fondée sur la protection à long terme des ressources en eau disponibles ;
c) vise à renforcer la protection de l'environnement aquatique ainsi qu'à l'améliorer, notamment par des mesures spécifiques conçues pour réduire progressivement les rejets, émissions et pertes de substances prioritaires, et l'arrêt ou la suppression progressive des rejets, émissions et pertes de substances dangereuses prioritaires ;
d) assure la réduction progressive de la pollution des eaux souterraines et prévienne l'aggravation de leur pollution, et
e) contribue à atténuer les effets des inondations et des sécheresses,

et contribue ainsi :
– à assurer un approvisionnement suffisant en eau de surface et en eau souterraine de bonne qualité pour les besoins d'une utilisation durable, équilibrée et équitable de l'eau ;
– à réduire sensiblement la pollution des eaux souterraines ;
– à protéger les eaux territoriales et marines ;
– à réaliser les objectifs des accords internationaux pertinents, y compris ceux qui visent à prévenir et éliminer la pollution de l'environnement marin par une action communautaire au titre de l'article 16, paragraphe 3, à arrêter ou supprimer progressivement les rejets, émissions et pertes de substances dangereuses prioritaires présentant un risque inacceptable pour ou via l'environnement aquatique, dans le but ultime d'obtenir, dans l'environnement marin, des concentrations qui soient proches des niveaux de fond pour les substances présentes naturellement et proches de zéro pour les substances synthétiques produites par l'homme."

La Directive "fille" de la DCE portant sur les eaux souterraines oblige au maintien du niveau de ces nappes sur le long terme. Il s'agit d'assurer sur le moyen terme un équilibre entre (i) l'ensemble des prélèvements liés aux différents usages, (ii) les pertes à l'exutoire de ces nappes pouvant alimenter éventuellement des rivières (cas de la Conie pour la nappe de Beauce), et (iii) les apports par le drainage des eaux de surface. Ainsi, selon le caractère plus ou moins fermé de ces nappes, on est

amené à promouvoir une gestion de type **réservoir** en tolérant un certain battement du niveau de la nappe, compte tenu de la variabilité interannuelle du climat (pluies hivernales) et du temps de résidence de l'eau entre le sol et la nappe qui détermine l'inertie du système. A ce titre, la gestion de ces types de nappe souffre d'une connaissance imparfaite de leur fonctionnement hydrologique (temps de transit de l'eau, écoulements latéraux et connexion avec d'autres aquifères), qui ne permet pas toujours de prévoir correctement les fluctuations des niveaux piézométriques. Il existe, en particulier, un défaut de continuité entre les études d'hydrologie de surface et les études d'hydrogéologie, qui ne permet pas de faire correctement la liaison entre les effets des modes d'occupation des sols à l'échelle d'un impluvium de nappe et les comportements de celle-ci, faute d'information sur les transferts dans la zone insaturée.

- **Le futur projet de loi sur l'eau**

Sans préjuger de ce que sera la future loi sur l'eau en discussion au Parlement, des redevances modulables devraient être mises en place pour les irrigants avec un taux variable selon l'état de la ressource en eau. Par ailleurs, afin de mieux coordonner la gestion des volumes d'eau destinés à l'irrigation, l'organisation collective des irrigants devrait être favorisée.

- **La montée d'un principe de participation du public**

Le principe de concertation déjà bien ancré dans l'action publique concernant le domaine de l'eau s'élargit à un principe de participation du public : la Directive-Cadre sur l'Eau introduit ainsi un principe d'information et de consultation du public (article 14), qui demande aux Etats membres d'encourager "*la participation active de toutes les parties concernées à la mise en oeuvre de la présente directive, notamment à la production, à la révision et à la mise à jour des plans de gestion de district hydrographique*". La planification ne doit donc plus être seulement une activité réservée à des acteurs spécialisés, même s'ils émanent de différents secteurs de la société comme cela est le cas pour les SDAGE et les SAGE, mais doit impliquer le public. Il convient de noter que ce principe de participation du public n'est pas propre au domaine de l'eau, mais qu'il se développe actuellement largement au niveau communautaire (Convention d'Aarhus signée en 1998) comme au niveau national (loi "démocratie de proximité" du 27 février 2002). Cette dernière loi, qui renforce la loi Barnier de 1995, élargit notamment le champ des projets d'infrastructure pouvant être soumis à un débat public sur l'opportunité des ouvrages envisagés, et concerne les projets d'aménagements hydrauliques. Le projet de réservoir de Charlas (Haute-Garonne) a fait l'objet d'un tel débat public à l'automne 2003.

1.3.2.2.2. Acte II de la décentralisation et nouvelle loi sur l'eau : une ou des politiques de l'eau en France ?

La politique de l'eau telle que définie par la loi sur l'eau de 1992 a largement contribué à une mutation profonde dans l'appréhension des questionnements. Les problématiques se sont décloisonnées pour s'ouvrir, se confronter, s'intégrer au territoire pris dans sa globalité. Via l'approche territoriale, ou spatiale (Narcy, 2000) de la gestion, la politique de l'eau est progressivement amenée à prendre en considération non seulement la gestion des flux mais également les espaces et les activités (tourisme, agriculture, urbanisation…) sur lesquels ces flux agissent. La conséquence de cette tentative de passage d'une politique "passive" ou curative à une politique "active" est la rencontre et la mise en relation des acteurs de l'eau avec ceux du développement local qui relèvent d'autres logiques, d'autres procédures et d'autres territoires. Soumise à l'appropriation par les enjeux qu'elle représente, susceptible de concurrencer les périmètres traditionnels de développement, la gestion de l'eau par bassin versant montre, cependant, une grande difficulté d'insertion et d'articulation avec ces différentes politiques relevant du territoire, mais également, une profonde originalité et diversité dans les formes et les constructions collectives rencontrées. Dans un contexte très certainement marqué par l'augmentation des contraintes pour l'accès à l'eau (DCE, nouvelle loi sur l'eau), cette nouvelle étape de confrontation entre la politique de l'eau et les autres politiques publiques (aménagement et développement notamment) interroge la nature de leurs relations. La politique de l'eau arrivera-t-elle à affirmer son caractère global et intégré ou ne sera-t-elle qu'une juxtaposition ou déclinaison de

politiques sectorielles ? Même s'il est encore trop tôt pour tirer des conclusions face à des processus en cours, des pistes peuvent être dégagées et des éléments d'interprétation avancés à la lecture de plusieurs rapports et analyses sur la question (citons entre autres les rapports Launay, 2003 et Flory, 2003 ; Commissariat général du Plan, 2001).

Une fois n'est pas coutume, les récents débats sur la poursuite de la décentralisation conjugués à la réforme de la politique de l'eau ont donné un nouvel élan aux relations entre l'Etat, les différents usages et usagers et les collectivités. Ces dernières ont ainsi élaboré un certain nombre de projets[3] et émis des demandes de transfert dans le cadre d'une nouvelle répartition des compétences entre les différents niveaux et de l'expérimentation.

Les rapports entre le pouvoir central et le local, mais aussi entre le local et… le local

Alors que l'on parle beaucoup de décentralisation et de gestion participative, l'analyse de la loi de transposition de la DCE et des projets de loi sur l'eau laisse apparaître de profondes modifications dans le rôle des Agences de l'eau, au point qu'elles apparaissent de plus en plus comme un nouveau service déconcentré. Ces dernières semblent devenir de plus en plus des financeurs (à euros constants) de la politique de l'eau de l'Etat. De même, le projet qui consiste à donner le droit de vote aux fonctionnaires pour l'élection du président du comité de bassin dans le cadre de la nouvelle loi, attise les oppositions à une "centralisation rampante". Autre exemple, le rapport Launay reconnaît et valide aussi la pertinence du transfert (compétence et financement) de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement au titre de la solidarité (financière et territoriale) vers le département (Conseil Général). Mais ses propositions vont bien au-delà pour s'insérer plus fortement dans la lutte contre les inondations mais surtout dans la gestion de la ressource, véritable chasse gardée des Agences de Bassin. Il réclame ainsi, pour ce faire, que soit reconnues pour les Etablissements Publics Territoriaux de Bassin (EPTB) (Marc, 2005) des compétences (inondation et zones humides) en matière de mise en œuvre des actions à l'échelle des bassins versants[4]. En demandant la création d'un EPTB par commission géographique de bassin, les EPTB et les collectivités territoriales qui les portent se veulent des concurrents directs des Agences.

Pour la Région Bretagne mais aussi l'Alsace, les propositions visent à créer un Schéma Régional d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SRAGE) qui se placerait entre le SDAGE et le SAGE. La question de la valeur juridique du SRAGE reste à établir, de même que les relations entre ce dernier et les SAGE. Le Conseil Régional exercerait ainsi les fonctions de guichet unique, de planificateur (SRAGE) et de centralisateur des données. Bien sûr, il est réaffirmé "la prééminence du bipôle Région-Agence de l'eau" afin notamment de pouvoir bénéficier des compétences et des moyens humains de l'Agence. Cette volonté de regrouper à l'échelle régionale, compétence et informations, au nom de l'efficacité, conduit aussi les promoteurs du projet à envisager le rattachement de la délégation régionale de l'ADEME à la Région. Voulant par ces propositions lutter contre une "recentralisation rampante", les auteurs du manifeste proposent une recentralisation… mais à l'échelle régionale dont la mise en œuvre poserait de gros problèmes au vu des objectifs fixés de la Directive Cadre Européenne dans la mesure ou l'Etat est le seul responsable.

Expertise et articulation entre le sectoriel et le spatial

Cette dernière remarque pose une autre question essentielle, celle de la maîtrise de l'expertise, et montre que les débats ne sont pas tranchés en la matière. L'approche territoriale appliquée au domaine des politiques de gestion de l'eau complexifie énormément leur mise en œuvre et exige pour les collectivités responsables des moyens, des compétences et des savoir-faire d'un haut niveau (juridique, technique, administratif, financier, management, "monitoring", "engineering"…). Qui est à même d'exercer ces compétences ? Un nouveau Corps d'ingénieurs de l'environnement ? Les orientations prises dans le cadre de la décentralisation semblent ne pas aller dans cette direction et la réorganisation des services déconcentrés de l'Etat à l'échelle régionale ne semble pas non plus en mesure de

[3] Citons notamment *le manifeste de la décentralisation en Bretagne* qui propose d'expérimenter la conduite de la politique de l'eau.

[4] Les EPTB sont nés à l'initiative de, et sont dirigés le plus souvent par, un ou plusieurs Conseils Généraux voire Régionaux. Ils sont le "bras armé" des élus locaux pour aménager et gérer les grands cours d'eau.

l'infléchir. Pour le contrôle et l'exercice de l'expertise, une autre architecture semble se mettre en place. A l'opposition public/public ("agronomes" / "Ponts et Chaussées") de la période précédente se substitue un "partenariat" associant public / privé / réseaux d'associations et ONG spécialisées[5], comme le laisse à penser l'exemple de la gestion des réserves naturelles en France (Petit, 2002) ou le cas de la réforme de la politique de l'eau au Liban (Ghiotti, 2003).

Malgré tout, les questions de l'expertise et de la coordination territoriale restent ouvertes, dans le sens où demeurent très clairement posés deux problèmes : celui des rapports de forces entre ces catégories, d'évidence inégaux, et celui du contrôle démocratique de ces politiques territoriales, avec une expertise qui peut être complètement a-territoriale, et basée sur des intérêts économiques, financiers ou catégoriels. Cette recomposition des enjeux autour de l'accès et du partage des ressources ainsi que des risques au sein d'un territoire élargi laisse une place importante aux filières, qu'elles relèvent de la gestion de l'eau ou de gestions de l'espace. A l'intérieur de ces filières et entre elles s'élaborent de nouvelles stratégies de "domination" ou de "partage" et les tendances dirigistes, sectorielles et unifonctionnelles réinvestissent le champ territorial au sein même d'institutions pourtant porte étendard de la modernité et de la concertation comme les Conseils Régionaux. En Languedoc-Roussillon par exemple, après une décennie de mise en œuvre, certes difficile, des principes de la gestion intégrée d'un patrimoine commun, des digues sont réalisées pour lutter contre les inondations, des grands tuyaux sont prévus pour l'alimentation en eau potable et des projets de barrage "fleurissent" pour lutter contre la sécheresse.

Public, privé ou…

Les modalités de financement et le recouvrement des coûts de ces équipements amènent à repenser la question du développement et de l'aménagement du territoire dans ce contexte de décentralisation et de partenariat public/privé. En plus des conséquences directes sur l'eau potable et les milieux aquatiques (températures élevées conjuguées aux assecs), l'ensemble des activités économiques a été touché. La sécheresse a eu des conséquences économiques lourdes notamment pour des secteurs d'activités les plus exposés comme l'agriculture (vergers, foins, irrigation…). 399 millions d'euros ont été consacrés à l'indemnisation des départements les plus touchés, pris sur le fonds national de garantie des calamités agricoles. La question des modes de productions agricoles ainsi que celle relative à la localisation géographique des cultures (de l'échelle du cours d'eau à l'échelle nationale) se doivent d'être (à nouveau ?) posées. Le secteur industriel, la production d'électricité ainsi que la navigation ont également été perturbés nécessitant aides, report de cotisations, indemnisations afin de limiter les pertes économiques et financières liées aux perturbations de l'activité. Dans le domaine des transports comme dans celui de l'énergie, cette situation interroge les options et les priorités politiques effectuées ces dernières années tant au niveau des options (rail, route, ferroutage, canaux, transport collectif ; éolien, solaire, nucléaire…) que dans les modes de gestion (public, privé, concession…). A l'heure de la territorialisation de l'action publique et notamment celle liée à l'eau et à l'environnement, la question de l'organisation du territoire et de sa finalité mérite d'être posée (Brun, Ghiotti, 2005)[6].

Les liens tissés entre eau et développement montrent que, en devenant territoires politiques, les territoires de l'eau se trouvent être rattrapés par une logique qu'ils devaient dépasser pour constituer une forme hybride au carrefour des influences politiques, administratives, socio-économiques et environnementales. Le territoire "problème" devient le territoire porteur de stratégies et de "potentialités". Mais "les potentialités" et les ressources ne sont pas les mêmes selon les collectivités, et les transferts de compétences prévus pourraient aggraver les disparités et les inégalités territoriales et ce malgré les systèmes de péréquation envisagés. Dans le même temps, d'autres collectivités demandent au titre de l'expérimentation, le transfert de la politique de l'eau ce qui suppose qu'elles possèdent les moyens suffisants et adéquats pour sa mise en œuvre. La territorialisation, en voulant s'adapter aux spécificités locales, ne constitue-t-elle pas une dilution voire une négation de l'action publique et de l'intérêt général ? L'Etat garant de ce même intérêt veut dans le contexte actuel se concentrer sur ses métiers et ses missions dits "de base". L'intégration et la solidarité territoriale ne sont-elles pas justement au centre de ses missions ?

[5] Ces différentes catégories ne sont bien évidemment pas à considérer comme des entités homogènes.
[6] Voir Ghiotti et Brun. (2005).

Une politique de l'eau forte semble ainsi nécessaire. L'augmentation des contraintes et les coûts financiers liés à la mise en œuvre de la DCE (selon le Ministère de l'Environnement, les surcoûts de gestion de l'eau seront de l'ordre de 15%) invitent les usagers à définir des stratégies "d'évitement" ou des "amortissements". Les industriels (déjà contraints par la directive ERU) avec la pollution chimique, les représentants de l'énergie (demande de micro-centrale et "discussions" sur les débits réservés), les agriculteurs (pollutions diffuses et sécheresse) cherchent à faire pression sur le contenu de la future loi. Alors une ou des politique(s) de l'eau en France ? Restera-t-elle ? La loi dans sa forme initiale ou sera-t-elle, progressivement, vidée de son contenu ? Si les débats et l'organisation générale de la prochaine loi sur l'eau donneront très certainement les contours d'une première réponse, cette dernière ne pourra intervenir, avec plus de précision, qu'à plus long terme, avec l'horizon 2015.

Références bibliographiques

Agreste (2006). La statistique agricole annuelle. Ministère de l'Agriculture et la Pêche.

Arvalis-Institut du Végétal (2005), « Sorgho : Une culture pleine d'atouts dans le cadre de la nouvelle PAC », Dossier Cultures.

Barthélémy L. (2005), Chute du revenu agricole : l'agriculture prise dans la nasse. Rapport FNSEA - Service Economie générale.

Buisson G. (2005), « Les effets de la réforme de la PAC de juin 2003 sur la consommation par l'agriculture ». Document de travail série Etudes, N° 05 E 06, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

Barkaoui A., Butault J. (2004), « Impacts sur l'offre des régions françaises des différentes options de la réforme de la PAC de 2003 », *INRA Sciences Sociales* 4-5/03(février).

Butault J., Delame N. (2004), « Réforme de la PAC de 2003, découplage des structures et des systèmes de production agricole en France », INRA INA-PG Grignon.

Commissariat général du Plan (2001), *La politique de préservation de la ressource en eau destinée à la consommation humaine*, Rapport d'évaluation, Villet-Desmeserets F., (rapporteur général), Paris : Editions de la Documentation Française, 402 p.

Flory J.C. (2003), Les redevances des agences de l'eau. Enjeux, objectifs et propositions d'évolution dans la perspective de la réforme de la politique de l'eau, rapport au Premier Ministre et à la Ministre de l'Ecologie et du Développement Durable, 180 p. (octobre)

Ghiotti S. (2004). *Les territoires de l'eau et la décentralisation. La gouvernance de bassin versant ou les limites d'une évidence*. Journée d'études : les territoires de l'eau, Université d'Artois, Arras.

Ghiotti S., Brun A. (2005), « Changement climatique et politiques territoriales », in *Eau pour tous : l'état d'urgence*, *Pour*, n°185, pp. 74-81.

Gohin A., Moschini G. (2004). Evaluating the Market and Welfare Impacts of Agricultural Policy in Developed Countries. Comparison of Partial and General Equilibrium Measures. Paper presented at the International Conference on Policy Modeling (Ecomod 2004), 19 p., à paraître dans : *Review of Agricultural Economics*.

Launay J. (2003), *La gestion de l'eau sur le territoire*, Assemblée Nationale, Délégation à l'aménagement et au développement durable du territoire, rapport d'information n° 1170, 93 p. (novembre)

Lefevre F. (2003), « Prospective : combien d'agriculteurs à l'horizon 2015 », *Demeter 2003*, 141-162.

Marc P. (2005), *Les cours d'eau et le droit*, Université de Toulouse 1, Thèse pour le Doctorat en Droit, 419 p.

Narcy J.B. (2003), « La politique de l'eau face à la gestion des espaces : les Agences de l'eau aux limites de la modernité », in *Ambiances et espaces sonores*, *Espaces et sociétés*, n°115, pp. 179-196.

OCDE (2004), Analyse de la réforme de la PAC. Coordinateur : Catherine Moreddu.

Petit D. (2002), « De l'espace protégé au territoire du développement, du réglementaire au contractuel. Expériences d'une réserve naturelle en Pyrénées-Orientales », in *Les arrière-pays aveyronnais et lozérien. L'innovation dans les IAA Européennes*, *Revue de l'Economie Méridionale*, 4 - vol. 50, n° 200, pp. 385-406.

Tavernier Y, Bonrepaux A., Delalande J.P. et Migaud D. (2001), *Le financement et la gestion de l'eau,* Rapport d'information à l'Assemblée Nationale, n°3081, enregistré le 22 mai 2001, Commission des Finances, de l'Economie Générale et du Plan.

2. Adaptations de l'agriculture au risque de sécheresse

2.1. Amélioration génétique de la tolérance des cultures à la sécheresse

François Tardieu (INRA, Montpellier), Michel Zivy (CNRS, Gif-sur-Yvette)

Une des voies possibles pour économiser l'eau d'irrigation consiste à utiliser des génotypes qui tolèrent mieux des périodes de manque d'eau et nécessitent ainsi moins d'irrigation, ou qui valorisent mieux l'eau en produisant plus de biomasse par unité d'eau apportée. La presse rapporte depuis une dizaine d'années des expériences de transferts de gène qui montrent qu'il est possible d'améliorer le comportement de plantes soumises au déficit hydrique (Xu et al., 1996 ; Garg et al., 2002). Cependant, ces expériences sont le plus souvent réalisées dans des conditions éloignées de celles subies par les plantes en champ et elles n'ont débouché sur aucune variété commerciale jusqu'à présent. Inversement, des travaux moins médiatisés ont permis l'obtention de génotypes tolérants qui sont actuellement utilisés par des agriculteurs (Ribaut et al., 2002 et Bruce et al., 2002 pour le maïs ; Condon et al., 2004 pour le blé). Il importe donc de faire le point sur les progrès déjà réalisés et sur les voies possibles d'améliorations.

2.1.1. Le progrès génétique déjà obtenu

Quel progrès génétique a déjà été obtenu ? Existe-t-il actuellement des génotypes tolérants à la sécheresse ?

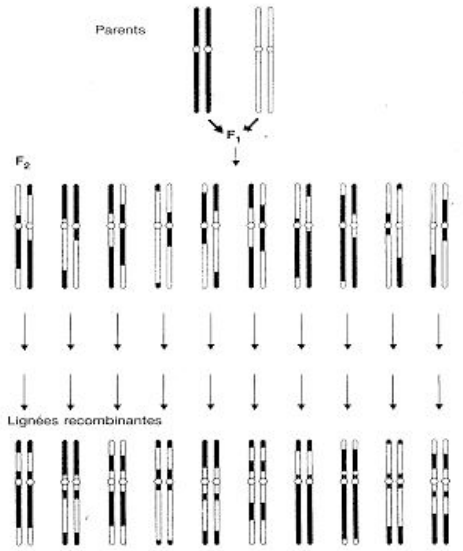
2.1.1.1. Stratégies génétiques utilisées : sélection classique, sélection assistée par marqueurs, transgenèse

La stratégie la plus courante est **la sélection classique**, qui consiste à effectuer des croisements puis à sélectionner des génotypes favorables parmi les milliers de descendants au cours des générations suivantes. Le seul critère utilisé est l'évaluation phénotypique (phénotype : caractère observable ou mesurable de la plante dans un environnement donné), guidée par des méthodes qui varient selon l'espèce et l'héritabilité du caractère sélectionné. Ce travail est le plus souvent effectué sans déficit hydrique contrôlé. Le comportement en déficit hydrique est alors un "sous-produit" des qualités intrinsèques des génotypes sélectionnés, indépendamment des conditions environnementales subies par la plante. L'essentiel des génotypes actuellement cultivés ont été obtenus par cette méthode.

La sélection assistée par marqueurs s'appuie aussi sur la variabilité naturelle existant dans l'espèce à améliorer mais permet une plus grande efficacité en ajoutant une évaluation génétique à l'évaluation phénotypique des plantes (génotype : patrimoine héréditaire d'un individu). Il s'agit d'identifier puis d'utiliser des variantes de gènes (les allèles) associées à des caractères liés à la tolérance au déficit hydrique. La méthode la plus courante pour les identifier consiste à analyser de 100 à 300 descendants de deux parents ayant des comportements contrastés. Chaque descendant possède un génome formé d'une combinaison de fragments des génomes des deux parents. Des marqueurs moléculaires identifient l'origine parentale de chacun des fragments chez chaque descendant (Figure 1.a). Une analyse statistique permet ensuite de mettre en évidence certaines positions (locus) sur les chromosomes où il existe une relation entre l'allèle présent et la valeur du caractère mesuré (par exemple le rendement). A ces locus, appelés QTL (Quantitative Trait Locus), il existe donc soit un allèle favorable soit un allèle défavorable au caractère étudié. La détection des QTL est relativement imprécise et l'intervalle de confiance de leur position couvre en général quelques centaines de gènes. On ne peut donc pas identifier directement le ou les gène(s) impliqué(s) dans la variation du caractère. Il est en revanche possible d'introgresser par des croisements successifs (rétrocroisements ou back-cross, Figure 1.b) les QTL d'intérêt dans le génome d'une lignée élite, et d'obtenir ainsi des génotypes améliorés. Cette stratégie est longue et coûteuse, mais elle a fourni des résultats incontestables (Ribaut et al., 2002 ; Bruce et al., 2002 ; Condon et al., 2004).

Une autre méthode d'identification de QTL (génétique d'association, Thornsberry et al., 2001) consiste à rechercher des corrélations entre des marqueurs moléculaires et le caractère d'intérêt dans une large collection de génotypes représentant au mieux la diversité existant dans l'espèce, plutôt que dans une population à base génétique étroite issue du croisement entre deux parents. Cette méthode se développe rapidement mais n'a pas encore fait ses preuves pour un caractère complexe comme la tolérance au déficit hydrique.

La transgenèse (Figure 1.c) consiste à transférer vers un génotype cible (ici, une plante d'intérêt agronomique) un gène dont la fonction ou les données d'expression (cf. section 1.1.2.) font supposer qu'il est favorable. L'origine biologique des gènes utilisés est très diverse, plantes du désert adaptées à la sécheresse, bactéries, champignons... Il s'agit d'une méthode nettement plus rapide que la précédente, mais qui se limite à un seul gène à la fois, à la différence des méthodes de sélection où des combinaisons de gènes d'intérêt peuvent être transférées conjointement.



a. Génétique quantitative et identification de QTLs

Deux parents (tolérant « noir » et sensible « blanc ») sont croisés. Leurs descendants (2eme génération) ont un génome combinant des zones blanches et noires. Si les lignées sont autofécondées, on peut obtenir des lignées homozygotes (dont chaque gène est noir ou blanc sur les deux brins d'ADN) qui peuvent être reproduites à l'infini. Une analyse statistique permet d'associer un caractère mesuré (rendement, transpiration etc) au fait d'être noir ou blanc sur chaque zone du génome. Ces zones (QTLs) contiennent un gène qui diffère entre les deux parents et qui contrôle le caractère mesuré. Les zones ainsi déterminées font en général plusieurs centaines de gènes. On ne peut donc pas identifier le gène considéré à partir de ces études uniquement. En revanche, il est certain que le caractère considéré est affecté par la couleur d'un ou plusieurs gènes de la zone QTL.

b. Transfert d'une région du génome par rétrocroisement (« backcross »)

Si un QTL a été détecté, on peut transférer sa forme favorable (noire) dans le parent blanc (ou dans toute autre lignée) par rétro-croisement (back-cross) : on fait d'abord le même croisement qu'en A, puis, à chaque génération on recroise la descendance par le parent blanc. A chaque génération on fait une sélection avec des marqueurs moléculaires pour ne garder que les individus « noirs » dans la région du QTL. A la fin du processus, on a obtenu l'équivalent du parent blanc sauf pour une partie du génome qui contient la forme favorable noire du QTL.

c. Transfert d'un gène par transgénèse

Les parents noirs et blanc ne sont maintenant plus nécessairement de la même espèce, ni du même règne (animal, végétal, bactéries, champignons...). Si on pense qu'un gène du parent noir peut avoir un effet bénéfique sur le parent blanc, on le transfére en utilisant des méthodes de biologie moléculaire. Des équivalents de ce gène peuvent exister ou pas dans le parent blanc. Le gène noir est inséré dans une région quelconque (imprévisible) du génome blanc. Le gène transféré est connu, par contre l'effet sur le phénotype du parent blanc est espéré mais inconnu.

Fig. 1 Stratégies d'identification de zone d'intérêt dans le génome (1, QTLs), de transfert de régions du génome par rétrocroisement (b) et de transfert de gène par transgénèse (c).

Ces stratégies sont différentes dans leur conception. La transgenèse teste sur un matériel agronomique un gène connu dont l'effet est *a priori* inconnu. La sélection identifie dans ce matériel une zone du génome qui a un effet avéré, sans que le gène responsable soit connu, au moins dans un premier temps : la seule connaissance qu'on en a est sa localisation plus ou moins précise sur la carte génétique. En réalité, ces stratégies sont le plus souvent imbriquées. Les parents contrastés qui servent de base à la sélection assistée par marqueurs sont en général issus d'une sélection classique. La transgenèse est irremplaçable pour connaître l'effet d'un gène ou d'un fragment de gène sur le comportement des plantes, mais ses retombées pour la sélection peuvent rester du domaine des transferts d'allèles par sélection assistée par marqueurs. Inversement, des analyses de QTL peuvent aboutir à la proposition de gènes candidats qui sont ensuite testés par transgenèse.

2.1.1.2. La sélection classique

Des gains appréciables, mais mal évalués, ont été obtenus par la sélection classique.

a. Les génotypes récents ont généralement une meilleure production en conditions de sécheresse que les génotypes anciens.

Trente-six hybrides de maïs de climat tempéré commercialisés entre 1934 et 1991 ont été comparés dans quatre conditions de culture. Le rendement en conditions de sécheresse modérée a augmenté de 53 kg/ha/an avec l'introduction de nouveaux génotypes, contre 84 kg/ha/an en situation irriguée (Duvick, 1999). Avec le même objectif, des essais multilocaux ont été réalisés sur des hybrides de Pionneer obtenus de 1953 à 2001 (Campos et al., 2004). Le gain a été de 189 kg/ha/an pour le maïs irrigué et de 146 kg/ha/an en pour les maïs soumis à un déficit hydrique en période de floraison (celle-ci est ainsi devenue une période moins "critique" que pour les génotypes anciens ; Bruce et al., 2002). Les méthodes traditionnelles de sélection mises en œuvre depuis 50 ans ont donc apporté un progrès non seulement en conditions d'irrigation normale, mais aussi en conditions de déficit hydrique. Au moins dans les cas mentionnés, l'augmentation générale du rendement ne s'est pas faite au détriment de la tolérance au déficit hydrique.

b. Des sélections appliquées au déficit hydrique ont été menées avec des résultats intéressants.

Au CIMMYT (centre international d'amélioration du maïs et du blé, Mexique), une sélection récurrente a été entreprise à partir de populations élites locales à partir de 1975. Elle a été menée sur le rendement, mais aussi sur des caractères considérés comme conférant une bonne tolérance au déficit hydrique. Des gains moyens de 126 kg/ha/cycle de sélection ont été obtenus (Edmeades et al., 1999 ; Bruce et al., 2002).

Les ressources génétiques naturelles sont encore peu utilisées en sélection. On estime que seulement 5% de la ressource génétique disponible est utilisée dans les hybrides commerciaux de maïs (Hoisington et al., 1999). La sélection peut pourtant s'appuyer sur une source importante de variabilité génétique dans les populations locales et les espèces apparentées. Cette ressource est déjà assez largement utilisée dans les programmes de sélection du blé. Ainsi, des blés synthétiques (n'existant pas dans la nature) ont été obtenus par croisement du blé dur *Triticum durum* avec une espèce diploïde ancestrale ayant des caractères de rusticité. A l'heure actuelle, environ 15% des croisements dans les programmes d'amélioration du CIMMYT font intervenir des blés synthétiques (Reynolds, Rajaram et Sayre, 1999). Des caractères d'intérêt peuvent également être recherchés dans des espèces proches comme, pour le maïs, la Téosinte (espèce sauvage dont dérive le maïs cultivé) ou des espèces du genre *Tripsacum*, ou pour le tournesol des espèces proches comme *Helianthus niveus* ou *H. argophyllus*.

c. Bien que le progrès génétique du comportement des plantes à la sécheresse n'ait pas toujours été conscient, les méthodes "traditionnelles" (sans apport des biotechnologies) ont donc permis une amélioration constante, d'un ordre de grandeur d'environ 1% par an. Cette amélioration peut encore s'appuyer sur un réservoir de variabilité naturelle assez peu utilisée. On peut donc espérer que ce

progrès continue dans les années à venir, même s'il est probable que les caractères les plus faciles à améliorer (en particulier le Harvest Index, proportion de biomasse allouée aux organes récoltés) aient déjà été largement exploités. Tant les instituts de recherche que les compagnies privées se dirigent donc vers d'autres stratégies d'amélioration génétique, en particulier en accompagnant la sélection classique de suivis génétiques.

2.1.1.3. La sélection ciblée

De premières variétés tolérantes ont été obtenues par sélection ciblée.

Toutes les informations ne sont pas disponibles sur les lignées commercialisées récemment par le secteur privé, en particulier sur les méthodes biotechnologiques utilisées pour améliorer la tolérance au déficit hydrique. A notre connaissance, peu de "success stories" allant de la détection de QTL jusqu'à la production de semences utilisées par les agriculteurs ont été décrites dans le secteur public.

Des variétés de blé ayant une efficience de l'eau améliorée ont été obtenues en Australie par le CSIRO (Rebetzke et al., 2002 ; Condon et al., 2004). La méthode utilisée est décrite plus loin. Des gains de production d'environ 10% ont été observés en conditions très sèches australiennes (précipitations d'environ 250 mm par an). L'intérêt comparatif des génotypes ainsi obtenus décroît avec les précipitations, pour quasiment s'annuler à des précipitations de 400 mm par an, qui correspondent aux conditions sèches françaises. Il est à noter qu'une variété commerciale (Drysdale) a été lancée à partir de ces travaux.

Des variétés de maïs tolérant ont été obtenues par le CIMMYT pour les régions tropicales.
Des études de QTL de rendement du maïs en conditions de sécheresse ont été effectuées par Ribaut et al. (1996, 1997). La sécheresse provoque un retard de la floraison femelle chez le maïs, entraînant une augmentation de l'intervalle entre la floraison mâle et femelle (ASI : anthesis-silking interval). Ribaut et al. (1997) ont détecté des QTL d'ASI, et montré que beaucoup d'entre eux étaient co-localisés avec des QTL de rendement. Les allèles favorables de cinq QTL ont ensuite été introgressés dans un génotype ayant de bonnes qualités agronomiques en conditions d'irrigation normale, mais sensible à la sécheresse. En conditions de déficit hydrique, la moyenne du rendement des génotypes sélectionnés a été supérieure à celle du parent receveur, et les meilleurs d'entre eux avaient un rendement de 2 à 4 fois supérieur à celui du receveur (Ribaut et al., 2002). Ces génotypes sont actuellement utilisés en Afrique et au Mexique. Il est à noter qu'ils ne sont actuellement pas utilisables en France, mais un travail est en cours dans le cadre de Génoplante pour transférer des allèles d'intérêt dans du matériel européen.

Les recherches de génétique utilisant des outils biotechnologiques ont donc pour l'instant fourni des exemples avérés de succès, mais en nombre relativement limité lié à l'intérêt récent (à l'échelle de temps de la sélection variétale) du secteur privé pour une sélection dirigée vers la sécheresse. La sélection assistée par marqueurs, comme la sélection "classique", est limitée à la variabilité disponible dans l'espèce, qui reste pour l'instant peu exploitée.

2.1.1.4. Les transferts de gènes

Les transferts de gènes ont fourni des résultats spectaculaires en ce qui concerne la survie des plantes au déficit hydrique, sans débouché agronomique jusqu'à présent.

Il convient de noter tout d'abord qu'aucun génotype transgénique tolérant à la sécheresse n'a été commercialisé jusqu'à présent, bien que des annonces sont opérées périodiquement dans des congrès (par exemple, Heard et al., 2005, pour Monsanto au congrès Interdrought de Rome en septembre 2005). La transgenèse n'est donc pour l'instant qu'une voie expérimentale surtout destinée à analyser les fonctions de gènes même si ces recherches, publiques ou privées, sont ensuite souvent médiatisées

a posteriori comme devant fournir rapidement des plantes résistantes à la sécheresse. Il a été précisé dans la section 1.1.2. que la production de biomasse est indissociable de la transpiration à cause des échanges "eau contre carbone" et "eau contre chaleur". Il a également été vu que la survie est rarement un mécanisme pertinent au champ dans des conditions agricoles. Or les mécanismes permettant un maintien de la croissance ne se recouvrent que partiellement avec ceux qui se mettent en place en conditions de survie (Tardieu, 2003 ; Sinclair et al., 2004 ; Hammer et al., 2005). Malheureusement, ceci n'est pas pris en compte dans l'essentiel des recherches portant sur la fonction de gènes individuels, même si des travaux impliquant d'autres mécanismes se développent d'une façon plus minoritaire (par exemple dans les projets Génoplante sur la sécheresse).

a. Certaines constructions améliorent les mécanismes de protection cellulaire contre le stress.

Plusieurs constructions ont pour but d'améliorer les réponses au stress oxydant (cf. section 1.1.2.). En particulier, l'enzyme superoxide dismutase (MnSOD) a été surexprimée dans différentes espèces (McKersie et al., 1996 ; Wang et al., 2005). Ces derniers auteurs ont fait s'exprimer dans le chloroplaste de riz un gène de pois codant pour une MnSOD. De même, Sunkar et al. (2003) ont surexprimé une aldehyde dehydrogenase, ce qui a permis une amélioration de la survie des plantes en conditions sévères. Les gènes impliqués dans ces processus pourraient aussi avoir un intérêt agronomique dans certains scénarios climatiques au champ, comme suggéré dans les construits de Wang et al. (2005) qui ont maintenu leur photosynthèse lors d'un déficit hydrique.

D'autres constructions avaient pour but d'augmenter la production de solutés compatibles dans la cellule. Le rôle de ces solutés a d'abord été considéré comme participant au maintien de la turgescence, mais il est maintenant probable qu'il s'agit en fait de protéger les cellules contre le stress oxydant (Nuccio et al., 1999). Des constructions ont permis d'améliorer les comportements de plantes lors de stress quasi-létaux, en surexprimant des gènes impliqués dans la synthèse de la proline (Kishor et al., 1995), de la glycine bétaïne (Hayashi et al., 1997), du mannitol (Shen et al., 1997 ; Abebe et al., 2003) ou du tréhalose (Garg et al., 2002). Dans le dernier cas, les plantes de riz transformées avaient une meilleure capacité photosynthétique, y compris en l'absence de stress.

Enfin, des protections cellulaires ont été obtenues, par exemple en augmentant la biosynthèse de protéines hydrophiles (protéines LEA ; Xu et al., 1996) ou de polyamines (Capell et al., 2004).

b. D'autres constructions confèrent aux plantes une stratégie d'évitement du stress.

La stratégie d'évitement permet la survie aux dépens de la productivité, en réduisant la transpiration mais aussi la photosynthèse (cf. section 1.1.2.). Un des cas les plus typiques est celui décrit par Iuchi et al. (2001), qui ont produit des plantes d'*Arabidopsis thaliana* surproduisant l'hormone Acide Abscissique (ABA) qui cause la fermeture stomatique. Les plantes surexprimant un gène de la biosynthèse de cette hormone ont survécu plus longtemps au manque d'irrigation, alors que celles le sous-exprimant mouraient plus rapidement que la plante sauvage. Ce comportement était associé à la transpiration, les plantes ayant les transpirations les plus élevées desséchaient plus rapidement le sol et mouraient donc plus vite. Un effet similaire a été obtenu chez la tomate à partir d'une autre construction (Hsieh et al., 2002, cf. plus loin). Une famille de gènes (DELLA) récemment identifiée pourrait être centrale dans les réductions de vitesses de croissance et de développement associées aux stress abiotiques (Achard et al., 2006). En effet, des mutants chez lesquels l'expression de ces gènes a été supprimée réduisent moins leur croissance lors d'un stress modéré, mais meurent plus rapidement en cas de stress sévère. L'examen détaillé des publications sur les plantes tolérantes à la sécheresse suggère que la réduction de taille, souvent associée aux constructions utilisées, pourrait être un mécanisme de tolérance involontaire dans un grand nombre d'expériences. Ce défaut peut maintenant être surmonté par des constructions plus élaborées qui ne devraient plus provoquer de diminution de la croissance en conditions favorables. Inversement, lorsqu'il sera possible de contrôler finement les stratégies d'évitement du stress, par exemple en les limitant dans le temps aux périodes les plus défavorables ou choisies par l'agriculteur, des plantes transgéniques "intelligentes" pourront profondément changer la gestion des cultures en déficit hydrique.

c. Enfin plusieurs constructions visent à modifier la signalétique cellulaire du stress.

Il s'agit en particulier de facteurs de transcription, protéines qui régulent la transcription d'autres gènes impliqués dans la tolérance au déficit. Des résultats spectaculaires ont été présentés par Kasuga et al. (1999) qui ont conféré aux plantes (*A. thaliana*) une meilleure capacité de survie en déficit hydrique avec une construction où l'expression du facteur de transcription transféré (*DREB1)* était contrôlée par un autre facteur de transcription induit par le déficit hydrique. Ce résultat montrait dès 1999 que les forts retards de développement observés lorsque le gène transféré est surexprimé de façon constitutive (quelles que soient les conditions) peuvent être évités par une expression mieux contrôlée. Ce facteur de transcription a aussi été transféré chez le blé (Pellegrineschi et al., 2004), avec des effets discutés. Un facteur de transcription de la même famille a été transféré chez la tomate (Hsieh et al., 2002), à laquelle il a conféré une stratégie d'évitement (ouverture stomatique plus faible, plantes de plus petite taille, cf. paragraphe précédent).

Des protéines impliquées dans la signalisation cellulaire du stress ont également été transférées chez des plantes : Calcium Dependent Protein Kinase, impliquée dans la transduction du signal (Saijo et al., 2000), MAP kinases (Shou et al., 2004) ou sous-unité beta de la farnesyltransferase (Wang et al., 2005). Les plantes transformées montraient souvent un maintien des capacités photosynthétiques en stress sévère, et dans un cas un maintien du rendement au champ (Wang et al., 2005).

d. Conclusion partielle sur les apports de la transgenèse à la tolérance au déficit hydrique.

Les exemples cités ci-dessus ne constituent qu'un sous-ensemble des articles dans lesquels un effet de la sur- ou sous-expression d'un gène est observé (pour des listes plus complètes, voir Ramanjulu et al., 2002, et Wang et al., 2003). Par ailleurs, il faut tenir compte du fait qu'un grand nombre de résultats négatifs ne sont pas publiés. Campos et al. (2004) signalent que de nombreux essais de transgenèse sont effectués par Pioneer sur maïs en utilisant des gènes trouvés intéressants dans les espèces modèles, sans résultat dans la plupart des cas.

La transgenèse est un outil irremplaçable pour analyser les mécanismes impliqués dans la tolérance au déficit hydrique. Par exemple, la dérégulation de fonctions a permis de progresser sur la compréhension du rôle des interactions entre hormones végétales impliquées dans les réponses (Baudoin et al., 2000 ; Borel et al., 2001 ; Sharp, 2002) ou de la régulation de l'expression des gènes en cas de déficit hydrique (Shinozaki et Yamaguchi-Shinozaki, 2000). Ces progrès sont la base nécessaire pour interpréter et piloter le progrès génétique. De premières indications suggèrent que des transferts de gènes pourraient devenir, en plus de leur rôle d'outil d'analyse, un outil pour l'amélioration de la tolérance. Cependant, aucun transfert de gènes n'a pour l'instant débouché sur la commercialisation de génotypes tolérants au déficit hydrique. Ceci peut avoir plusieurs causes.

- Bien que certains résultats publiés soient encourageants, ils restent à valider dans des conditions de sécheresses compatibles avec les situations agricoles. En particulier, l'essentiel des expériences a été réalisé sur plantes en pots non arrosés pendant une longue période, donc avec des plantes en situations de survie. L'essai en champ reste encore l'exception, et des analyses précises de l'élaboration du rendement de plantes transgéniques en conditions de sécheresse n'ont jamais été menées, à notre connaissance.

- Dans la plupart de ces travaux, les analyses phénotypiques sont menées de façon peu rigoureuses, l'essentiel des publications étant consacré à la description de l'expression des gènes. Les comportements décrits sont souvent illustrés par de simples photographies, ou par quelques mesures présentées en fin d'article en tant qu'illustration de l'intérêt des constructions génétiques plutôt que comme démonstration. Cela n'est pas apparu comme rédhibitoire aux comités éditoriaux des journaux scientifiques publiant les articles cités, essentiellement de nature cognitive et exploratoire. Cela le deviendrait si les mêmes résultats étaient utilisés pour justifier la mise sur le marché de génotypes tolérants. Une certification de la tolérance par un organisme indépendant semble dès lors essentielle (voir Conclusion).

- Il faut tenir compte du fait que, même si un gain important peut être obtenu par transgenèse sur du matériel génétique expérimental, la construction doit ensuite être transférée sur des lignées élites présentant de bonnes qualités agronomiques, ce qui nécessite quelques années. Les gains de rendement peuvent alors s'affaiblir voire disparaître complètement au cours de ce processus (Sinclair et al., 2004).

- Des transferts de gènes plus élaborés que la majorité de ceux pratiqués jusqu'à maintenant pourraient permettre de mieux piloter la réponse des plantes au déficit hydrique, par exemple en favorisant la croissance de certains organes à certaines périodes du cycle cultural suivant les conditions météorologiques présentes ou prévues, ou suivant la stratégie de l'agriculteur par rapport au risque. Ceci pourrait présenter, à moyen terme, une source importante de progrès.

2.1.2. Voies possibles pour l'amélioration de la tolérance au déficit hydrique

Chaque caractère a des effets favorables dans certains scénarios pédoclimatiques, défavorables dans d'autres.

2.1.2.1. Cadre d'analyse

Le paragraphe précédent et la section 1.1.2. montrent la différence entre, d'une part, l'amélioration de la survie des plantes en cas de déficit hydrique sévère et, d'autre part, le maintien d'une productivité acceptable en déficit hydrique compatible avec l'agriculture. L'amélioration de la survie ne rencontre *a priori* aucune limite, si bien qu'on peut attendre des progrès spectaculaires dans les années futures, alors que les gains de productivité se pensent plutôt en termes d'optimisation des échanges "eau contre carbone" et "eau contre chaleur". On se heurte alors à des limites physiques (par exemple l'impossibilité d'obtenir un rendement acceptable sans une transpiration importante), et au fait que les caractéristiques associées à la tolérance à la sécheresse ont des effets contradictoires suivant les scénarios climatiques.

Pour analyser les impacts futurs des recherches actuelles sur la tolérance au déficit hydrique, on réutilisera ici le cadre d'analyse présenté dans la section 1.1.2. L'élaboration du rendement peut être vue au travers de trois équations dont les termes peuvent être affectés par le déficit hydrique.

La première a été formulée par Passioura (1977) et considère la transpiration et l'efficience de l'eau comme cadre d'analyse :

$$\text{Rendement} = \Sigma\ (\text{ET} \times \text{WUE}) \times \text{HI} \qquad (1)$$

où ET ($kg.m^{-2}$) est l'évapotranspiration, WUE (efficience de l'eau transpirée, water use efficiency, $kg.kg^{-1}$) est le rapport entre la biomasse accumulée et la transpiration, et HI (indice de récolte, harvest index, $kg.kg^{-1}$) est le rapport entre la biomasse récoltée et la biomasse totale. Ces termes sont définis à un pas de temps journalier et sommés sur la période levée-récolte.

La seconde équation (Monteith et al., 1977) met en relation le rendement avec le rayonnement intercepté par la plante :

$$\text{Rendement} = \Sigma\ (\text{PPFD} \times \varepsilon_a \times \varepsilon_b) \times \text{HI} \qquad (2)$$

où PPFD est le rayonnement incident reçu par les plantes (photosynthetic photon flux density, $mol.m^{-2}.s^{-1}$), ε_a (%) est la proportion du rayonnement incident intercepté par les feuilles et ε_b ($kg.mol^{-1}$) est le rapport qui détermine la conversion du rayonnement intercepté en biomasse. Comme dans l'équation précédente, HI est l'indice de récolte. Le produit des trois premiers termes, définis à un pas de temps journalier, est sommé sur la période levée-récolte.

La troisième équation est la décomposition du rendement en nombre de grains par mètre carré, défini avant et pendant la floraison, et en poids d'un grain défini pendant la période floraison-récolte.

2.1.2.2. Les stratégies "conservatrices" : esquive et évitement

Ces stratégies "conservatrices" échangent une limitation du potentiel de rendement contre une réalisation du rendement en conditions sèches.

La stratégie d'esquive consiste à adapter la durée du cycle cultural au scénario climatique prévu (termes ET de l'équation 1 et PPFD de l'équation 2).

Une manière efficace d'obtenir des plantes qui peuvent produire une biomasse acceptable malgré un manque d'eau est de raccourcir la durée de leur cycle. Ceci réduit la consommation totale d'eau, si bien que des stades importants comme la floraison ou le remplissage du grain se produisent alors que l'humidité du sol permet encore une transpiration importante. Son inconvénient est que si la transpiration est réduite, le rayonnement intercepté pendant la période levée-floraison l'est aussi, aboutissant à un rendement plus faible. L'agriculteur obtient donc une biomasse et un rendement acceptables, tout en ayant limité fortement le potentiel de rendement. Il s'agit donc d'un choix stratégique de l'agriculteur, analysé dans la section sur les systèmes de culture.

La réduction de la conductance stomatique et de la croissance foliaire permettent de conserver l'eau du sol (stratégie d'évitement), mais réduisent aussi la photosynthèse cumulée (termes ET de l'équation 1, ε_a et ε_b de l'équation 2).

On a vu (cf. § 2.1.1.4.) que les mécanismes qui gouvernent cette stratégie d'évitement commencent à être connus et peuvent être manipulés génétiquement chez *Arabidopsis thaliana*, par exemple *via* la biosynthèse d'hormones (Iuchi et al., 2001), des facteurs de transcription (Hsieh et al., 2002) ou la biosynthèse de protéines contrôlant la croissance (Achard et al., 2006). Chez les plantes cultivées, de nombreuses études génétiques ont porté sur l'accumulation de l'ABA dans les feuilles (Sanguinetti et al., 1999 ; Tuberosa et al., 2002). Des QTL ont été détectés mais une forte concentration en ABA pouvait aussi bien être la marque d'une réponse active de la plante au stress que le symptôme que la plante est fortement stressée. Dans une expérience (Landi et al., 2001), des QTL permettant une forte accumulation d'ABA ont été transférés dans un matériel génétique élite. Cette opération a été efficace en ce qui concerne l'ABA, avec des résultats complexes sur le rendement. Cette stratégie d'évitement permet de protéger la plante et de réduire son niveau de stress, aux dépens de la photosynthèse qui est déterminée par la conductance stomatique et la surface foliaire, comme la transpiration. Comme dans la stratégie d'esquive, on échange donc une réduction du risque contre une réduction du rendement potentiel.

La maintenance de la transpiration par amélioration de l'efficacité du système racinaire n'est pas une stratégie "gratuite", et n'a un intérêt que dans certaines conditions pédologiques (terme ET de l'équation 1)

Il pourrait sembler évident qu'un système racinaire plus efficace aboutit à un meilleur comportement des plantes lors d'un déficit hydrique. Ceci peut être obtenu en améliorant le travail du sol (Tardieu, 1994) ou, génétiquement, en sélectionnant des plantes dont le système racinaire est plus développé (Yadav et al. 1997, Price et al. 2002ab). Cependant, des sélections de ce type n'ont d'intérêt que lorsque l'accroissement du système racinaire permet l'acquisition d'une plus grande ressource en eau.

On a ainsi observé des résultats spectaculaires lorsque l'accroissement du système racinaire permet l'accès à des couches profondes du sol ou à une nappe d'eau. Par exemple, Tuberosa et al. (2002) ont trouvé des QTL communs chez le maïs entre le développement racinaire évalué en conditions de laboratoire et le rendement obtenu au champ. Champoux et al. (1995) ont cartographié de nombreux QTL, dont certains étaient co-localisés avec des QTL d'enroulement des feuilles. Le riz a un système racinaire peu développé si bien que son amélioration amène généralement une amélioration du comportement en déficit hydrique. Par exemple, Courtois et al. (2000) ont détecté des QTL de croissance racinaire communs avec des QTL d'enroulement des feuilles, de sénescence foliaire, de teneur relative en eau et d'accumulation de matière sèche.

Inversement, aucun effet positif d'une meilleure croissance racinaire n'est à attendre lorsque les plantes poussent sur un sol ayant une réserve limitée en eau et si il n'existe pas de compétition forte entre espèces (par exemple, avec les adventices) dans la parcelle considérée (Robinson, 1996). Une augmentation de la masse racinaire peut même être contre-productive en raison du coût important de la croissance racinaire en terme de carbone. Il est ainsi à noter que les sélections récurrentes décrites plus haut pour améliorer la tolérance du maïs à la sécheresse ont abouti à *diminuer* la biomasse racinaire (Bruce et al., 2002). Un programme australien a même cherché à diminuer l'efficacité du

système racinaire afin de garder de l'eau dans le sol jusqu'à la fin du cycle cultural ; ce programme a eu des résultats positifs en climat particulièrement sec (Richards et Passioura, 1989).

2.1.2.3. L'augmentation de l'efficience de l'eau

Une augmentation de l'efficience de l'eau peut être obtenue, mais n'a pour l'instant d'effet positif sur l'accumulation de biomasse qu'en situation très sèche (terme WUE de l'équation 1).

Bien que la transpiration et l'accumulation de biomasse soient liées intrinsèquement, on peut attendre que leur rapport (WUE, équation 1) puisse être manipulé génétiquement pour augmenter la quantité de CO_2 capturé par unité d'eau transpirée. Farquhar et al. (1982) ont montré qu'il existe une similarité frappante entre, d'une part, les équations qui décrivent les transferts d'eau et de carbone dans la feuille et, d'autre part, celles qui décrivent la discrimination opérée par la photosynthèse contre l'isotope lourd du carbone (^{13}C) par rapport à l'isotope courant (^{12}C). Ceci aboutit à des relations robustes entre la discrimination isotopique, nommée $\Delta^{13}C$, et l'efficience de l'eau (WUE). Cette relation (négative) est observée expérimentalement chez un grand nombre d'espèces (Condon et al., 2004), à l'exception d'espèces comme le maïs, le sorgho ou la canne à sucre qui disposent d'un métabolisme particulier (appelé C4) leur conférant une efficience de l'eau particulièrement élevée. Puisque $\Delta^{13}C$ peut être mesurée rapidement et de manière relativement peu coûteuse avec un spectromètre de masse, les agronomes et les généticiens disposent d'une méthode efficace pour mesurer indirectement l'efficience de l'eau. Ceci a permis l'identification d'un gène impliqué dans l'efficience de l'eau à partir d'une stratégie QTL chez *Arabidopsis thaliana* (Masle et al., 2005).

La sélection visant à augmenter l'efficience de l'eau a abouti le plus souvent à une réduction de la vitesse d'accumulation de biomasse et du rendement, en particulier en conditions favorables d'irrigation (Condon et al., 2002). En effet, la sélection pour l'efficience de l'eau revient généralement à sélectionner pour une faible conductance stomatique, et donc une faible photosynthèse. Comme dans la stratégie d'évitement, on réduit donc la photosynthèse cumulée tout en gardant de l'eau dans le sol pour la fin du cycle. Cependant, des résultats intéressants ont été obtenus quand on a sélectionné à la fois pour une conductance stomatique et une efficience de l'eau élevées (Rebetzke et al., 2002). Un gain de rendement appréciable a ainsi été obtenu en conditions particulièrement sèches, alors que cet avantage disparaissait en conditions de sécheresse modérée telles que celles qu'on connaît en France (Figure 2).

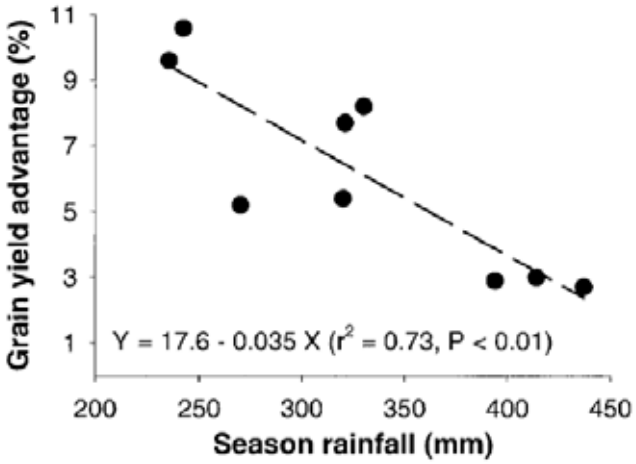


Figure 2. L'amélioration génétique de l'efficience de l'eau n'accroît les rendements que sous des climats très secs par rapport aux climats européens. Gains de rendement (%) de blés sélectionnés pour une efficience de l'eau élevée par rapport à une variété témoin, en fonction de la pluviométrie, dans un réseau d'essais en Australie (Rebetzke et al., 2002)

Bien qu'il semble intuitif que la sélection pour une meilleure efficience de l'eau est un objectif à rechercher, ceci n'est pas donc nécessairement le cas dans des conditions françaises caractérisées par une recharge hivernale de la réserve en eau du sol. On ne peut en attendre aucun progrès pour les plantes C4 comme le maïs ou le sorgho, qui ont déjà une efficience très élevée, et les gains à attendre pour les autres espèces sont probablement limités aux scénarios les plus secs, peu fréquents en France.

2.1.2.4. Les stratégies de maintien de la croissance

Ces stratégies "dépensières" favorisent le rendement potentiel tout en augmentant le risque d'une perte totale de rendement.

Une variabilité génétique importante existe sur le maintien de la croissance foliaire en déficit hydrique (termes ET de l'équation 1 et ε_a de l'équation 2)

La croissance foliaire est réduite en cas de déficit hydrique, avant toute réduction de la photosynthèse ou d'autres processus métaboliques (Boyer, 1970 ; Saab et al., 1989). Comme la turgescence est le moteur de la croissance, de nombreux programmes génétiques ont visé à favoriser son maintien lors d'un déficit hydrique *via* l'accumulation de solutés dans la cellule. Une variabilité génétique, et des QTL d'ajustement osmotique, ont été observés chez plusieurs espèces (Zhang et al., 1999 ; Robin et al., 2003 ; Chimenti et al., 2006 ; Moinuddin et al., 2005). L'intérêt agronomique de ces allèles est cependant discuté (Serraj et Sinclair, 2002). D'autres mécanismes sont impliqués dans le maintien de la croissance comme la division cellulaire (Granier et al., 2000), les caractéristiques mécaniques des parois cellulaires (Cosgrove et al., 2005), le maintien d'une conductivité hydraulique élevée *via* des protéines membranaires, les aquaporines (Martre et al., 2002 ; Lian et al., 2004 ; Zhu et al., 2005 ; Luu et Maurel, 2005), la signalétique hormonale (Sharp, 2002) ou le maintien du métabolisme des sucres (Kim et al., 2000). Par ailleurs, les analyses à grande échelle de l'expression des gènes et des protéines montrent que de nombreux mécanismes cellulaires sont modifiés au cours de la sécheresse (voir section 1.1.2.). Ces réponses conditionnent pour une part la capacité de la plante à maintenir sa croissance en conditions de déficit, ou à reprendre cete croissance après le retour à des conditions favorables. Devant cette complexité, des analyses génétiques ont été menées pour évaluer directement le maintien de la croissance sous déficit hydrique, et montrent qu'il existe une variabilité génétique importante de ce caractère, ainsi que des QTL communs à plusieurs matériels génétiques (Reymond et al., 2003).

Le maintien de la croissance foliaire permet d'augmenter la photosynthèse cumulée, mais elle augmente aussi la transpiration. Cependant, il évite aussi l'évaporation directe du sol, si bien que la croissance foliaire est généralement retenue comme un caractère favorable pour la tolérance au déficit hydrique, avec des effets généralement positifs sur le rendement (Zhang et al., 1999 ; Chimenti et al., 2006 ; Condon et al., 2004). Les expériences de transgenèse présentées plus haut suggèrent cependant que cette stratégie serait contre-productive en climat très sec.

Le maintien de la croissance reproductrice a abouti à un des exemples les plus marquants d'acquisition de la tolérance au déficit hydrique (terme HI des équations 1 et 2, terme "nombre de grains" de l'équation 3).

Il est connu que le déficit hydrique retarde la floraison femelle du maïs; probablement en affectant la croissance des ovules et des soies (cf. § 2.1.1.3.). Il s'ensuit que le décalage entre les floraisons mâle et femelle s'accroît avec le déficit hydrique. De nombreux QTL d'ASI en déficit hydrique ont été obtenus, tant au CIMMYT (Ribaut et al., 1996, 1997 et 2002) que dans le secteur privé (résultats confidentiels Génoplante). Leur introgression dans du matériel génétique est un des rares exemples incontestable de réussite pour l'obtention de génotypes tolérants à la sécheresse. Les nouveaux génotypes de maïs ont donc une sensibilité plus faible pendant leur floraison, par rapport aux génotypes anciens (Bruce et al., 2002). Leur "période critique" (Claasen et Shaw, 1970) est donc moins marquée, et il est probable que les irrigations pléthoriques du maïs au moment de sa floraison ne se justifieront plus à l'avenir.

L'amélioration de l'indice de récolte (HI) en bonne partie *via* l'augmentation du nombre de grains, a été l'une des voies principales d'amélioration du rendement tant en conditions sèches qu'irriguées. On arrive cependant probablement à une limite, avec 60% de la biomasse totale affectée aux grains chez les génotypes récents. Il est donc probable que la stratégie visant à maintenir le développement reproducteur trouvera rapidement une limite, sauf probablement chez le maïs dont le développement reproducteur est particulièrement fragile par rapport à celui des autres espèces (cf. section 1.1.2.). De plus, et comme dans le cas du maintien de la croissance foliaire, on peut prévoir que cette stratégie génétique qui est favorable en conditions modérément sèches, serait contre-productive en situation de déficit hydrique sévère. La réduction du nombre de grains est en effet une protection mise en place par la plante, permettant d'obtenir des grains viables en cas de disponibilité faible en carbone liée au déficit hydrique. Le risque associé à la stratégie de maintien du nombre de grains est donc d'obtenir un grand nombre de grains en conditions sèches, qui ne pourraient pas se remplir correctement pendant la période floraison-récolte. Là encore, on échange une augmentation du potentiel de rendement contre un risque accru de perte totale du rendement.

2.1.3. Conclusion

La sélection pour la tolérance au déficit hydrique a permis des progrès importants, mais pas encore à la mesure des annonces médiatiques. Ceci est lié aux effets contradictoires des caractères associés à la tolérance. Une instance indépendante, qui seule pourrait délivrer un label "tolérant à la sécheresse", semble indispensable.

Si les scénarios de sécheresse sont multiples, quant à leur calendrier (début, moitié ou fin de cycle) et quant à leur sévérité, la tolérance à la sécheresse ne peut pas se définir par des critères universels pour tous les scénarios. Un caractère donné peut avoir des effets positifs dans un scénario, avoir peu d'effet dans un autre et même être néfaste dans un troisième (Chapman et al., 2003). Le problème a été trop simplifié dans un grand nombre de travaux scientifiques, où le déficit hydrique était assimilé à un scénario extrême impliquant la survie de la plante. Il existe cependant aussi des travaux portant sur d'autres fonctions qui sont affectées lors de scénarios moins extrêmes, compatibles avec l'activité agricole.

Des progrès considérables ont été faits sur la compréhension des effets du déficit hydrique sur le fonctionnement des plantes aux échelles moléculaires et de la plante entière (voir aussi la section 1.1.2.). De nombreuses expériences montrent qu'il existe une variabilité génétique importante sur des mécanismes impliqués dans la tolérance. Des gènes et des QTL ont été identifiés, et sont actuellement transférés dans du matériel agronomique d'intérêt. La combinaison de la génétique quantitative et de la modélisation permet de prévoir quels allèles seraient favorables dans quels scénarios climatiques (Reymond et al., 2003 ; Hammer et al., 2005). Des marges importantes de progrès existent donc, et on peut supposer qu'elles se traduiront par la mise à disposition de génotypes tolérants dans les prochaines années. Les progrès les plus déterminants viendront-ils de programmes fondés sur des transferts de gènes individuels destinés à conférer une tolérance unique à la sécheresse, ou de programmes à plus long terme qui impliquent des ré-ingénieries de la plante en prenant en compte ses stratégies vis-à-vis de scénarios climatiques ? L'avenir le dira, mais ce chapitre suggère que c'est la seconde stratégie qui devrait être la plus porteuse pour des conditions agronomiques, en associant plusieurs techniques issues de la génomique avec les progrès de la modélisation des plantes. Tant la génétique quantitative (QTL) que les nouvelles générations de plantes transgéniques permettant de manipuler de façon subtile l'expression des gènes devraient contribuer à ces progrès. Ils pourraient à terme bouleverser les systèmes de culture de plantes en déficit hydrique en donnant plus de choix à l'agriculteur en termes de gestion du risque. Ces progrès ne permettront en aucun cas une production abondante dans des conditions arides, mais une optimisation de l'utilisation de l'eau permettant de maintenir les rendements tout en réduisant les apports d'eau.

Cependant, il existe encore très peu de génotypes tolérants disponibles pour les agriculteurs (aucun en Europe), en dehors du progrès génétique général vu dans la première partie de ce chapitre. Ceci contraste avec les effets d'annonce fréquemment publiés dans la presse. Si on cumulait toutes les sources de tolérance et tous les gains de rendement en déficit hydrique décrits dans la littérature, la sensibilité des plantes à la sécheresse ne devrait plus exister, ce qui n'est évidemment pas le cas. Comme chaque caractère impliqué dans la tolérance confère des avantages dans certains scénarios et des désavantages dans d'autres, il suffit d'appliquer, volontairement ou involontairement, les conditions pédoclimatiques qui maximisent les avantages d'un caractère pour que des résultats spectaculaires soient obtenus. Ce chapitre suggère que les résultats seraient décevants dans d'autres conditions pédoclimatiques, où les caractères retenus ne confèrent pas d'avantage déterminant ou présentent même des désavantages.

Dans ces conditions, il ne semble pas raisonnable qu'une qualification "tolérant à la sécheresse" soit définie par les obtenteurs eux-mêmes sans être labellisée par une instance indépendante. Celle-ci se chargerait de tester la tolérance dans des protocoles standardisés qui se rapprochent le plus possible des conditions environnementales rencontrées dans les parcelles agricoles européennes. Il n'est pas réaliste de tester de cette manière tous les génotypes inscrits chaque année (de l'ordre d'une ou plusieurs centaines par espèce et par an). Le CTPS fait un travail remarquable de tri des génotypes, aboutissant à retenir pour la commercialisation des génotypes dont le comportement moyen est supérieur aux génotypes de référence dans des réseaux d'essais. Il ne pourrait pas appliquer un protocole supplémentaire spécifiquement destiné au déficit hydrique à l'ensemble de ces génotypes. En revanche, on peut penser qu'un label "tolérant à la sécheresse" puisse n'être obtenu que par une certification supplémentaire, fondée sur un protocole largement accepté. Inversement, cette appellation ne pourrait pas être utilisée à la suite d'essais non contrôlés réalisés par les obtenteurs.

Enfin, les paragraphes précédents suggèrent que la modélisation du comportement des cultures lors de scénarios climatiques variés est un outil essentiel pour prévoir les génotypes les plus adaptés aux changements climatiques prévus, et les allèles d'intérêt constituant ces génotypes. Il s'agit là d'un champ de recherche nouveau (Tardieu, 2003 ; Hammer et al., 2005), complémentaire des recherches menées actuellement en physiologie moléculaire pour comprendre l'effet de gènes d'intérêt (Sharp, 2002 ; Tournaire et al., 2003) en génomique pour identifier les gènes ou les protéines affectés dans les différences génétiques de comportement au déficit hydrique (Consoli et al., 2002), en génétique quantitative pour identifier les allèles d'intérêt (Tuberosa et al., 2002) et en écophysiologie pour intégrer les fonctions de la plante et interpréter les interactions génotype-environnement (Reymond et al., 2003).

Références bibliographiques

Abebe T., Guenzi A.C., Martin B., Cushman J.C. (2003). Tolerance of mannitol-accumulating transgenic wheat to water stress and salinity. *Plant Physiology*. 131, 1748-55

Achard P., Cheng H., Grauwe L., Decat J., Schoutteten H., Moritz T., Van Der Straeten D., Peng J., Harberd N.P. (2006). Integration of plant responses to environmentally activated phytohormonal signals. *Science,* 311, 91-94

Beaudoin N., Serizet C., Gosti F., Giraudat J. (2000). Interactions between abscisic acid and ethylene signaling cascades. *Plant Cell*, 12, 1103-1115

Borel C., Frey A., Marion-Poll A., Tardieu F., Simonneau T. (2001). Does engineering ABA synthesis in N. plumbaginifolia modify stomatal response to drought? *Plant, Cell and Environment*, 24, 477-489

Boyer J.S. (1970) Leaf enlargement and metabolic rates in corn, bean and sunflower at various leaf water potential. *Plant Physiology*, 46, 233-235

Bruce W.B., Edmeades G.O., Barker T.C. (2002). Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53, 13-25

Campos H., Cooper M., Habben J. E., Edmeades G.O., Schussler J.R. (2004). Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field Crops Research*, 90, 19-34

Capell T., Bassie L., Christou P. (2004). Modulation of the polyamine biosynthetic pathway in transgenic rice confers tolerance to drought stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 26 9909-9914

Champoux M.C., Wang G., Sarkarung S., Mackill D.J., O'Toole J.C., Huang N., McCouch S.R. (1995). Locating genes associated with root morphology and drought avoidance in rice via linkage to molecular markers. *Theoretical and Applied Genetics,* 90, 969-981

Chapman S.C., Cooper M., Podlich D., Hammer G.L. (2003). Evaluating plant breeding strategies by simulating gene action and dryland environment effects. *Agronomy Journal*, 95, 99-113

Chimenti C.A., Marcantonio M., Hall A.J. (2006). Divergent selection for osmotic adjustment results in improved drought tolerance in maize (Zea mays L.) in both early growth and flowering phases. *Field Crops Research*, 95, 305-315

Claassen M.M., Shaw R.H. (1970). Water deficit effects on corn. II. Grain components. *Agronomy Journal* , 62, 652-655

Condon A.G., Richards R.A., Rebetzke G.J., Farquhar G.D. (2002). Improving intrinsic water-use efficiency and crop yield. *Crop Science*. 42, 122-131

Condon A.G., Richards R.A., Rebetzke G.J., Farquhar G.D. (2004). Breeding for high water-use efficiency. *Journal of experimental Botany*, 55, 2447-60

Consoli L., Lefevre A., Zivy M., de Vienne D. et Damerval C. (2002) : QTL analysis of proteome and transcriptome variations for dissecting the genetic architecture of complex traits in maize. *Plant Mol. Biol*, 48: 575-581

Cosgrove D.J. (2005). Growth of the cell wall. *Nature Reviews. Molecular Cell Biology* 6, 850-861

Courtois B., McLaren G., Sinha P.K., Prasad K., Yadav R. & Shen L. (2000). Mapping QTLs associated with drought avoidance in upland rice. *Molecular Breeding*, 6, 55-66

Duvick D.N. & Cassman K.G. (1999). Post-Green Revolution Trends in Yield Potential of Temperate Maize in the North-Central United States. *Crop Science*, 39, 1622-1630

Edmeades G.O., Bolanos J., Chapman S.C., Lafitte H.R. & Banziger M. (1999). Selection Improves Drought Tolerance in Tropical Maize Populations: I. Gains in Biomass, Grain Yield, and Harvest Index. *Crop Science*, 39, 1306-1315

Farquhar GD, O'Leary M.H., Berry J.A. (1982) On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, 9, 121-137

Garg A.K., Kim J.K., Owens T.G., Ranwala A.P., Choi Y.D., Kochian L.V., Wu R.J. (2002). Trehalose accumulation in rice plants confers high tolerance levels to different abiotic stresses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 99, 15898-903

Granier Ch, Inzé D, Tardieu F. (2000) Spatial distribution cell division rate can be deduced from that of $P34^{cdc2}$ kinase activity in maize leaves grown in contrasting conditions of temperature and water status. *Plant Physiology*, 124, 1393-1402

Hammer G., Chapman S., van Oosterom E., Podlich D. (2005). Trait physiology and crop modelling as a framework to link phenotypic complexity to underlying genetic systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56, 947-960

Hayashi, H., Alia, Mustardy, L., Deshnium, P., Ida, M. & Murata, N. (1997). Transformation of Arabidopsis thaliana with the codA gene for choline oxidase; accumulation of glycinebetaine and enhanced tolerance to salt and cold stress. *Plant J.*, 12, 133-42

Heard J., Adam T.R., Anstom G., Bensen R., Nelson D., Arner D., Ratcliffe O., Creelman R., Doston S. (2005). *Increasing yield stability of corn under drought conditions : new insights from transgenic studies*. Interdrought II, abstract book., Univ. La Sapienza, Rome

Hoisington D., Khairallah M., Reeves T., Ribaut J.M., Skovmand B., Taba S., Warburton M. (1999). Plant genetic resources: what can they contribute toward increased crop productivity? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 96, 5937-43

Hsieh T.H., Lee J.T., Charng Y.Y., Chan M.T. (2002). Tomato Plants Ectopically Expressing Arabidopsis CBF1 Show Enhanced Resistance to Water Deficit Stress. *Plant Physiology*, 130, 618-626

Iuchi S., Kobayashi M., Taji T., Naramoto M., Seki M., Kato T., Tabata S., Kakubari Y., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. (2001) Regulation of drought tolerance by gene manipulation of 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase, a key enzyme in abscisic acid biosynthesis in Arabidopsis. *Plant Journal*. 27: 325-33

Kasuga M., Liu Q., Miura S., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. (1999). Improving plant drought, salt, and freezing tolerance by gene transfer of a single stress-inducible transcription factor. *Nature Biotechnology,* 17, 287-91

Kim J. Y., Mahe A., Brangeon J., Prioul J.L. (2000). A maize vacuolar invertase, IVR2, is induced by water stress. Organ/tissue specificity and diurnal modulation of expression. *Plant Physiology*, 124, 71-84

Kishor PBK, Hong Z, Miao CH, Hu CAA, Verma DPS (1995) Overexpression of A1-Pyrroline-5-Carboxylate Synthetase Increases Proline Production and Confers Osmotolerance in Transgenic Plants *Plant Physiology* 108: 1387-1394

Landi P., Sanguineti M.C., Conti S. & Tuberosa R. (2001). Direct and Correlated Responses to Divergent Selection for Leaf Abscisic Acid Concentration in Two Maize Populations. *Crop Science*, 41, 335-344

Lian, H.L., Yu X., Ye Q., Ding X.S., Kitagawa Y., Kwak S.S., Su W.A., Tang C. (2004). The Role of Aquaporin RWC3 in Drought Avoidance in Rice Plant. *Cell Physiology*. 45, 481-489

Luu D.T., Maurel C. (2005) Aquaporins in challenging environment : molecular gears for adjusting plant water status. *Plant Cell and Environment*, 28, 85-96

Martre P., Morillon R., Barrieu F., North G.B., Nobel P., Chrispeels M.J. (2002). Plasma membrane aquaporins play a significant role during recovery from water deficit. *Plant Physiology*, 130, 2101-2110

Masle J., Gilmore S.R. Farquhar G.D. (2005). The ERECTA gene regulates plant transpiration efficiency in Arabidopsis. *Nature*, 436, 866-870

McKersie B.D., Bowley S.R., Harjanto E., Leprince O. (1996). Water-Deficit Tolerance and Field Performance of Transgenic Alfalfa Overexpressing Superoxide Dismutase. *Plant Physiology*, 111, 1177-1181

Moinuddin, Fischer R.A., Sayre K.D., Reynolds M.P. (2005). Osmotic Adjustment in Wheat in Relation to Grain Yield under Water Deficit Environments. *Agronomy Journal*, 97, 1062-1071

Monteith J.L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal society, London B*, 281, 277-294

Nuccio M.L., Rhodes D., McNeil S.D., Hanson A.D. (1999). Metabolic engineering of plants for osmotic stress resistance. *Current Opinions on Plant Biology*, 2, 128-34

Passioura J.B. (1977). Grain yield, harvest index and water use of wheat. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science.* 43, 117-120

Pellegrineschi A., Reynolds M., Pacheco M., Brito R.M., Almeraya R., Yamaguchi-Shinozaki K. and Hoisington D. (2004). Stress-induced expression in wheat of the Arabidopsis thaliana DREB1A gene delays water stress symptoms under greenhouse conditions. *Genome,* 47, 493-500

Price A.H., Steele K.A., Moore B.J. and Jones R.G.W. (2002a). Upland rice grown in soil-filled chambers and exposed to contrasting water-deficit regimes II. Mapping quantitative trait loci for root morphology and distribution. *Field Crops Research* 76: 25-43

Price A.H., Townend J., Jones M.P., Audebert A. and Courtois B. (2002b) Mapping QTLs associated with drought avoidance in upland rice grown in the Philippines and West Africa. *Plant Molecular Biology* 48: 683-695

Ramanjulu, S. and Bartels, D. (2002). Drought- and desiccation-induced modulation of gene expression in plants. *Plant Cell Environ* 25, 141-151

Rebetzke G.J., Condon A.G., Richards R.A. & Farquhar G.D. (2002). Selection for Reduced Carbon Isotope Discrimination Increases Aerial Biomass and Grain Yield of Rainfed Bread Wheat. *Crop Science*, 42, 739-745

Reymond M., Muller B., Leonardi A., Charcosset A., Tardieu F. (2003). Combining quantitative trait loci analysis and an ecophysiological model to analyse the genetic variability of the responses of leaf growth to temperature and water deficit. *Plant Physiology*, 131, 664-675

Reynolds M.P., Rajaram S. & Sayre K. D. (1999). Physiological and Genetic Changes of Irrigated Wheat in the Post-Green Revolution Period and Approaches for Meeting Projected Global Demand. *Crop Science*, 39, 1611-1621

Ribaut J.M., Banziger M., Betran J.A., Jiang C., Edmeades G.O., Dreher K. and Hoisington D.A. (2002). Use of molecular markers in plant breeding: drought tolerance improvement in tropical maize. In: *Quantitative Genetics, Genomics, and Plant Breeding*, M.S. Kang (ed). CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 85-99

Ribaut J.M., Jiang C., Gonzalez de Leon D., Edmeades G.O., Hoisington D.A. (1997). Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize. 2. Yield components and marker-assisted selection strategies. *Theoretical and Applied Genetics*, 94, 887-896

Ribaut J.M., Hoisington D.A., Deutsch J.A., Jiang C., Gonzalez-de-Leon D. (1996). Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize. 1. Flowering parameters and the anthesis-silking interval. *Theoretical and Applied Genetics*, 92, 905-914

Richards R.A., Passioura J.B. (1989). A breeding program to reduce the diameter of the major xylem vessel in the seminal roots and its effect on grain yield in rain-fed environments. is associated with fast early vigor in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*. 40 1989. 943-950

Robin S., Pathan M.S., Courtois B., Lafitte R., Carandang S., Lanceras S., Amante M., Nguyen H.T., Li Z. (2003). Mapping osmotic adjustment in an advanced back-cross inbred population of rice. *Theoretical and Applied Genetics*, 107, 1288-96

Robinson D (1996) Resource capture by localised root proliferation : why do plants bother? *Annals of Botany* 77 179-185

Saab I.N., Sharp R.E. (1989). Non-hydraulic signals from maize roots in drying soil : inhibition of leaf elongation but not stomatal conductance. *Planta*: 466-474

Saijo Y., Hata S., Kyozuka J., Shimamoto K., Izui K. (2000). Over-expression of a single Ca2+-dependent protein kinase confers both cold and salt/drought tolerance on rice plants. *Plant Journal*, 23, 319-327

Sanguineti M.C., Tuberosa R., Landi P., Salvi S., Maccaferri M., Casarini E., Conti S. (1999). QTL analysis of drought-related traits and grain yield in relation to genetic variation for leaf abscisic acid concentration in field-grown maize. *Journal of Experimental Botany*, 50, 1289-1297

Serraj R., Sinclair T.R. (2002). Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions? *Plant Cell and Environment*, 25, 333-341

Sharp R.E. (2002). Interaction with ethylene : changing views on the role of abscisic acid in root and shoot growth responses to water stress. *Plant Cell and Environment*, 25, 211-222

Shen B., Jensen R.G., Bohnert H.J. (1997). Increased resistance to oxidative stress in transgenic plants by targeting mannitol biosynthesis to chloroplasts. *Plant Physiology*, 113, 1177-83

Shinozaki K., Yamaguchi-Shinozaki K. (2000). Molecular responses to dehydration and low temperature: differences and cross-talk between two stress signaling pathways. *Current Opinion in Plant Biology*, 3, 217-23

Shou H., Bordallo P., Wang K. (2004). Expression of the Nicotiana protein kinase (NPK1) enhanced drought tolerance in transgenic maize. *Journal of Experimental Botany*, 55, 1013-9

Sinclair T.R., Purcell L.C., Sneller C.H. (2004) Crop transformation and the challenge to increase yield potential. *Trends in Plant Science,* 9 70-75

Sunkar R., Bartels D., Kirch H.H. (2003). Overexpression of stress-inducible aldehyde dehydrogenase gene from Arabidopsis thaliana in transgenic plants improves stress tolerance. *Plant Journal*, 35, 452-464

Tardieu F. (2003). Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends in Plant Science,* 8:9-14

Tardieu F. (1994). Growth and functionning of roots or root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signalling? *Soil and Tillage Research*, 30, 217-283

Thornsberry J.M., Goodman M.M., Doebley J., Kresovich S., Nielsen D., Buckler E.S. (2001). Dwarf polymorphisms associate with variation in flowering time. *Nature Genetics,* 28, 286-289

Tournaire-Roux C., Sutka M., Javot H., Gout E., Gerbeau P., Luu D.T., Bligny R., Maurel C. (2003). Gating of aquaporins by cytosolic pH regulates root water transport during anoxic stress. *Nature*, 425: 393-397

Tuberosa R., Salvi S., Sanguineti M.C., Landi P., Maccaferri M., Conti S. (2002). Mapping QTLs regulating morpho-physiological traits and yield: case studies, shortcomings and perspectives in drought-stressed maize. *Annals of Botany*, 89 n° spec, 941-63

Wang F.Z., Wang Q.B., Kwon S.Y., Kwak S.S., Su W.A. (2005a). Enhanced drought tolerance of transgenic rice plants expressing a pea manganese superoxide dismutase. *Journal of Plant Physiology*, 162, 465-72

Wang W., Vinocur B., Altman A. (2003). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218, 1-14

Wang Y., Ying J., Kuzma M., Chalifoux M., Sample A., McArthur C., Uchacz T., Sarvas C., Wan J., Dennis D.T., McCourt P., Huang Y. (2005b). Molecular tailoring of farnesylation for plant drought tolerance and yield protection. *Plant Journal*, 43, 413-24

Xu D., Duan X., Wang B., Hong B., Ho T., Wu R. (1996). Expression of a Late Embryogenesis Abundant Protein Gene, HVA1, from Barley Confers Tolerance to Water Deficit and Salt Stress in Transgenic Rice. *Plant Physiology*, 110, 249-257

Yadav R, Courtois B, Huang N, McLaren G (1997) Mapping genes controlling root morphology and root distribution in a double-haploid population of rice. *Theor. Appl. Genet*. 94, 619-632

Zhang J., Nguyen H.T., Blum A. (1999). Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. *Journal of Experimental Botany*, 50, 291-302

Zhu C., Schraut D., Hartung W., Schaffner A.R. (2005) Differential responses of maize MIP genes to salt stress and ABA. *Journal of Experimental Botany*, 56, 2971-2981

2.2. Adaptations agronomiques au risque de sécheresse

2.2.1. Systèmes de grande culture

Philippe Debaeke (INRA, Toulouse), Jean-Claude Mailhol (Cemagref, Montpellier), Jacques-Eric Bergez (INRA, Toulouse)

L'objet de cette section est d'envisager quelles solutions peuvent être proposées :
- pour réduire la sensibilité à la sécheresse des systèmes de grande culture non irrigués ou à irrigation restrictive,
- pour réduire la consommation d'eau en systèmes fortement irrigués.

2.2.1.1. Bases pour le raisonnement des itinéraires techniques en conditions d'eau limitante

2.2.1.1.1. Le modèle d'élaboration du rendement

Lorsque l'eau est le principal facteur limitant, Passioura (1977) préconise de décomposer le rendement des cultures en 3 termes largement indépendants :

Rendement (R) = Transpiration (T) x Efficience de Transpiration (TE) x Indice de récolte (IR)

On peut décomposer également le terme T de la façon suivante (Es = évaporation du sol) :

$$T = (T+Es) / (1+Es/T)$$

L'amélioration du rendement s'obtient ainsi en augmentant la quantité totale d'eau disponible pour la culture (T+Es), l'efficience de transpiration (TE) et l'indice de récolte (IR), mais en diminuant la contribution de Es (Es/T).

Comment le système de culture peut-il influencer les différents termes de l'élaboration du rendement en condition d'eau limitante ?

1. En augmentant la quantité d'eau initiale et son extraction par la culture (T+Es). Ceci passe par le choix de situations à forte disponibilité initiale (profondeur du sol, stock hydrique laissé par la culture précédente…), par l'augmentation de cette disponibilité (meilleure infiltration par le travail profond, extraction profonde après sous-solage, irrigation…) et par la limitation des pertes par évaporation (désherbage, gestion des résidus, travail du sol minimum…).
2. En diminuant le rapport Es/T par le mulching, mais aussi par la couverture rapide du sol par la culture (vigueur de la variété, densité de peuplement élevée, fumure starter…).
3. TE est plus élevée lors des phases de faible demande évaporative (printemps). Ceci peut être atteint par des cultures d'hiver ou des variétés très précoces (cultures semées tôt au printemps) tolérant les basses températures.
4. Diminuer la demande en eau en période végétative pour conserver la ressource tardivement est souvent évoqué parmi les stratégies d'adaptation. Ceci s'obtient par un rationnement végétatif (réduction de la densité de peuplement ou de l'azote, défoliation partielle, modulation de l'interrang…). Le principe est d'optimiser la contribution de la transpiration post-floraison à la transpiration totale pour augmenter IR. Un ratio du type 2 (pré-floraison) / 1 (post-floraison) est souvent préconisé.

Selon Richards (2006) citant plusieurs réussites de la sélection, le progrès génétique sur le rendement pour les conditions d'eau limitées s'est opéré en augmentant T, TE et/ou IR selon les cas. En particulier, un allongement de la durée de végétation active et une meilleure prospection racinaire ont contribué à augmenter la quantité d'eau transpirée. La sélection en céréales a recherché une plus grande vigueur initiale et un indice foliaire plus élevé afin de réduire le rapport Es/T.

2.2.1.1.2. La réponse à l'eau des cultures

De nombreux travaux dans les années 1970-80 se sont consacrés à l'établissement de fonctions de production "eau", mettant en relation rendement relatif (par rapport au rendement d'une culture bien alimentée en eau) et évapotranspiration relative (par rapport à la consommation en eau d'une culture bien alimentée) (voir, par exemple, Cabelguenne et al., 1982). Une synthèse de la littérature mondiale sur le sujet a été réalisée par la FAO (Doorenbos et Kassam, 1979). Ces fonctions de production ont été utilisées très fréquemment par les économistes dans le cadre de l'optimisation du choix d'assolement (Leroy et Jacquin, 1994).

La Figure1 illustre cette réponse pour quelques cultures du Sud-Ouest à partir de résultats expérimentaux plus récents. On distingue ainsi 4 groupes de cultures selon leur **sensibilité au défaut d'alimentation en eau**, soit, par ordre décroissant de tolérance au déficit d'alimentation en eau : 1) tournesol ; 2) sorgho et blé ; 3) pois et soja ; 4) maïs.

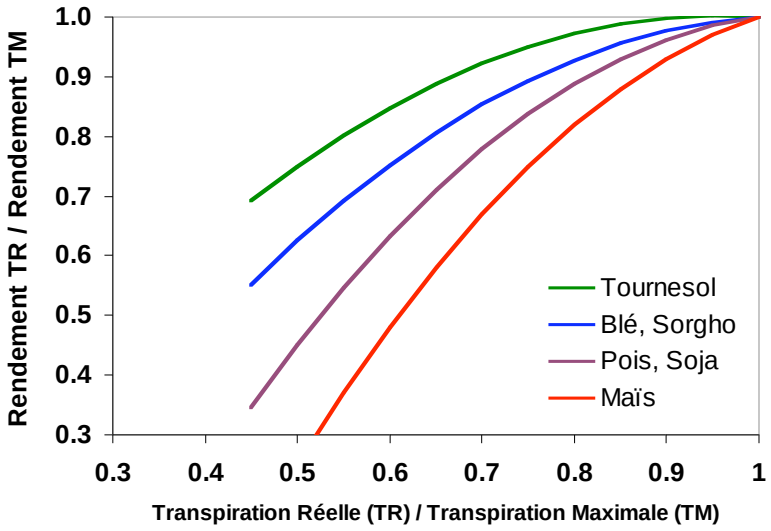


Figure 1. Réponse du rendement de 4 types de cultures au niveau de satisfaction du besoin en eau (Debaeke et Nolot, 2006)

D'autres travaux ont étudié la réponse du rendement des cultures à des doses croissantes d'irrigation, montrant ainsi une réponse maximale pour le maïs mais une meilleure réponse pour le sorgho aux plus faibles doses d'irrigation (par exemple : Stone et al., 1996, au Kansas). Les résultats sont plus concluants encore si l'on prend en compte la consommation d'eau (pluie + sol + irrigation) et non la dose d'irrigation (Cabelguenne et al., 1982).

A partir de ces travaux, on peut conclure à des différences d'**efficience de l'eau consommée** (kg de grain produit par mm d'eau consommée) selon les cultures, tout en se rappelant que le classement entre cultures varie avec le taux de satisfaction du besoin en eau. Le Tableau 1 présente des résultats issus de 3 publications indépendantes déjà anciennes. Les plantes en C4 sont les plus efficientes : en premier lieu le maïs (13-16 kg de grain par mm d'eau consommé) puis le sorgho (13-15). L'efficience du tournesol et du soja est nettement plus faible, le blé ayant une efficience intermédiaire.

Les **besoins en eau d'irrigation** varient évidemment selon les sols et les climats. Cependant, dans les régions où l'irrigation de complément est pratiquée, c'est le maïs qui reçoit les plus forts volumes d'irrigation, car les apports sont justifiés chaque année et les doses fluctuent entre 150 et 300 mm : cycle estival, réponse croissante à l'eau d'irrigation et période critique autour de la floraison expliquent ces pratiques.

Tableau 1. Consommation d'eau et efficience en eau pour quelques grandes cultures

a) Consommation en eau de 5 grandes cultures d'été (Hattendorf et al., 1988) – Kansas (USA)

	Maïs	Soja	Tournesol	Sorgho	Haricot
Consommation d'eau (mm)	565	541	545	484	424
Efficience de l'eau pour la production de biomasse (kg/mm)	35.6	16.2	20.5	32.4	15.8
Efficience de l'eau pour la production de grain (kg/mm)	13.4	5.5	4.2	13.0	4.9

b) Consommation en eau de 3 grandes cultures d'été : non irrigué *versus* irrigué à la satisfaction du besoin (Stone et al., 1996) – Kansas (US) – 14 ans (1974-1987)

	Maïs		Sorgho		Tournesol	
Irrigation (mm)	0	420	0	420	0	245
Consommation d'eau (mm)	351	644	359	663	355	576
Efficience de l'eau pour la production de grain (kg/mm)	8.3	15.2	15.2	11.7	6.0	5.4

c) Consommation en eau de 4 grandes cultures d'été irriguées (Cabelguenne, 1981) – 11 ans, Toulouse

	Maïs	Soja	Tournesol	Sorgho
Irrigation ETM (mm)	215	175	180	155
Consommation d'eau (mm)	520	520	490	450
Réponse moyenne à l'irrigation (q/ha)	+31	+8	+7	+19
Efficience de l'eau pour la production de grain (kg/mm)	16.3	6.4	6.1	14.0

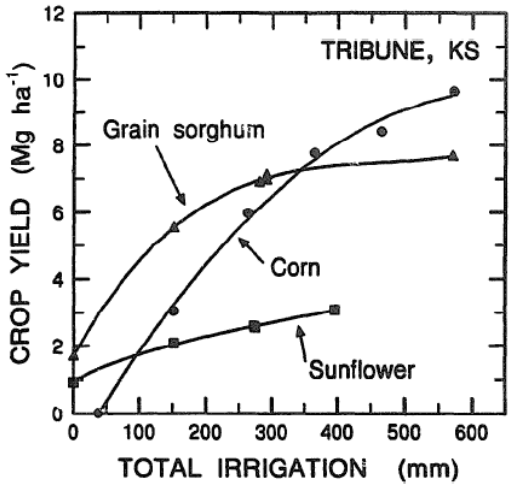
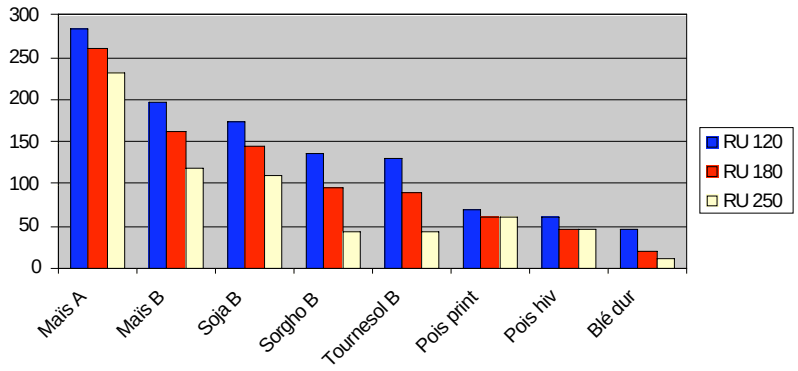


Figure 2. Réponse du maïs, du sorgho et du tournesol à l'irrigation (Stone et al, 1996)

La Figure 3 illustre le besoin moyen en irrigation dans la région toulousaine (20 années climatiques : 1984-2004), pour 3 types de sol variant par leur réserve utile. Comme le maïs valorise bien l'irrigation, tant sur le plan agronomique qu'économique, la satisfaction maximale du besoin en eau est recherchée (230-280 mm selon les types de sol : conduite A). Dans la pratique, il est plus difficile d'atteindre ce niveau d'irrigation pour des raisons hydrauliques, organisationnelles et réglementaires. Teyssier (2006) montre en effet que les apports d'irrigation sur le maïs-grain en Midi-Pyrénées varient entre 100 mm et 210 mm pour la période 2001-2005, ce qui traduit plutôt une conduite B.

Pour les autres cultures, en partie pour des raisons de pathologie mais aussi d'économie, on ne cherche pas à satisfaire le besoin en eau. Dans le Sud-Ouest, il est en général justifié d'irriguer les cultures d'été chaque année (soja, sorgho) : ce n'est pas le cas pour le blé d'hiver, où la fréquence est de l'ordre d'1 année sur 4.



Le maïs et le soja sont les plus gros consommateurs en eau d'irrigation ; le blé est le moins exigeant en volume.

Ces besoins traduisent la position du cycle (esquive), les capacités d'enracinement (faibles pour le pois), l'existence de périodes critiques (maïs)…

Source : Debaeke et Nolot, 2006

Maïs A : variété tardive, irrigation intensive (135 q/ha)
Maïs B : variété précoce, irrigation rationnée (100 q/ha)
Autres cultures : irrigation optimale évitant un excès de végétation (risque de maladies)

Figure 3. Besoins en irrigation moyens de 7 cultures d'hiver et d'été : simulation sur la base de seuils Transpiration réelle / Transpiration maximale différents selon la sensibilité des cultures
(3 niveaux de réserve utile, sols argilo-limoneux, climat Toulouse 1984-2004)

On distingue ainsi des **cultures efficientes en eau** (comme le maïs), des **cultures tolérantes à la contrainte hydrique** (comme le sorgho ou le tournesol) et des **cultures économes en eau d'irrigation** (comme les céréales d'hiver qui exigent moins fréquemment de l'irrigation, et des apports limités à des périodes où la concurrence pour les usages de l'eau est plus faible).

Une évaluation du besoin en irrigation ne peut se restreindre à la parcelle. Dans le Tableau 2, nous avons tenté d'évaluer les quantités d'eau d'irrigation mobilisées par les différentes cultures à l'échelle nationale : on tient compte ici de la surface irriguée et du volume moyen d'irrigation. Etant donné l'imprécision sur les volumes d'irrigation, seul l'ordre de grandeur de la consommation nationale doit être retenu.

Tableau 2. Utilisation de l'eau d'irrigation pour différentes espèces de grande culture

	Blé d'hiver	Colza	Pois	Maïs grain	Sorgho	Soja	Tournesol	Betterave	Pomme de terre
* Surface (x 1000 ha)	5 248	1 176	429	1 764	59	78	728	409	162
* Taux global d'irrigation (%)	0,5**	0	14,5	44,5	3+	40,5	2	7,5	36
Volume moyen d'irrigation (m^3/ha)	400+	0	650°	1 300°	600+	900+	600+	800+	800°
Consommation irrigation (Mm3)	10	0	40	1 020	1	28	9	25	47
Période d'irrigation	Avril-Mai	-	Mai	Juin-Août	Juillet	Juillet-Août	Juillet	Juillet-Août	Juin-Juillet

* : SCEES 2000 (Agreste, 2001); ° : SCEES 2001 (Agreste, 2004) ; + estimation (ordres de grandeur) ; ** en forte progression

Le maïs est ainsi la culture la plus consommatrice d'eau pour l'irrigation : les quantités d'eau mobilisées pour l'irrigation sont plus de 6 fois supérieures à l'ensemble des autres grandes cultures réunies (volume/ha et surfaces sont supérieurs). La mobilisation des ressources est estivale.
Le sorgho est tout aussi efficient mais mobilise peu d'eau d'irrigation (volume et surfaces).
L'irrigation mobilisée par le blé d'hiver est faible en raison du faible taux d'irrigation et du volume modéré.
Pomme de terre, pois et soja sont les cultures les plus irriguées en dehors du maïs, mais les surfaces concernées sont limitées.

Blé et pois mobilisent l'irrigation en avril-mai, lorsque les autres demandes sont plus faibles.
Colza, tournesol et soja sont les cultures les moins efficientes pour la production de grain. Cependant si l'on raisonne en équivalents énergétiques, ces cultures oléagineuses expriment une efficience plus proche de celle des céréales en C3.
Le colza n'est pas irrigué en raison de son cycle anticipé (esquive) et de son enracinement profond ; l'irrigation pourrait être justifié à la levée dans les régions méridionales.

2.2.1.2. Cas des systèmes pas ou peu irrigués

Ces situations correspondent à 80-90% de la surface agricole utile dans les régions où l'irrigation est la plus pratiquée, à savoir Aquitaine, PACA, Alsace, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes (Agreste, 2001).

La solution d'ajustement la plus immédiate est déjà pratiquée par les agriculteurs. Elle concerne la modification de la composition de l'assolement, avec une augmentation des cultures esquivant la contrainte hydrique (semis d'hiver) ou tolérant la sécheresse estivale (cultures d'été comme le tournesol ou le sorgho). Ces ajustements, qui font l'objet de nombreux articles dans la presse agricole depuis 2003, ont été examinés dans le Chapitre 1.2. du présent rapport.

La littérature scientifique abonde en références sur les stratégies d'adaptation à la contrainte hydrique, qu'il s'agisse de systèmes non irrigués ou bénéficiant d'une irrigation de complément (cf. synthèses de Loomis, 1983 ; Connor et Loomis, 1991 ; Turner, 2004 a-b ; Debaeke et Aboudrare, 2004 ; Passioura, 2006). Ces travaux sont souvent menés dans des régions semi-arides où le déficit hydrique est structurel (Australie, Chine, Inde, USA…) (Robinson, 2003). La transposition des solutions techniques ne peut se faire directement, bien que les concepts de base restent valables. Force est de constater que très peu de travaux européens abordent les stratégies d'adaptation à la sécheresse. Les études sur l'irrigation de complément sont plus nombreuses en particulier en France (INRA, ARVALIS-Institut du végétal, Cetiom, Cemagref) et en Italie.

Analysons ici les 5 options qui peuvent être mises en œuvre en l'absence d'irrigation.

2.2.1.2.1. Modifier le positionnement du cycle cultural pour s'ajuster à la ressource disponible (quantité, répartition)

Cette option passe par plusieurs voies : (i) un changement marqué du cycle cultural, (ii) le choix de précocités variétales ou (iii) de dates de semis permettant une esquive de la sécheresse par un décalage du cycle (en général une avancée du cycle).

. Choix de cultures semées à l'automne ou en fin d'hiver (colza, blé, orge) au lieu de cultures d'été semées au printemps (avril-mai).

Les cultures d'hiver (céréales à paille, colza), dont la phase de croissance active se déroule durant les périodes de demande évaporative modérée mais dont la durée de végétation est plus longue, consomment sensiblement autant d'eau que les cultures d'été (maïs, sorgho) **non irriguées** à cycle plus court mais à demande évaporative plus forte[1]. Les phases sensibles (début floraison et premières phases de croissance du grain) des cultures d'hiver sont avancées par rapport aux périodes où le risque de déficit hydrique est le plus fort.

Ainsi, sous climat méditerranéen, les cultures sont semées à l'automne ou en hiver et reçoivent des précipitations variables mais généralement suffisantes pour assurer les besoins de la culture jusqu'à l'anthèse (Ludlow et Muchow, 1990 ; Turner, 2004b). Des fluctuations de la disponibilité en eau peuvent provenir du degré de remplissage hivernal de la réserve du sol. Le rendement des cultures (céréales ou légumineuses d'hiver) est limité par la sécheresse et les hautes températures post-anthèse (responsables d'échaudage physiologique).

[1] Cependant si l'on tient compte de la période de sol nu (interculture) où l'évaporation du sol se manifeste, l'évapotranspiration est plus importante pour une culture d'été

Pour une même espèce, l'alternative automne-hiver *versus* printemps est parfois possible. Il peut s'agir d'un changement de type variétal (par exemple, pois d'hiver photopériodique ou non au lieu du pois de printemps ; blé de type hiver plutôt que alternatif…). Ce changement de période de semis permet ainsi de s'affranchir de l'irrigation pour des cultures comme le pois dans le Sud-Ouest (Encadré 1).

Encadré 1. Pois d'hiver versus pois de printemps : supprimer l'irrigation de complément ?

La sélection de variétés de pois photopériodiques, tolérantes au froid et aux maladies, est une alternative à l'irrigation du pois de printemps. Les semis d'hiver étaient déjà pratiqués dans le Sud-Ouest mais les variétés étaient moins productives et nécessitaient une protection phytosanitaire accrue. Sans irrigation, le différentiel de rendement entre printemps (irrigué) et hiver (non irrigué) est de 9 q/ha sur le dispositif expérimental de Toulouse-Auzeville.

Résultats Auzeville 1995-2002 (Nolot & Debaeke, 2003)

	Rendement (q/ha)	Eau d'irrigation (mm)	Pesticides (€/ha)	Marge brute (€/ha)
Pois de printemps (irrigué)	47	45 (25-75)	112	622
Pois d'hiver (irrigable)	48	25 (0-60)	117	669
Pois d'hiver (non irrigué)	38	0	91	475

Cette option pourrait même s'appliquer à l'avenir à des cultures d'été à condition que l'on dispose de variétés plus tolérantes au froid pour envisager un semis d'automne-hiver (Encadré 2). Ainsi, en Espagne du Sud ou au Maroc, le semis d'automne-hiver du tournesol est possible comme l'ont montré Gimeno et al. (1989) et Boujghagh (1990). La consommation d'eau (ETR) a augmenté alors de 30% et l'efficience d'utilisation de l'eau (WUE) de 79% pour les semis d'hiver. Des variétés plus tolérantes au froid doivent cependant être recherchées et une révision complète de l'itinéraire technique est à opérer (désherbage et fertilisation N, protection contre les maladies). Ceci pose un défi majeur pour la sélection et pour l'agronomie.

Encadré 2. Le semis de tournesol d'hiver

Le tournesol est maintenant cultivé le plus souvent dans des milieux où la ressource en eau est très variable (sol, pluie). Sa localisation en zone Sud le prédispose à de fréquents déficits hydriques dès la floraison. En dépit de son bon comportement face à la sécheresse (enracinement profond, ajustement de la surface foliaire…) et de ses possibilités d'esquive (semis précoce, cycle court), il subsiste une importante fluctuation inter-annuelle du rendement et de la teneur en huile.
Etant donné la concurrence croissante pour l'utilisation de l'eau, il est peu probable que le tournesol puisse bénéficier de l'irrigation à l'avenir. Ceci restera vrai même dans le cadre d'une remise à plat des soutiens actuels aux cultures irriguées. Il convient donc de réfléchir aux voies d'amélioration de la productivité du tournesol dans le cadre de contraintes hydriques marquées.

Plusieurs voies d'amélioration de la conduite technique du tournesol peuvent être envisagées pour s'adapter à la contrainte hydrique : sélection et emploi de variétés résistantes à la sécheresse, aptes à maintenir un niveau de rendement satisfaisant en présence de déficits hydriques (Fereres et al., 1986) ; contrôle du développement végétatif par les techniques culturales appliquées au semis du tournesol (densité de peuplement, écartement, fertilisation azotée). On vise ici à augmenter la part d'eau transpirée après floraison par un indice foliaire modéré avant la floraison afin de retarder l'épuisement des réserves du sol et d'augmenter l'indice de récolte (Sadras et Connor, 1991 ; Debaeke et al., 2000).

L'avancée de la date de semis du tournesol est l'une des techniques possibles en zone méditerranéenne pour esquiver le déficit hydrique de fin du cycle. Plusieurs travaux étudient l'intérêt d'une anticipation

d'1 à 2 mois par rapport aux pratiques actuelles (mars-avril). Il pourrait en résulter une augmentation du rendement et une baisse du rapport oléique/linoléique (Flagella et al., 2002).

En région méditerranéenne (Espagne Centre et Sud, Italie du Sud, Portugal, Maroc), plusieurs études ont été menées dans les années 80-90, pour évaluer les potentialités des semis d'automne et d'hiver par rapport aux semis de printemps (par ex. : Gimeno et al., 1989 ; Boujghagh, 1990 ; Rinaldi et al., 1996 ; Anastasi et al., 2000). Cette avancée des dates de semis est entrée dans la pratique en Espagne du Sud et au Maroc. Outre l'esquive des risques de sécheresse, l'avancée des dates de semis présente un intérêt environnemental par le maintien d'une couverture hivernale (fuite de nitrates, érosion).

Sur la base des travaux précédents qui couvrent plusieurs régions, années et variétés, le gain de rendement (en l'absence d'irrigation, toutes choses égales par ailleurs) est de ***5 à 12 q/ha*** *pour un semis de décembre par rapport au semis de mars classique dans ces régions.*
Le rendement huilier et, dans certains cas, la teneur en huile sont améliorés par les semis d'automne et d'hiver. Par contre, les teneurs en acide oléique peuvent chuter en raison de conditions thermiques moins favorables en fin de cycle (Anastasi et al., 2000).
La période de floraison est avancée de ***30-40*** *jours par rapport aux semis classiques.*
Le comportement hydrique du tournesol est nettement amélioré pour 4 raisons principales (Soriano et al., 2004) : a) une augmentation de l'évapotranspiration, liée à la durée du cycle plus longue, à la plus forte pluviométrie et à un enracinement plus efficace en profondeur ; b) une augmentation du rapport transpiration/évaporation liée à un indice foliaire plus élevé pendant les périodes de forte disponibilité en eau ; c) une augmentation de l'efficience de transpiration liée à la plus faible demande évaporative (VPD) ; d) une augmentation de l'indice de récolte, due à l'esquive du déficit hydrique pendant la période post-floraison. L'efficience de l'eau est ainsi améliorée tant pour le grain que pour la biomasse totale. Même si le stock d'eau à la floraison peut être plus faible en raison du fort indice foliaire, la floraison se déroule dans des conditions de plus faible demande évaporative.

Le principal problème concerne la tolérance des variétés aux basses températures. Dans les situations étudiées, les situations gélives sont peu représentées (températures minimales entre 2 et 10 °C) sauf dans les travaux espagnols où des gels de -7 à -9 °C ont été rencontrés. Il est peu mentionné de problèmes de mortalité de plantes sous l'action du froid. Par contre, la période de levée particulièrement longue expose les semences et les jeunes plantules à des risques de prédation et de fonte. Le taux de levée est de ce fait plus faible avec une irrégularité des dates de levée.
La couverture plus lente du sol rend les plantes plus sensibles à la compétition par les adventices. Ce point n'est pas étudié car il s'agit souvent de situations expérimentales contrôlées. Il en va de même pour les dégâts d'oiseaux qui peuvent être plus importants tant à la levée qu'à la maturité.

La possibilité d'avancer la date de semis du tournesol est aujourd'hui une alternative qui mérite d'être étudiée dans le Sud de la France : dans un premier temps, il s'agit de sélectionner pour la tolérance au froid puis d'adapter l'itinéraire technique (désherbage, fertilisation) à ce nouvel ensemble de contraintes.

. Le choix d'une date de semis anticipée au sein d'une même saison (octobre-déc. ou mars-mai)

En conditions méditerranéennes, le **semis précoce d'automne** (dès que les pluies ont débuté) augmente le rendement potentiel car le stock d'eau disponible est supérieur, la floraison anticipée et la répartition de la transpiration entre pré- et post-anthèse optimisée (Turner, 2004b). Le risque provient alors des maladies et du gel tardif qui peut affecter la montaison des céréales. Par contre, les légumineuses (à durée de floraison indéterminée) pourraient tolérer davantage des basses températures survenant de manière intermittente (Turner et al., 2001). Oweis et al. (2005) montrent cependant que la variabilité des résultats pour la féverole en semis précoce (Syrie) reste toujours supérieure à ce qu'on peut espérer avec une irrigation de complément. Il existe une plage optimale à déterminer probablement par modèle : Winter et Musick (1993) montrent au Texas que le semis trop précoce d'un blé d'hiver à l'automne décale fortement la période de consommation d'eau, entraînant une chute du rendement. A l'inverse, un semis trop tardif réduit la capacité d'extraction de la culture par défaut d'enracinement.

En ce qui concerne les cultures semées au printemps, les résultats peuvent être contradictoires :
- comparant 2 dates de semis pour le maïs non irrigué au Kansas (USA), Norwood (2001) montre que les meilleurs rendements et les meilleures efficiences d'utilisation de l'eau sont obtenus pour des semis de début mai (et non de mi-avril), avec des variétés tardives et de fortes densités de peuplement. Les raisons invoquées sont de plus faibles indices foliaires et des croissances racinaires réduites pour des semis effectués en conditions thermiques moins favorables. La consommation d'eau augmente cependant avec la tardivité de la variété.
- à l'opposé, en Israël, Blum (1972) obtient de meilleurs rendements pour le sorgho avec des semis de mi-mars (*versus* mi-avril) car les semis précoces consomment ici moins d'eau pendant les premières phases du cycle (indice foliaire plus faible, plus lent développement racinaire) ce qui permet un maintien prolongé de la surface foliaire. C'est une stratégie de rationnement qui est ici valorisée.

La détermination de la meilleure date de semis par rapport à la gestion de la ressource en eau n'est pas immédiate car bien d'autres facteurs sont concernés : développement des maladies, des adventices, des ravageurs, sensibilité au froid… Semer tôt en automne se justifie dans les situations où le retour des pluies permet le démarrage de la végétation : anticiper sur ce retour permet de valoriser rapidement l'eau disponible. Dans nos conditions, étant donnés la faible avancée de la date d'épiaison que l'on peut en attendre et le fort taux de recharge hivernal, la date de semis à l'automne aura peu d'impacts directs sur la gestion de l'eau sur le plan de l'esquive (par contre, si la croissance du blé est très modifiée par la date de semis, les besoins en eau des semis précoces pourraient être supérieurs).

Au printemps, un semis anticipé peut être justifié à condition que le sol se soit suffisamment réchauffé pour permettre une implantation régulière. Dans le cas contraire, un semis plus tardif permettant une couverture rapide est plus indiqué pour valoriser la ressource en eau.

Cependant, la date de semis est difficile à gérer à l'échelle d'une exploitation (étalement des périodes de semis en fonction de l'organisation des chantiers et du climat) : elle est souvent plus subie que choisie, tout au moins sur une partie de l'exploitation.

. Le semis de variétés plus précoces, aptes à esquiver le stress de fin de cycle et généralement moins exigeantes en eau (couverture rapide du sol, indice foliaire maximal plus faible sauf si augmentation concomitante de la densité de semis)

Faut-il choisir ou non des variétés précoces en conditions hydriques limitantes (irrigation limitée, sécheresse édaphique…) au risque de diminuer le potentiel de production ? C'est une question qui est largement traitée par la littérature, principalement sous climat méditerranéen à sécheresse terminale (Woodruff et Tonks, 1983 ; Gonzalez et al., 1999 ; Debaeke et Aboudrare, 2004).

Les variétés précoces utilisent moins d'eau en raison d'un cycle plus court et d'un indice foliaire réduit. En année favorable, elles sont donc moins productives. A l'inverse, si leur biomasse est réduite, l'indice de récolte peut être amélioré en conditions sèches de fin de cycle.

Blum (1993) met bien en évidence l'interaction entre disponibilité en eau et durée de cycle optimale pour le blé : en présence de stress hydrique (rendement <30 q/ha), la corrélation entre rendement et durée de la phase levée-épiaison (indicateur de précocité) est négative alors qu'en conditions de bonne alimentation en eau (rendement >60 q/ha), ce sont les variétés tardives qui ont l'avantage. Lorsque le stress est modéré, le rendement moyen des variétés testées n'est pas relié à la durée de cycle.

On retrouve de telles relations dans le Sud-Ouest pour le sorgho (Debaeke et al., 2006) : en présence d'irrigation, avantage aux variétés tardives ; en l'absence d'irrigation, peu de différences entre variétés, avec un avantage pour les variétés précoces dès que l'année est plus sèche ou le sol plus superficiel. Les conclusions de Wade et Douglas (1990) en Australie sont similaires, d'où la prescription de variétés à cycle "intermédiaire" si l'on cherche une stabilité du rendement.

De nombreuses études par simulation ont permis de tester les scénarios optimaux en fonction de la variabilité climatique subie. Ainsi, par exemple, à l'aide de simulations avec le modèle de culture STICS, on montre bien l'intérêt des variétés de blé précoces en climat méditerranéen semi-aride ou sub-humide, alors que la réponse est plus aléatoire en climat océanique sub-humide (Debaeke, 2004).

Wahbi et Sinclair (2005) montrent également la supériorité de l'orge (plus précoce) sur le blé en conditions semi-arides.

Cependant les variétés précoces et tardives peuvent aussi différer par d'autres caractères que la durée de cycle et la position des stades sensibles. Gimenez et Fereres (1986) concluent que les variétés tardives de tournesol sont un meilleur choix que les variétés précoces dans le Sud de l'Espagne car leur enracinement plus profond leur permet de valoriser des réserves en eau profondes (c'est le cas dans les sols de vallées à nappe perchée). Blum (1993) remarque que les variétés tardives de blé et de sorgho ont un système racinaire plus développé et plus persistant, facilitant la récupération de la plante après un stress. De la même manière, Deblonde et al. (1999) montrent pour la pomme de terre (en Belgique) que les variétés tardives supportent mieux des contraintes hydriques précoces (modérées). Par contre, la possibilité d'une esquive par des variétés précoces n'a pu être confirmée en présence de contraintes hydriques de fin de cycle, celles-ci étant trop modérées sous le climat en question.

En conclusion, la période optimale pour positionner un cycle de culture dépend étroitement de la variabilité climatique et de l'intensité de la contrainte hydrique. En conditions méditerranéennes semi-arides, le meilleur choix est généralement de privilégier l'esquive par des variétés à floraison précoce alors qu'en conditions plus océaniques (à pluviométrie mieux répartie) la réduction de potentiel est probablement plus pénalisante que le risque de limitation sévère par le stress hydrique.

La décision finale dépend là encore de l'attitude de l'agriculteur par rapport au risque économique et climatique.

2.2.1.2.2. Choix d'espèces d'été intrinsèquement tolérantes à la sécheresse

Ceci passe principalement par le choix de cultures aptes à prélever l'eau en profondeur ou tolérant mieux le défaut d'alimentation en eau par des mécanismes d'adaptation (réduction de la surface foliaire, ajustement osmotique…). Parmi les cultures candidates, citons le sorgho et le tournesol

Le sorgho est une espèce biologiquement proche du maïs, dont l'enracinement est particulièrement efficace en profondeur et qui maintient son activité photosynthétique et transpiratoire pour une gamme étendue d'états hydriques du sol (Krieg et Lascano, 1990);

Le tournesol possède également un système racinaire très efficace en profondeur et s'adapte à la ressource en eau disponible en diminuant sa croissance végétative au profit de la phase de remplissage des graines (Blanchet et Merrien, 1990 ; Unger, 1990)

La littérature abonde en articles consacrés à ces deux espèces qui offrent une alternative intéressante au maïs en situation de pénurie d'eau. Les caractéristiques écophysiologiques qui sous-tendent la tolérance du tournesol et du sorgho par rapport au maïs sont bien explorées (Bremner et al., 1986 ; Rachidi et al., 1993). La Figure 1 illustre la sensibilité de ces cultures à la contrainte hydrique, maïs et tournesol ayant des comportements très opposés. Dans les régions à déficit hydrique estival, il est généralement montré que le rendement du sorgho dépasse celui du maïs en l'absence d'irrigation (Cabelguenne et al., 1982 ; Debaeke et Hilaire, 1997 ; Norwood et Currie, 1997 ; Sinclair et Muchow, 2001).

En outre, tournesol et sorgho mobilisent peu d'intrants chimiques et minéraux et ont en commun un bon profil environnemental (Cetiom, 2001 a-b) : peu de reliquats azotés, possibilités de binage mécanique, peu de maladies nécessitant des traitements chimiques (tolérance variétale)…

L'amélioration génétique du sorgho a beaucoup progressé. Par ailleurs le réchauffement climatique favorise cette culture thermophile. Sur le plan agronomique, cette culture est très bien adaptée aux conditions thermiques et hydriques du Sud de la France mais aussi de Poitou-Charentes dès lors que la ressource en eau est limitée (Encadré 3).

Depuis 1990, les surfaces de tournesol on baissé de 47% en raison des rapports de prix (ex. concurrence avec le blé dur dans le Sud, disparition dans la sole irriguée). Par contre, les sécheresses

récentes ont confirmé la capacité de cette culture à maintenir un rendement satisfaisant dans les situations de contrainte hydrique.

Les freins à la diversification par les cultures d'été en système non irrigué sont d'ordre :

- socio-économique : prix des oléagineux (tournesol) depuis l'Agenda 2000, marchés encore insuffisants pour le sorgho et relatif désintérêt des coopératives (potentiel actuel de 100 000 ha au niveau débouchés, surfaces actuelles de 60 000 ha, en hausse depuis 2 ans) (Encadrés 4-5).
- technique : défauts de productivité pour le tournesol (facteurs limitants difficiles à contrôler : ex. desséchement précoce lié au phoma), difficultés de désherbage chimique pour le sorgho (depuis l'interdiction de l'atrazine)

Encadré 3. Place du sorgho dans les assolements du Sud de la France

(d'après J.L. Verdier, site www.ARVALISinstitutduvegetal.fr)

Un observatoire technico-économique mené pendant 3 ans (2002-2004) par ARVALIS dans 3 régions, Midi-Pyrénées, vallée du Rhône et Poitou-Charentes (21 producteurs), indique que le sorgho est compétitif dans les assolements par rapport aux grandes cultures d'été dominantes (maïs et tournesol). Les marges brutes de ces différentes cultures ont été comparées, les calculs étant réalisés sur la base de la PAC 2006, à savoir un découplage des aides à 75%. En système non irrigué, la marge brute du sorgho est supérieure à celle du tournesol dans les sols à bonne réserve hydrique. En système irrigué, le sorgho est compétitif face au maïs là où le rendement de ce dernier ne dépasse pas 110 q/ha, avec un écart de rendement entre sorgho et maïs jusqu'à 20 q/ha. Par ailleurs, dans le contexte de la nouvelle PAC, le sorgho est une réponse à la diversification des rotations.

***En Midi-Pyrénées (et Poitou-Charentes), un intérêt par rapport au tournesol**. Dans le plus gros bassin de production, le sorgho est majoritairement présent dans les assolements à dominante blé - tournesol des coteaux argilo-calcaires (terreforts) où il est généralement cultivé sans irrigation. Malgré un niveau de charges opérationnelles équivalent à celui du tournesol, le sorgho dégage une meilleure marge brute. Dès lors qu'il est irrigué, malgré des charges opérationnelles plus importantes, la marge brute s'en trouve encore améliorée. Dans le contexte de l'étude, pour atteindre un niveau de marge brute de 400 €/ha, il faut environ 26 q en tournesol, 55 q en sorgho sec et 60 q en sorgho irrigué.*

***En Rhône-Alpes, une alternative au maïs en conditions d'eau limitantes**. En vallée du Rhône (deuxième bassin), le sorgho est en concurrence avec le maïs irrigué. Malgré un niveau de charges nettement plus élevé en maïs, la productivité du maïs assure une marge brute supérieure à celle du sorgho irrigué. En revanche, le sorgho devient compétitif face au maïs là où les écarts de rendement entre les 2 cultures ne dépassent pas 20 q/ha. Le sorgho irrigué, dont les besoins en eau sont plus faibles que ceux du maïs, peut donc être une alternative intéressante au maïs irrigué dans certaines situations où l'irrigation est limitante et où le rendement du maïs plafonne à 110 q/ha.*

	Midi-Pyrénées			Vallée du Rhône	
	Sorgho irrigué	Sorgho sec	Tournesol sec	Sorgho irrigué	Maïs irrigué
Charges* (€/ha)	347	228	227	389	637
Rendement (q/ha)	77	59	25	89	127
Marge brute (€/ha) (PAC 2006)	525	433	371	613	788

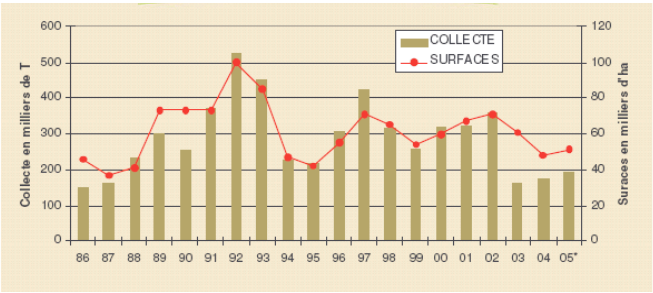
*hors coûts de l'irrigation – Si l'on intègre les coûts de l'irrigation, le différentiel de marge avec le maïs se réduit. Nolot et Debaeke (2003) montrent également l'intérêt du sorgho sec (en sol profond) dans un système sans primes différentielles.

Encadré 4. Marchés et débouchés du sorgho

(source : P. Gatel, AGPB, site www.ARVALISinstitutduvegetal.fr ; Coupiac, 1998)

Après avoir chuté de façon significative depuis 2002, les surfaces de sorgho grain en France amorcent une remontée en 2005, pour s'établir autour de 50 000 ha. Elles avaient atteint le double en 1992, mais la réforme de la PAC a eu un effet négatif. Excepté l'accident de 2003, les rendements ont progressé de 1 q/ha par an au cours des 10 dernières années. Cette progression s'explique par le progrès génétique et l'adaptation des variétés, mais également par l'augmentation de la part du sorgho irrigué (1/4 des surfaces environ). La France est le premier producteur de sorgho de l'union européenne avec environ 50% de la production. L'essentiel des débouchés sur le marché intérieur reste l'alimentation animale. Avec une demande communautaire, principalement en provenance d'Espagne, toujours supérieure au marché intérieur, les utilisations sont bien ajustées à la collecte. Le marché national du sorgho se porte mieux avec un prix qui rejoint celui du maïs en 2005, alors qu'habituellement il est inférieur de 8 à 10%. Ce marché, plutôt porteur actuellement, laisse espérer une augmentation des surfaces, d'autant que le sorgho a une carte à jouer dans le cadre du plan gouvernemental sur les énergies renouvelables puisqu'il est à la fois source d'amidon (bioéthanol) et source de biomasse(thermique et production d'électricité).

Figure 4. Collecte et surfaces du sorgho grain en France (source : Arvalis)



Encadré 5. Le tournesol : une culture qui s'adapte à la ressource en eau disponible et bénéficie de nouveaux débouchés

Les années 2003 et 2004 ont encore souligné les capacités du tournesol à s'adapter aux conditions sèches. Si ses besoins en eau optimaux sont couverts par 420 mm sur l'ensemble de son cycle (pluies et réserves en eau du sol), son système racinaire lui permet également de bien exploiter les réserves disponibles dans chaque horizon. Plus que la quantité, c'est la répartition de cette eau au cours du cycle qui importe : en cas de léger déficit en début de cycle, la plante s'adapte en diminuant sa croissance végétative au profit de la phase de remplissage des graines.

L'huile de tournesol est la première huile alimentaire consommée en France. Ses caractéristiques intrinsèques - apport d'acides gras essentiels et richesse en vitamine E, puissant anti-oxydant - participent à l'image positive de la culture. L'arrivée sur le marché, ces dernières années, de variétés oléiques agronomiquement performantes, offre de nouveaux débouchés :

- *en alimentation humaine, les huiles oléiques sont incluses dans les huiles combinées, type ISIO 4 ;*
- *en tant que culture énergétique, le tournesol oléique, en raison de son indice d'iode bien inférieur à celui du tournesol classique, contribue, en complément du colza, à la fabrication du diester. Sa culture est possible soit sur jachère, soit sur la SCOP où elle bénéficie alors de l'aide aux cultures énergétiques de 45 €/ha ;*
- *en tant que culture industrielle, les variétés à haute teneur en acide oléique offrent des applications prometteuses, surtout dans le domaine des biolubrifiants. Cet usage est lié à la stabilité thermique élevée des huiles très riches en acide oléique (plus de 90%). Ces variétés peuvent alors être cultivées sur jachère.*

Les tourteaux de tournesol constituent par ailleurs une source de protéines qui contribue à réduire l'important déficit protéique européen.

2.2.1.2.3. Choix de variétés intrinsèquement tolérantes à la sécheresse sans changement majeur du cycle cultural

La recherche de variétés tolérantes à la sécheresse est un objectif de sélection majeur à l'échelle mondiale. Il est plus difficile d'évaluer si ce progrès a bénéficié au matériel végétal utilisé dans les conditions françaises. Une évaluation serait opportune notamment pour le maïs, car les références sur les périodes sensibles dates des années 70-80.

Dans les faits, l'offre variétale ne distingue pas explicitement des variétés tolérantes ou non à la sécheresse (au-delà de la précocité). La tolérance intrinsèque des variétés commercialisées n'est pas bien établie : les variétés ne sont pas sélectionnées sur ce critère de tolérance mais sur leur productivité moyenne dans le cadre d'un réseau expérimental couvrant les zones de production pour un petit nombre d'années (les essais conservés étant ceux qui ont une bonne potentialité, les essais ayant subi la sécheresse se caractérisant pas une faiblesse puissance statistique sont logiquement rejetés). Depuis quelques années, le GEVES prévoit 2 conduites (avec et sans irrigation) dans les sites d'évaluation en vue de l'inscription des variétés de sorgho, ce qui peut permettre d'identifier des interactions génotype-milieu-conduite valorisables pour le conseil.

Les catalogues variétaux ne mentionnent pas explicitement de variétés tolérantes à la sécheresse. Une exception concerne les recommandations faites pour le choix de céréales (blé tendre, blé dur) adaptés aux petites régions agricoles (Braun et al., 2006). La tolérance des variétés à gros grains est bien établie pour une sécheresse de post-floraison. Le blé dur serait moins tolérant que le blé tendre à des déficits hydriques précoces. Pour le tournesol, la conclusion est encore que les variétés les plus productives en conduite irriguée le sont également en l'absence d'irrigation (Merrien et Champolivier, 1995).

2.2.1.2.4. Augmenter la disponibilité initiale en eau pour la culture

Maximiser le stockage de l'eau au semis de la culture est une problématique qui concerne en premier lieu les zones méditerranéennes semi-arides pour lesquelles l'essentiel des pluies est hivernale. Il est préconisé un travail minimum avec mulch de résidus pour limiter l'évaporation et faciliter l'infiltration en réduisant le ruissellement, maintenir le sol sans végétation pour limiter les pertes par transpiration, enfin introduire une jachère (plus ou moins longue) pour stocker et conserver l'eau. Ainsi, la pratique du semis direct avec paillis participe à l'économie de l'eau en permettant d'éviter des irrigations au semis (Scopel, 1994).

La littérature est très abondante sur ce sujet (USA, Australie, Proche Orient et Maghreb) et relève de ce que l'on appelle l'aridoculture (Cooper et Gregory, 1987 ; Unger et al., 1991 ; Gerik et Freebairn, 2004).
Dans les régions semi-arides, c'est même la décision de semer une culture ou d'installer une jachère qui dépend de la réserve en eau du sol au semis (Muchow et al., 1994) : on parle alors de 'culture flexible' en fonction de l'eau stockée dans le sol.
Le choix de la culture précédente, l'inclusion ou non d'une jachère et la pratique du travail du sol (avec ou sans mulch) sont des éléments déterminants pour prévoir le stock d'eau au semis de la culture et le rendement de la culture dans les zones semi-arides. Des exemples sont donnés pour le blé d'hiver au Colorado (Nielsen et al., 2002), le blé et le sorgho au Kansas (Norwood, 1994), le tournesol au Maroc (Aboudrare et al., 2006).

Si la fréquence des sécheresses d'automne-hiver devait augmenter dans nos conditions, ces techniques de conservation pourraient alors être considérées. Dans l'état actuel, la fréquence de recomblement de la réserve en eau en sortie d'hiver est élevée sauf en sols profonds et/ou après des précédents à forte extraction en profondeur (tournesol, par exemple) (Debaeke et Cabelguenne, 1994).

On pourrait penser que la pratique des cultures intermédiaires pièges à nitrates contribue à dessécher davantage le profil de sol au printemps : cependant, selon Justes et al. (2002), l'effet positif sur la

réduction de l'évaporation du sol (et sur l'infiltration) compense le supplément de transpiration lié au couvert pourvu que celui-ci soit détruit assez tôt.

Les effets peuvent être variables d'une année sur l'autre et selon le type de sol. Ainsi Wagner-Riddle et al.(1994) en Ontario montrent qu'une destruction tardive du couvert de seigle (1-2 semaines avant semis) peut réduire la quantité d'eau au semis du soja ou augmenter la disponibilité en eau selon les années, selon que l'effet transpiration ou mulch l'emporte. Les effets sur le rendement du soja ne sont pas significatifs cependant. Munawar et al. (1990) au Kentucky obtiennent des effets plus pénalisants sur le rendement du maïs (non irrigué) pour des destructions du seigle peu avant le semis, en raison principalement du dessèchement du profil pendant la phase d'installation du maïs.

Maximiser le stock au semis de la culture n'est pas toujours le meilleur objectif en matière d'efficience de l'eau, en particulier si l'on implante une culture comme le tournesol qui s'accommode très bien d'une sécheresse modérée tôt dans le cycle pour mieux s'ajuster à la sécheresse estivale plus sévère (Aboudrare et al., 2006). Dans le Sud de l'Italie, Rinaldi (2004) a déterminé par simulation avec le modèle CERES-blé que la date de semis optimale pour semer le blé dur était atteinte pour 40-60% de remplissage de la réserve utile et non pour un profil recomblé. Ajoutons à cela qu'un profil hydrique trop proche de la capacité au champ à l'automne ou au printemps augmente le risque de tassement lors des opérations de semis et de récolte avec des conséquences néfastes sur la levée, l'enracinement, le drainage et l'élaboration du rendement en cas de sécheresse printanière ou estivale.

2.2.1.2.5. Réduire les besoins en eau de la culture par une gestion optimale du couvert foliaire

Par la densité de peuplement et la fertilisation azotée, il est possible de piloter le développement de la surface foliaire dans le sens d'une réduction de la transpiration pendant la période végétative afin de reporter l'eau non consommée vers la phase de remplissage (Passioura, 1977). Ceci est particulièrement vrai dans les situations où l'eau est abondante dans la première partie du cycle et déficitaire dès la floraison. Ceci peut conduire à sélectionner des variétés à indice foliaire modéré ou à faible conductance stomatique (Richards, 2006).

Dans le même temps une fermeture rapide du couvert peut être recherchée pour réduire l'évaporation du sol et contrôler les adventices (Soltani & Galeshi, 2002). Là encore la stratégie optimale résulte de la confrontation de cette stratégie à la fréquence des événements de sécheresse.

La **densité de peuplement** (en interaction avec l'écartement entre rangs) modifie la consommation d'eau des cultures. Le rapport évaporation / transpiration tend à diminuer dès lors que la fermeture du couvert est plus précoce (densités élevées, écartements réduits). Cependant, lorsque l'eau disponible dans le sol est limitée, on recommande en général de réduire la densité de plantes pour augmenter la quantité disponible par plante. Anderson (1984) en Australie montre que la densité optimale pour le triticale est de 80 à 190 plantes/m² selon les rendements accessibles (21-69 q/ha selon la pluviométrie). Cependant, Turner et al. (1994) concluent que la réduction de la densité de peuplement du blé pour diminuer l'eau consommée en non irrigué n'est pas toujours la meilleure stratégie car le rendement peut être fortement réduit : plus forte sensibilité à une mauvaise levée qu'en irrigué, sensibilité du tallage tardif lié aux faibles densités… Van den Boogard et al. (1996) montrent bien que l'effet de réduction de l'évaporation du sol par une augmentation de la densité de peuplement chez le blé peut aussi être supprimé par un supplément de consommation au cours de la saison, ce qui ne donne pas de poids très évident à la densité de peuplement.

A Toulouse, on montre qu'à même précocité, en sol profond, la densité optimale est de 74 000 plantes/ha pour un tournesol irrigué et 63 000 plantes/ha sans irrigation d'appoint (Debaeke et Nolot, 2000). De même, l'intérêt de réduire la densité de peuplement en sorgho pour s'ajuster à la disponibilité hydrique a été confirmée : la densité de semis préconisée en sol moyennement profond non irrigué est réduite de 25 à 40% (selon la précocité de la variété) par rapport aux conditions bien irriguées (ITCF, 2002) (Tableau 5).

Tableau 5. Adaptation de la densité de semis du sorgho grain à la précocité et à la disponibilité en eau (densités de semis recommandées en milliers de grains par hectare)

Groupe de précocité	Sols moyennement profonds en sec	Sols profonds en sec ou moyennement irrigués	Sols bien irrigués
Très précoce	350	400	450
Précoce	270	340	400
Demi-précoce	200 à 220	250 à 270	310 à 340
Tardif	160	210	260

Source : ITCF, 2002

Connor et Loomis (1991) ont discuté le choix de l'écartement entre les rangs au semis. Ils concluent ainsi que si la culture dépend pour sa production de l'eau stockée dans le sol au semis, le choix d'écartements larges est approprié car l'évaporation sera faible (en l'absence de pluies significatives) et la consommation de l'eau stockée sera progressive. A l'inverse, si on peut espérer une pluviométrie significative au cours du cycle, il est préférable de choisir des écartements étroits. On se place en général dans ce cadre pour les systèmes de culture français.

Cependant le choix d'une densité de plantes et d'une largeur d'interrang peut interférer avec les objectifs du désherbage (semis dense pour contrôler les adventices, large interrang pour intervenir mécaniquement) : il est en effet vital de préserver l'eau pour la fin de cycle en évitant une consommation précoce par les mauvaises herbes.

De la même manière, l'augmentation de la **fertilisation azotée** favorise le rapport Transpiration/ Evaporation, en particulier en céréales (Anderson, 1985 ; Cooper et Gregory, 1987). L'apport d'azote (et dans certains cas de phosphore) peut augmenter la longueur racinaire et la profondeur d'enracinement et donc l'extraction d'eau (Gregory et al., 1984 ; Brown et al., 1987). A l'inverse, des doses excessives d'azote, responsables d'une croissance précoce et d'un fort indice foliaire en période végétative contribuent également à l'épuisement précoce de la réserve en eau avec des conséquences négatives pour le remplissage du grain (Cantero-Martinez et al., 1995). C'est le concept de 'haying-off' qui est développé par les Australiens (Herwaarden et al., 1998) et qui est toujours lié à une utilisation excessive d'azote (précédent légumineuses responsable d'une forte croissance précoce du blé, par exemple). La sensibilité intrinsèque de la plante au stress hydrique serait augmentée en cas de forte teneur en azote des tissus (Fischer, 1981).

L'application d'azote doit donc bien se conformer à un objectif de rendement atteignable (selon les disponibilités en eau) à l'aide de bilans prévisionnels qui tiennent compte explicitement du facteur hydrique pour calculer l'efficacité de l'azote (Westfall et al., 1996 ; Nolot et Debaeke, 2001). Ainsi, en zone méditerranéenne, le blé d'hiver ne répond pas à la fertilisation N si la pluviométrie est inférieure à 450 mm au cours du cycle (Lopez-Bellido et al., 1996).

L'époque d'application doit être guidée par l'humidité du sol. En région plus aride, tout ou partie de l'azote est appliqué au semis et enfoui pour prévenir les pertes gazeuses et maximiser son utilisation. Cette application unique n'est pas toujours la solution optimale pour s'ajuster à la pluviométrie saisonnière (Nordblom et al., 1985). Le risque de lessivage hivernal doit être considéré pour des applications au semis des cultures d'hiver. Des applications fractionnées sont recommandées, la dose appliquée au début de la montaison permettant de s'ajuster à la pluviométrie hivernale qui fixe le rendement accessible. Si l'hiver est sec, on doit craindre des pertes d'azote par volatilisation surtout en sols calcaires (Vlek et al., 1981 ; Harmsen, 1984). L'efficience de capture de l'azote à la récolte varie de 20 à 80% selon le type d'engrais, la date et la méthode d'application de l'azote, le type de sol et le climat de l'année (Garabet et al., 1998).
Dans nos conditions, les apports en végétation (3e apport sur blé ou fractionnement sur tournesol) seront rarement limités par la pluviométrie. Cependant, l'incorporation de l'azote par le binage est une méthode pratiquée pour augmenter sa disponibilité pour la culture.

L'apport d'azote sur céréales reste une stratégie à recommander en zone semi-aride même en l'absence d'irrigation, car les effets positifs liés à l'augmentation de l'indice foliaire et à sa durée l'emportent *in fine* sur la sur-consommation d'eau que cela provoque (Latiri-Souki et al., 1998). Là

encore, le bénéfice final dépendra de la fréquence et de l'intensité de la sécheresse et des quantités et périodes d'application de l'azote.

Du fait d'effets contradictoires[2], seul un modèle de simulation sol-plante-itinéraire technique prenant en compte la variabilité climatique et l'intensité des contraintes, permettra d'évaluer les stratégies de rationnement (et d'esquive) pour nos conditions de milieu, car l'expérimentation classique ne peut prendre en charge l'extrême variabilité inter-annuelle et intra-saisonnière des précipitations, la gamme très large des scénarios culturaux à tester et les interactions qui en résultent (Sivakumar et Glinni, 2002).

2.2.1.2.6. Conclusion pour les systèmes non irrigués

En l'absence d'irrigation, la clé de l'adaptation à la sécheresse réside dans la diversification des cycles culturaux et des espèces (céréales, protéagineux, oléagineux) afin de répartir les risques climatiques et de disposer de solutions d'esquive. On peut proposer la typologie suivante selon la réserve utile du sol :

• petites terres à cailloux, à faibles réserves en eau (RU < 100 mm), parfois pentues (rendzines en région Centre, groies superficielles de Poitou-Charentes, argilo-calcaires superficiels en Midi-Pyrénées...). Seules les cultures d'hiver (colza, blé ou orge) sont envisageables. Un travail du sol superficiel avec mulch est recommandé pour conserver l'eau (évaporation, infiltration). La sensibilité de ce système de culture à la sécheresse reste cependant forte. De plus, la monoculture de type hiver et les résidus en surface favorisent le développement des adventices et des pathogènes qui se conservent sur les pailles.

• sol moyennement profonds, à réserve utile de 120-180 mm (terrefort moyen en Midi-Pyrénées, groies profondes en Poitou-Charentes…). L'introduction de cultures d'été tolérantes à la sécheresse comme le tournesol ou le sorgho permet de diversifier la succession, de répartir les pointes de travail et les risques climatiques.

• sols de vallées profonds, à réserve utile supérieure à 200 mm. On peut y cultiver du maïs sans irrigation (pour l'ensilage) ou d'autres espèces valorisant bien une forte disponibilité en eau (soja). Les possibilités de diversification y sont maximales.

Diversifier davantage les successions de culture par des espèces d'hiver ou des espèces tolérant la sécheresse est un impératif pour assurer la durabilité de ces systèmes en sec dans un contexte de sécheresse plus fréquent (répartir les risques, éviter les problèmes parasitaires et le salissement des sols). On peut invoquer ici la notion d'auto-assurance pour l'agriculteur.

Il existe des possibilités de diversification (aspects économiques, débouchés, aspects agronomiques pour la rotation) au-delà du sorgho et du tournesol :
- introduction de légumineuses d'hiver : lupin (sol acide), féverole, pois (sol non caillouteux), pois chiche, lentilles, haricots… (cf. Turner et al., 2001 pour les systèmes méditerranéens)
- lin d'hiver
- autres cultures d'été tolérantes à la sécheresse, par exemple le carthame (cultivé en Espagne et en Italie pour des usages industriels : acide linoléique) ; des essais ont été menés dans le Sud-Ouest de la France.

Cependant ces cultures sont des niches commerciales et leur extension sera limitée.
Le développement des cultures énergétiques est une opportunité pour le colza et le tournesol (filière biodiesel) que l'on peut considérer comme positive pour l'économie d'eau.

[2] Par exemple, diminuer l'évaporation précoce par une fermeture rapide du couvert est-elle compatible avec un rationnement de la culture destiné à reporter l'eau disponible pour la période reproductrice ?

Idées principales

- Diversifier davantage les successions de culture par des espèces d'hiver ou des espèces tolérant la sécheresse est un impératif pour assurer la durabilité des systèmes en sec dans un contexte de sécheresse plus fréquent (répartir les risques, éviter les problèmes parasitaires et le salissement des sols).

- Les stratégies d'esquive avec utilisation de variétés très précoces n'auront un intérêt en moyenne que pour des situations à sécheresse terminale ou à très faible réserve utile.

- Le rationnement par la densité de semis ou l'azote consistera à éviter les excès végétatifs précoces, ce qui aura également des impacts positifs pour les maladies ; un ajustement du raisonnement des intrants au rendement accessible sans irrigation apparaît suffisant.

- On peut classer les stratégies d'adaptation en 4 groupes d'intérêt décroissant (efficacité potentielle et probabilité d'obtenir le résultat voulu par rapport à l'objectif de conservation de l'eau pour la culture) : 1. esquive (cultures d'hiver) ; 2. tolérance (cultures d'été) ; 3. esquive (variétés de cultures d'été précoces) ; 4. évitement (rationnement de la culture), cette dernière étant la plus aléatoire et d'efficacité réduite.

2.2.1.3. Cas des systèmes fortement irrigués

Les cultures irriguées bénéficient dans la plupart des cas d'une ressource en eau suffisante pour couvrir les besoins en eau des années sèches. Depuis quelques années cependant, le contexte hydraulique évolue et le nombre de petites régions concernées par des ressources en eau limitées augmente :
- les besoins des autres usagers de la ressource en eau deviennent plus importants : eau potable, respect des débits objectifs d'étiage des rivières (dont les seuils ont été relevés depuis quelques années) pour la salubrité et la faune aquatique, tourisme...
- retour d'un cycle de sécheresse à la fois estivale et hivernale (ne permettant pas la reconstitution de la ressource sur certains bassins).

Plusieurs voies peuvent être explorées pour adapter la nature des systèmes de culture et leur conduite à des disponibilités en eau d'irrigation limitées ou pour réaliser des économies d'eau même là où la ressource est aujourd'hui accessible :
- réduire le besoin en eau d'irrigation de la culture, en acceptant une perte de rendement (mais pas obligatoirement de revenu) moins que proportionnelle à la réduction du volume apporté ;
- réduire le volume d'irrigation en ne satisfaisant pas complètement le besoin de la culture ;
- optimiser la valorisation de l'eau disponible en diversifiant les calendriers d'arrosage et les cultures irriguées ;
- optimiser l'efficacité de l'eau apportée dès lors que l'arrosage est justifié.

Pour cela, des indicateurs, méthodes et modèles peuvent être proposés afin d'éclairer la décision des irrigants :
- avant la campagne d'irrigation, sur les choix de culture et les règles d'action concernant l'irrigation ;
- pendant la campagne d'irrigation, sur le déclenchement et l'arrêt de l'irrigation.

2.2.1.3.1. Réduire le besoin en eau d'irrigation par le choix variétal (cas du maïs)

Dans un contexte de dates d'arrêt très précoces de l'irrigation de fin de cycle et d'épuisement progressif de la réserve hydrique (cas du Centre-Ouest), la stratégie d'esquive du stress par avancée des stades les plus sensibles du maïs a été testée récemment (Lorgeou et al., 2005, 2006). Cette stratégie basée sur l'utilisation de variétés à cycle plus court doit également permettre une économie d'eau d'irrigation. Ceci a été montré par simulation sur d'autres espèces (par exemple le blé d'hiver, Debaeke, 2004). Des références expérimentales sur maïs montrent la réduction de la consommation

d'eau pour des variétés plus précoces : -50 à -60 mm pour une variété du groupe 2 par rapport à une variété du groupe 4, pour une baisse de 10% du rendement en moyenne (Marty et al., 1975).

Ce type d'esquive se justifie peut-être moins dans le Sud-Ouest (températures plus élevées, ressources en eau moins limitantes, probabilité de retour des pluies en fin d'été plus grand).
Par ailleurs, l'augmentation des températures depuis 1-2 décades a déjà permis une avancée des dates de semis du maïs d'environ 1 mois (De La Torre et Benoit, 2004).

En Poitou-Charentes (sol de groies), l'emploi de variétés demi-précoces semées assez tôt a, par exemple, permis une esquive de la sécheresse effective en 2005 (la floraison est atteinte dès la fin juin) L'appropriation de cette tactique d'esquive a été très rapide. Les expérimentations sur ce thème se poursuivent pour en confirmer l'intérêt sur plusieurs années et dans différentes régions (**Encadré 6**). Cette adaptation peut présenter des limites là où les sols se réchauffent plus lentement (boulbènes du Sud-Ouest).

Encadré 6. Le semis de variétés de maïs précoces et demi-précoces

La stratégie d'esquive en maïs vise à reporter l'apparition du stress hydrique le plus tard possible dans le cycle de la culture. L'idéal serait de reporter l'apparition du stress 15 jours après la floraison femelle, c'est-à-dire après la phase la plus sensible de formation des grains. Pour avancer la floraison femelle, on peut avancer la date de semis (< 20 avril en Poitou-Charentes, Centre-Ouest), éviter d'utiliser des variétés trop tardives, éviter les hybrides à floraison précoce mais à longue période post-floraison, utiliser des hybrides un peu plus précoces. La perte de potentiel dans ce cas doit être compensée par un gain d'esquive. Pour cette raison, on ne peut choisir des variétés différant trop de la gamme de maturité habituelle. Cette stratégie peut aussi intéresser les systèmes irrigués et réduire ainsi non seulement les volumes d'irrigation mais aussi les frais de séchage et permettre une meilleure implantation des cultures d'hiver suivantes.

Un travail expérimental a été conduit en 2005 pour tester ces hypothèses dans un contexte climatique très propice à l'évitement. L'utilisation de variétés demi-précoces (au lieu de variétés demi-tardives ou tardives) en situation restrictive en eau dès fin juillet (i) est autant voire plus rentable, (ii) permet l'économie du dernier tour d'eau, (iii) une économie de frais de séchage qui compense en partie la baise de rendement due à la précocité, (iv) une avancée des dates de récolte. En 2005, le gain de rendement net (séchage inclus) a été de 4-5 q/ha pour les variétés demi-précoces avec arrêt d'irrigation précoce fin juillet, alors qu'en situation potentielle (irrigation sur tout le cycle), la perte est de 4-6 q/ha pour ces mêmes variétés comparées aux variétés plus tardives.

Comme les variétés précoces ont progressé en rendement, on peut choisir des variétés de série 13 (demi-précoces) contre 14 ou 15 et plus (tardives), en semant plus dense (autour de 100 000 plantes/ha) et en semant tôt (1re décade d'avril), ce qui est possible sur des sols argileux se réchauffant rapidement. Ceci permet un arrêt plus précoce des irrigations (mi-août), une économie d'1-2 tours d'eau, une économie de séchage, une récolte plus précoce en conditions plus favorables (fin septembre) : la perte de rendement serait de 10-15% par rapport aux variétés tardives.

Si l'objectif est de réduire le recours à l'irrigation, le choix de variétés demi-précoces de maïs paraît justifié : la consommation sera peu affectée jusqu'à la floraison, l'indice foliaire des variétés de maïs différant principalement par le nombre de feuilles ; par contre l'indice foliaire maximal et la durée de surface foliaire seront différentes avec des conséquences positives sur la transpiration. Cependant les possibilités de récupération sont plus limitées si le cycle est court. Si l'irrigation démarre plus tôt, la concurrence avec l'irrigation des cultures de printemps pourrait survenir. Lorgeou et Martin (2005) soulignent la réussite variable de cette stratégie d'esquive et de rationnement selon les régimes pluviométriques, les différences de précocité utilisées et le potentiel de rendement. Là encore, la simulation permettrait de donner des réponses plus nettes que l'expérimentation à condition d'avoir paramétré les modèles sur ces variétés demi-précoces.

2.2.1.3.2. Pratiquer une irrigation restrictive (cas du maïs) *(Deumier et al., 2006a)*

. Les besoins en eau d'irrigation du maïs en ressource confortable

Pour l'irrigation du maïs-grain, selon une norme couramment admise, on considère que les moyens d'irrigation (débit et volume) doivent permettre de satisfaire les besoins en eau au moins 8 ans sur 10. Quand on dispose de ces moyens, la stratégie d'irrigation, c'est-à-dire le plan prévisionnel d'arrosage, est construit sans craindre a priori une insuffisance de la ressource par rapport aux besoins.

Selon les conditions pédoclimatiques, le niveau des moyens en débit et en volume nécessaire est évidemment différent. Il dépend de la demande climatique et de la contribution possible des réserves en eau des sols.

Le Tableau 6 indique les références disponibles par région et type de sol (valeur de réserve utile). Certaines références ont été acquises à partir d'essais irrigation, d'autres sont le fruit d'une expertise. Elles correspondent à des variétés de précocités normales pour la région considérée (semis fin avril - début mai et maturité en octobre), irriguées par aspersion selon une stratégie visant un haut rendement sans gaspillage.

Tableau 6. Besoins en eau d'irrigation du maïs selon les pédoclimats

Régions	Type de sol	Réserve Utile (mm)	Moyens d'irrigation nécessaires pour couvrir les besoins de 8 ans sur 10		
			Débit (mm/jour)	Exemple dose/fréquence	Volume (mm)
Alsace	Hardt superficielle Plaine de l'Ill	40-50 > 140	5 3.5	30 mm tous les 6 jours 35 mm tous les 10 jours	240 180
Centre	Limons argileux profonds Limons moyens Argilo-calcaires	> 130 80-130 60-120	3 3.5 4 - 4.5	30 mm tous les 10 jours 25 mm tous les 7 jours 30 mm tous les 7 jours	180 200 240
Poitou-Charentes et Pays de la Loire	Limons profonds Limons moyens Groies moyennes	> 150 100-150 70-130	3 - 3.5 3.5 - 4 4 - 4.5	30 mm tous les 10 jours 25 mm tous les 7 jours 30 mm tous les 7 jours	160 - 190 190 - 220 230 - 270
Aquitaine	Boulbènes sableuses moyennes Sables du Marsan Alluvions de l'Adour Champagne moyenne	140 90 120 120	-	-	170 - 240 190 - 260 190 - 240 260 - 310
Nord Midi-Pyrénées	Boulbènes moyennes à profondes Boulbènes superficielles	120-160 80-120	4.3 5	30 mm tous les 7 jours 25 mm tous les 5 jours	240 270
Sud Midi-Pyrénées	Boulbènes moyennes à profondes Boulbènes superficielles	120-160 80-120	3.8 4.5	27 mm tous les 7 jours 23 mm tous les 5 jours	200 240
Rhône-Alpes	Graviers prof. (plaine de Lyon) Graviers sup.(plaine de l'Ain) Graviers superficiels (Drôme) Limons sableux terrasses (Drôme)	130-150 70- 80 70-80 130-150	4.5 5 5.5 4.5	35 mm tous les 8 jours 25 mm tous les 5 jours 28 mm tous les 5 jours 32 mm tous les 7 jours	250 300 350 - 400 320

Sources : essais irrigation ARVALIS - Institut du végétal ou expertise avec partenaires

C'est par rapport à ces valeurs de référence, que l'on peut apprécier dans chaque situation l'intensité et le type de restriction auxquels on est confronté et qui nécessiteront une stratégie d'irrigation adaptée.

Les cas de figure et les scénarios de restriction sont en fait très variés : la restriction peut concerner le volume ou le débit ou intervenir à partir d'une certaine date.

Il faut distinguer aussi plusieurs cas :

- le cas où la ressource est strictement individuelle et facile à connaître en début de campagne (lacs collinaires). L'irrigant a la maîtrise du calendrier d'utilisation de sa propre ressource.
- le cas des lacs collinaires collectifs est équivalent au précédent si la répartition des volumes entre préleveurs (et son contrôle) sont stricts et si le volume attribué à chacun peut lui être garanti.

- le cas où la ressource commune est gérée par un acteur extérieur dont les décisions dépendent de son appréciation de l'état initial et de l'évolution de la ressource au cours de la campagne. Cette évolution peut dépendre en partie (mais pas systématiquement) des prélèvements des irrigants. Cela peut se traduire pour chaque irrigant par la révision d'un quota de volume en début de campagne ou en cours de campagne ou la diminution du temps d'accès à la ressource.

Dans les cas de ressources communes, la gestion optimale de la ressource estimée comme insuffisante peut passer par des échanges d'informations entre les irrigants, leurs représentants et le gestionnaire. Dans certains cas, une partie de la stratégie d'irrigation peut avoir une dimension collective, la stratégie individuelle doit alors être en cohérence avec ce niveau collectif.

. Ressource restrictive : cas du volume limité

C'est le cas (i) d'un lac collinaire individuel ou collectif moins rempli qu'à la normale ou bien associé à une surface à irriguer importante sans que le débit soit limitant ; (ii) de la restriction d'un quota de volume dans le cadre de la gestion collective d'un volume limitant ; (iii) d'une gestion volumétrique sur une nappe déficitaire.

Pour définir une stratégie, la première étape consiste à estimer le volume disponible par hectare.
Il faut ensuite tenter d'éviter deux risques opposés : celui de l'optimiste qui commencerait à irriguer comme si le volume n'était pas limitant et qui n'a plus d'eau quand les besoins sont encore importants et celui du pessimiste qui, à force de garder de l'eau de peur d'en manquer ensuite, fait souffrir sa culture, perd du rendement et ne consomme finalement pas toute l'eau dont il dispose.
Pour répartir les risques, mieux vaut préférer les doses unitaires modérées et déterminer le nombre d'irrigations possibles. Ainsi pour un volume de 1500 m^3/ha (150 mm), 6 irrigations de 25 mm valent mieux que 5 irrigations de 30 mm et mieux que 4 irrigations de 38 mm.
Pour optimiser l'utilisation du volume disponible, il est intéressant d'établir un calendrier prévisionnel en privilégiant les périodes les plus sensibles de la culture et notamment la montaison, la période encadrant la floraison et le début du remplissage des grains (exemple, Tableau 7) :

Tableau 7. Exemple de calendrier d'irrigation restrictive pour le maïs si le volume est limité

Volume disponible	5 juillet	15 juillet	25 juillet (floraison femelle)	4 août	14 août	1er septembre Hum. du grain 50%
150 mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm	-

Source : Deumier et al. (2006)

Ce calendrier prévisionnel doit ensuite être adapté en cours de campagne en fonction du climat : suivre l'évolution des stades de la culture, profiter des pluies pour reporter les irrigations et mieux couvrir les périodes sensibles ultérieures.

Le premier indicateur de pilotage est évidemment le volume disponible restant en fonction du stade de la culture. Une estimation satisfaisante des volumes est alors indispensable : contrôle par compteur, vérification des réglages du matériel.

. Ressource restrictive : réduction du débit ou du volume d'irrigation à une certaine date

Cette situation est la conséquence d'une baisse du niveau de la ressource en eau : débit des rivières ou des nappes. Elle est de plus en plus accompagnée de mesures réglementaires : réduction d'un volume alloué à la semaine ou à la décade, interdiction d'irriguer certains jours de la semaine ou une partie de la journée. Ces mesures réglementaires sont souvent prévues avant la campagne d'irrigation (arrêté cadre) moyennant des indicateurs mesurés : débits des rivières ou niveau des nappes.

Ces limitations de débit se produisent le plus souvent en fin de période d'irrigation au mois d'août, la ressource ayant été fortement mise à contribution les semaines précédentes. La date d'apparition de la contrainte et son intensité sont souvent peu prévisibles a priori à cause de la variabilité du climat, des prélèvements et de la connaissance imparfaite de la ressource. Aussi est-il difficile de déterminer un objectif de rendement.

C'est dans cette situation hydraulique que la diversification de la sole maïs avec une stratégie d'esquive peut être intéressante. Implanter tôt des variétés plus précoces que la pratique régionale normale permet de raccourcir la période d'irrigation et de mieux échapper aux restrictions de fin de cycle.

Quelle stratégie d'irrigation adopter ?

Pendant la période sans contrainte d'utilisation de la ressource :

Compte tenu de l'incertitude sur la date d'apparition de la contrainte et sur son intensité, l'objectif est généralement de viser un rendement correct qui sera atteint si la contrainte reste modérée. La méthode de pilotage IRRINOV® (Deumier et al., 2005) est bien adaptée pour piloter l'irrigation au mieux durant cette période. En particulier la mesure de la tension en eau du sol permet, en utilisant les seuils proposés par la méthode, de bien gérer le déclenchement des irrigations, la reprise des tours d'eau et la durée d'interruption des irrigations après les pluies. On évite ainsi des irrigations trop précoces et trop élevées qui auraient un effet négatif sur la ressource.

Pendant la période avec restriction d'utilisation de la ressource :

La marge de manœuvre est bien sûr plus limitée. Si la contrainte est modérée, les seuils IRRINOV® restent de bons indicateurs. Si la contrainte est plus forte, elle dicte elle-même le rythme des irrigations. Dans certains cas, il est possible de faire une modulation des apports selon les parcelles ou les positions d'irrigation si celles-ci sont situées sur des sols avec des réserves en eau différentes : on peut diminuer la dose ou espacer davantage les apports sur les positions ou parcelles en sols plus profonds.

S'il reste de l'eau pour irriguer, il est important de bien raisonner l'arrêt des irrigations. Dans ce contexte hydraulique, le stade repère "humidité du grain 50%" (Deumier et al., 2001) sera atteint tôt et la réserve en eau du sol aura été fortement mise à contribution (tensions en eau du sol à 30 cm et 60 cm supérieures à 90 cbar en sol limoneux et à 120 cbar en sol argileux et déficit en eau du sol supérieure à 100 mm).

. Ressource restrictive : une surface irriguée trop élevée par rapport au débit de l'installation d'irrigation

Dans cette situation, l'objectif n'est pas d'obtenir le rendement potentiel du maïs tous les ans. On accepte un rendement réduit en année très sèche et sèche mais on souhaite obtenir un bon rendement en année à déficit hydrique modéré. Le scénario climatique de la future campagne n'est pas connu mais on sait que les besoins en eau de pointe se situent pour le maïs en juillet.

Par exemple, en région toulousaine, le maximum des besoins journaliers médians du maïs est atteint le 20 juillet pour une variété tardive semée le 1er mai (Figure 5), la date de ce maximum variant du 13 juillet au 30 juillet.

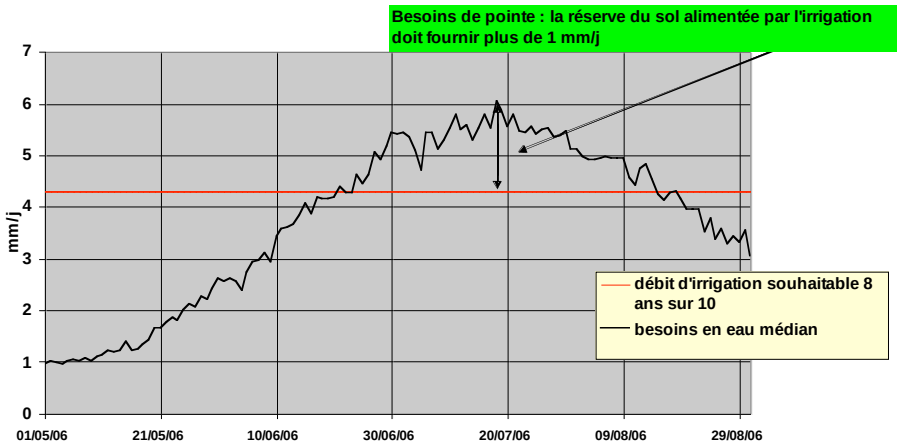


Figure 5. Besoin en eau journalier médian du maïs (kc ETP) et débit d'irrigation souhaitable en sol de boulbènes moyennes de la région toulousaine (Toulouse-Blagnac, 1986 à 2005)
(source : Deumier et al., 2005)

Pour les sols de boulbènes moyennes, on considère qu'une bonne installation d'irrigation doit pouvoir délivrer 4,3 mm/j pour que la réserve en eau du sol soit suffisante pour écrêter les besoins de pointe du mois de juillet en année sèche : le sol doit alors fournir plus d'1 mm d'eau par jour en juillet. C'est pour cette raison que les irrigations doivent commencer tôt en juin, bien avant que le maïs ne manque réellement d'eau.

Ici la capacité d'irrigation de l'installation étant réduite par l'augmentation de la surface irriguée, cette anticipation des apports d'eau par rapport aux besoins devra être encore plus importante et durer plus longtemps.

La conduite d'irrigation dans cette situation est la suivante :
- irriguer tôt dès que la dose d'irrigation peut être stockée dans le sol,
- valoriser les pluies au mieux : pour cela diminuer le temps de pause après une pluie,
- si l'organisation du travail le permet, utiliser des doses d'irrigation modérées de l'ordre de 10-15 mm en pivot, 25-30 mm en enrouleur et maintenir la fréquence.

Les seuils tensiométriques de la méthode IRRINOV® ont été établis pour des ressources en eau et des installations d'irrigation confortables : cependant ces seuils sont valables pour des augmentations de surface de maïs de l'ordre de 15%. Les valeurs seuils diminuées de 10 à 20 cbar permettent de gérer les irrigations pour des augmentations de surface de 25%.

Idées principales

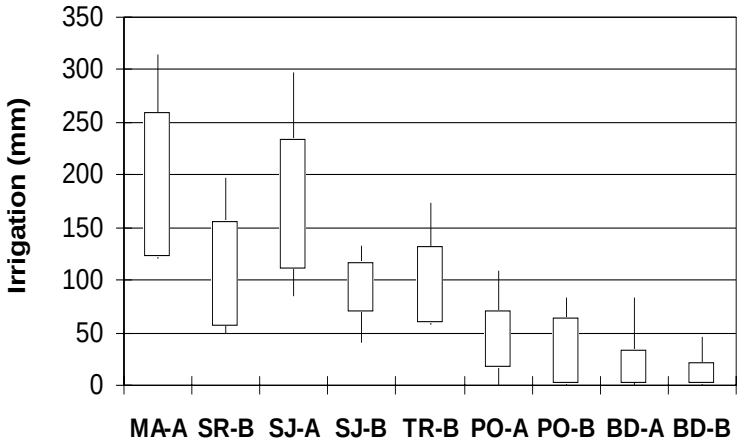
Si le volume ou le débit d'irrigation sont limitants pour le maïs, plusieurs principes peuvent être mis en jeu (en combinaison avec le choix variétal) pour piloter une irrigation restrictive :
- *réduire les doses élémentaires et augmenter le nombre d'apports,*
- *établir un calendrier prévisionnel d'apport en privilégiant les périodes les plus sensibles ; stopper l'irrigation pour une humidité du grain de 50% ; ne pas démarrer trop tôt…*
- *adapter le calendrier au climat en décalant les irrigations après une pluie.*

2.2.1.3.3. Allouer la ressource en eau de manière optimale au sein de l'assolement irrigué

L'adaptation aux ressources limitées peut se faire de 2 manières :
- répartir les cultures de l'assolement selon les types de sol en tenant compte de leur tolérance relative à la sécheresse (cas de la sole non irriguée) ;
- ajuster l'assolement à la disponibilité en eau, aux moyens d'arrosage et à la rentabilité des productions ; l'irrigation maximale n'est pas toujours la plus rentable (si l'on tient compte du temps de travail) ; on peut avoir intérêt à irriguer peu un grand nombre de productions réputées tolérantes à la sécheresse (sorgho, tournesol), jouer sur l'étalement du calendrier d'irrigation par l'introduction de cultures semées tôt au printemps ou en hiver (pois, céréales) et pouvant valoriser en mai une eau peu utilisée par ailleurs.

Un certain nombre de cultures peuvent également valoriser de plus faibles apports d'eau que le maïs (Jacquin et al., 1993 ; Hergert et al., 1993 ; Balas et al., 1995 ; Bouthier et al., 1995 ; Debaeke et Hilaire, 1997). Les volumes d'irrigation moyens appliqués pendant 8 ans à Toulouse sur la base de règles de décisions tenant compte de la sensibilité de la culture varient en effet de 45 mm (1 an / 4) pour le blé à 200 mm pour le maïs (Nolot et Debaeke, 2003). Le besoin en irrigation diffère ici selon l'objectif de rendement et la disponibilité en eau (A > B) (Figure 6).

D'après ARVALIS-Institut du Végétal, pour couvrir les besoins en eau des cultures 8 années sur 10, les volumes d'irrigation à apporter sur maïs varient de 150 à 350 mm pour le maïs selon les climats et les sols, de 120 à 180 mm pour la pomme de terre (sol limoneux : Picardie, Nord), de 60 à 120 mm pour le pois de printemps et le blé selon les profondeurs de sol (région Centre et Poitou-Charentes). Dans ce dernier cas, les besoins sont de 40 à 80 mm pour une couverture 5 années sur 10.



A : irrigation non limitante ; B = irrigation limitée.
MA : maïs, SR : sorgho, SJ : soja, TR : tournesol, PO : pois, BD : blé dur.

Figure 6. Variabilité des apports d'eau en sol limono-argileux profond en fonction de la culture, de l'année et de l'itinéraire technique (Toulouse, 1995-2002) : écart-types et valeurs maximales (Source : Nolot et Debaeke, 2003)

Irriguer d'autres cultures que le maïs se pose à nouveau aujourd'hui :

- **Céréales à paille** (Bouthier, 2005)

L'irrigation des céréales (blé tendre, blé dur, orge de printemps) peut s'envisager dans 2 contextes :
- objectif d'atteinte régulière de rendements élevés ; c'est le cas des irrigants qui ont diminué les surfaces irriguées en été au profit des irrigations de printemps (céréales, pois). La ressource en eau est en général suffisante au printemps pour les céréales ;
- irrigation d'appoint les années sèches pour préserver un niveau de rendement 'moyen', dans un contexte de disponibilité en eau pour l'irrigation limitée au printemps.

Le volume d'irrigation pour couvrir les besoins des céréales est de 40 à 80 mm en année moyenne et de 60-120 mm en année sèche (1 an / 5), selon une gamme de profondeurs de sols. La période où l'apport est le plus efficace se situe du début gonflement à floraison + 10 jours. Des irrigations peuvent démarrer 15-20 jours après le stade épi 1 cm si l'année est sèche.

Le gain de rendement est de 6 à 8 q/ha pour un apport de 30 mm (Le Magneraud, 1996-2003), avec une meilleure réponse en sol superficiel. En effet en sol profond, les capacités de compensation des stress subis début montaison sont supérieures. La réponse est maximale si la sécheresse est précoce comme en 1997 et en 2003 (8-10 q/ha pour 30 mm apportés), car le manque de pluies affecte l'alimentation azotée (indisponibilité de l'azote de l'engrais) et la consommation d'eau. Contrairement à une idée répandue, la réponse à l'irrigation n'a pas été affectée en 2003 et 2004 par les hautes températures au cours du remplissage du grain.

Des facteurs dépréciant le rendement ou la qualité (verse, fusariose, moucheture…) peuvent être induits par des irrigations entre la floraison et le stade grain laiteux. Le choix variétal et l'adaptation du calendrier d'irrigation peuvent permettre de limiter ces risques.

L'irrigation de complément est une méthode utilisée pour augmenter l'efficience d'utilisation de l'azote et augmenter la teneur en protéines des céréales dans ces conditions (Fischer et al., 1993). Une augmentation de l'apport d'azote tardif de 10 à 20 kg/ha est nécessaire en irrigué pour maintenir la teneur en protéines des grains (Bouthier, 2005).

- **Tournesol** (Cetiom)

Le tournesol est une des cultures de printemps les plus tolérantes aux conditions sèches grâce à son système racinaire qui lui permet d'extraire efficacement l'eau du sol en profondeur. C'est également

une plante qui répond bien à l'irrigation à partir de la floraison à condition que sa croissance végétative ait été modérée avant la floraison. De début floraison à fin du remplissage de la graine, le tournesol doit consommer 230 mm d'eau pour assurer un rendement de 30 q/ha. C'est pourquoi l'eau d'irrigation est bien valorisée à cette période, quand la réserve en eau du sol est épuisée. Les essais et les observations en culture ont montré des gains moyens de l'ordre de 8 q/ha pour des apports de 100 mm. Une expérimentation menée de 2000 à 2005 par le Cetiom à Satolas (69) a montré que l'irrigation (113 mm) permettait d'améliorer le rendement (+12 q/ha) et la teneur en huile (+2,6%). L'application d'une règle de décision basée sur le développement végétatif et l'état hydrique du sol (sondes Watermark®) permet une augmentation de 5-10 q/ha en Poitou-Charentes dans les conditions de sols superficiels sans excès végétatifs (Lespinas et al., 2004).

Le tournesol irrigué présente deux atouts majeurs particulièrement intéressants lorsque l'eau disponible pour l'irrigation est limitée ou lorsque le calendrier d'irrigation de l'exploitation est chargé : (i) de faibles volumes d'eau requis, 30-100 mm ; (ii) une période d'irrigation peu tardive, centrée sur juillet et début août.
Le choix de la date de début d'irrigation dépend de l'état des réserves en eau du sol et de l'état végétatif du tournesol avant la floraison (Bougel et al, 2001). Il est en effet nécessaire d'éviter l'exubérance des plantes avant la floraison. L'efficacité des arrosages se trouve dans ce cas améliorée.
L'irrigation du tournesol est rentable pour l'exploitation dans 2 situations :
1) Ressource en eau toujours limitée qui ne permet pas de cultiver du maïs sur toute la surface équipée pour l'irrigation ;
2) Interdiction précoce d'irrigation : les exploitations soumises à des arrêts précoces d'irrigation (début à mi-août) peuvent trouver avec l'irrigation du tournesol un moyen de valoriser l'eau à l'époque où elle est disponible.

Dans le contexte de la nouvelle PAC 2006, l'irrigation du tournesol pourrait constituer une opportunité dans certains types de sols et des régions comme le Poitou-Charentes et le Sud-Ouest.

- **Sorgho** (Deumier et al., 2006a)

La capacité d'adaptation du sorgho au stress hydrique est bien connue. Cependant, elle a des limites qui ont été mises en évidence ces dernières années. Des différences de l'ordre de 30-40 q/ha ont été obtenues entre cultures irriguées et non irriguées (années sèches, sols de coteaux). A Toulouse, en sol profond, ce différentiel est de 8-10 q/ha en moyenne (Nolot et Debaeke, 2003).

Comment bien irriguer le sorgho quand la ressource en eau est confortable ? Si la ressource en eau est insuffisante, comment bien positionner les irrigations pour qu'elles soient efficaces ?

. Les périodes de sensibilité du sorgho au stress hydrique (Figure 7)

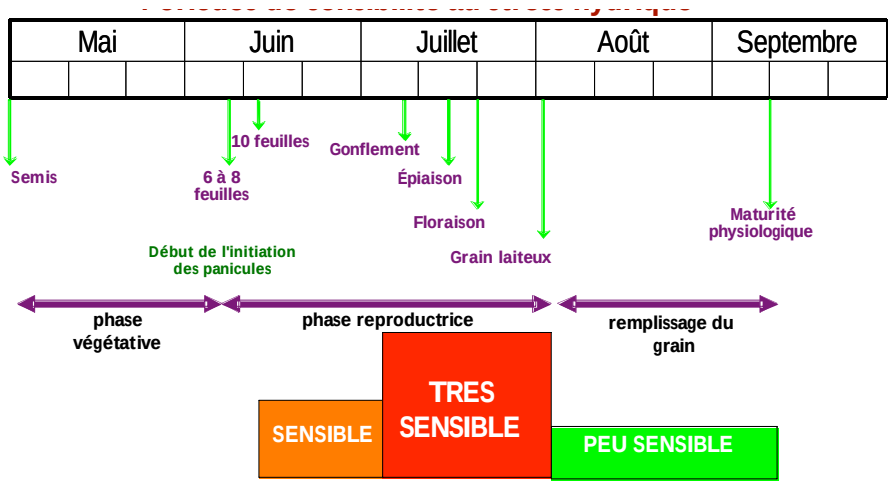


Figure 7. Périodes de sensibilité au stress hydrique du sorgho (Deumier et al., 2006a)

La période la plus sensible au manque d'eau se situe du stade gonflement à la floraison. En cas de stress hydrique pendant cette période, la fertilité des panicules est systématiquement affectée. Avant cette période, pendant la montaison, du stade 8-10 feuilles au stade gonflement, un besoin en eau non satisfait peut limiter la croissance du peuplement, perturber l'épiaison de certaines variétés et affecter la fertilité des panicules. Ce risque est accentué en cas de densité de peuplement trop élevée. La période de remplissage des grains après le stade grain laiteux est peu sensible, et l'enracinement alors à son développement maximum confère à la culture une forte capacité d'extraction d'eau dans le sol.

. Comment irriguer le sorgho pour tendre vers le potentiel de rendement en année sèche (8e décile)

Le Tableau 8 résume pour 5 zones de production françaises les besoins en irrigation du sorgho en vue d'une production potentielle les années sèches.

Tableau 8. Doses totales d'irrigation permettant d'atteindre le rendement potentiel du sorgho en année sèche (8 ans sur 10)

Région	Sol	Dose totale
Midi-Pyrénées Nord	Terrefort - Boulbènes moyennes	4 fois 35 mm
Lot et Garonne	Terrefort - Boulbènes moyennes	3 fois 35 mm
Poitou-Charentes	Groies moyennes à profondes	4 fois 35 mm
Aude (Ouest-Lauragais)	Terrefort de coteaux	4 fois 35 mm
Drôme	Sol de gravier moyen	4 à 5 fois 35 mm

. Comment irriguer avec 1 à 3 irrigations

Bien que le potentiel de rendement soit rarement atteint, on recherche une efficacité maximale de l'eau par un bon positionnement des irrigations. On cherche à privilégier la période de plus grande sensibilité mais néanmoins à assurer un appoint minimum en cas de fort déficit hydrique avant cette période. En sol de profondeur moyenne, le gain de rendement sera alors de 10 à 15 q/ha pour 35 mm.

Ces substitutions permettent également une forte réduction de l'eau d'irrigation. Dans certains cas, le choix du soja peut permettre également une réduction des irrigations par rapport au maïs.

De nombreux travaux ont été effectués en France par ARVALIS-Institut du Végétal et le Cetiom sur ce thème en s'appuyant sur le logiciel LORA, un optimisateur du choix d'assolement (Jacquin et al., 1993 ; Leroy et al., 1994, 1996…). Les solutions optimales varient selon les contextes hydrauliques, les pédoclimats et les prix. Cet outil est toujours utilisé pour évaluer les conséquences de la PAC sur les systèmes irrigués. Des travaux récents menés en Poitou-Charentes et Vendée par ARVALIS avec LORA ont testé les conséquences de la PAC, d'une diminution des quotas et de restrictions d'irrigation en cours de campagne pour 8 fermes types (Druesne et al., 2006) : la substitution du maïs par le sorgho, le tournesol ou les céréales à paille dans le cas d'une réduction de 15 à 30% du volume n'est intéressante que pour les exploitations ayant un faible quota initial ; des pertes de revenu par rapport à la situation initiale subsistent néanmoins. Si le quota initial est élevé, c'est le maïs en conduite restrictive qui conserve une place importante. Si les restrictions estivales deviennent plus fréquentes, c'est la part des cultures irriguées au printemps qui doit augmenter dans l'assolement. **Selon les auteurs, la modification des assolements ne suffira pas à elle seule pour une adaptation au nouveau contexte économique et réglementaire en matière de gestion de l'eau.**

Dans le rapport du CGGREF (Lévy et al., 2005), il est montré qu'à l'horizon 2007 :

- en situation de disponibilité en eau d'irrigation peu ou pas limitante et quand les installations d'irrigation sont en cours d'amortissement et dès lors que le rendement du maïs dépasse celui des céréales de 2 t/ha, cette culture procure la meilleure marge brute et sa place dans les assolements reste prépondérante ;
- quand les installations d'irrigation sont amorties, l'intérêt du maïs irrigué peut être remis en cause en cas de contraintes hydrauliques (doses, débits) si le différentiel de rendement avec une céréale non irriguée (blé, sorgho) ne dépasse pas 4,5 à 5 t/ha.

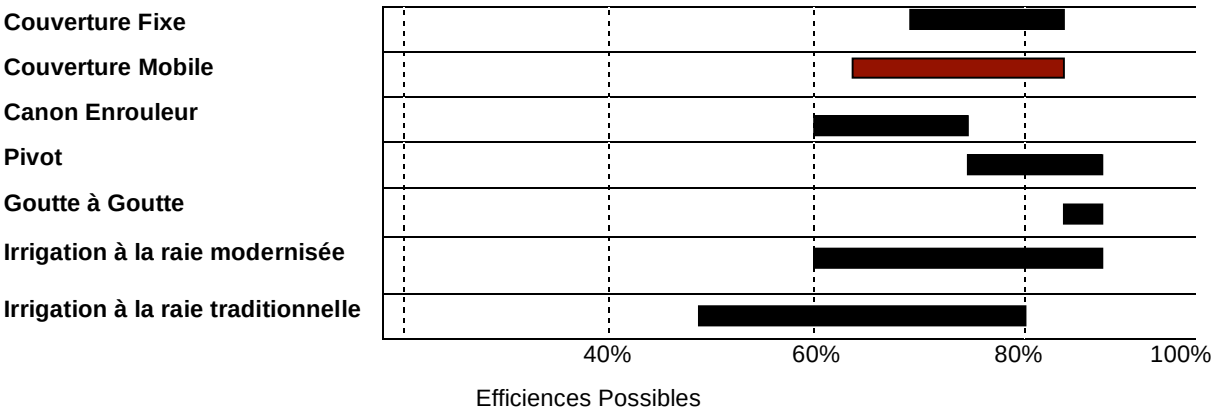
2.2.1.3.4. Optimiser l'efficacité de l'apport d'eau (lorsqu'il est justifié) *(Mailhol, 2003)*

2.2.1.3.4.1. Matériels d'irrigation utilisés et perspectives d'amélioration de leur efficience

En France, le mode d'irrigation le plus répandu reste l'aspersion (91% des superficies irriguées). Bien adaptée aux caractéristiques du climat, l'aspersion apporte une certaine souplesse pour l'agriculteur.

Les matériels d'irrigation peuvent être classés selon leur efficience d'irrigation (EI), définie par Burt et al. (1997) comme le rapport entre le volume d'eau utilisable par la plante et le volume délivré à la parcelle. EI est le reflet de ce qui se passe à l'échelle d'un cycle cultural, plutôt que lors d'une irrigation particulière.
Clemmens (2000) compare l'efficience de différents systèmes d'irrigation (Figure 8).

Figure 8. Efficience de différents systèmes d'irrigation (Clemmens, 2002)



Le canon enrouleur

En France, 50% des surfaces sont arrosées par des canons enrouleurs (Ruelle et al., 2005). Ce type d'arrosage est parfaitement adapté pour une irrigation de complément (mais pas seulement) sur les céréales. L'arrosage en bandes parallèles permet une adaptation à des formes de parcelles variables, les bandes arrosées couvrent de 1 à 4 ha, pour des apports par irrigation de 20 à 40 mm (moyenne proche de 35 mm), le temps nécessaire pour passer d'une position à une autre est en moyenne d'1 heure.
Pour caractériser l'efficacité d'un système d'aspersion on parle plutôt d'uniformité de distribution (UD). Le canon enrouleur a des efficiences maximales atteignant à peine 75% d'après les résultats d'enquêtes menées aux US. L'usage de matériels mal réglés ou usagés en conditions ventées donne lieu à de mauvaises efficiences résultant d'une forte hétérogénéité d'application des doses. La plupart des appareils sont maintenant équipés de régulations électroniques. Ces régulations sont soit montées d'origine soit installées sur des appareils anciens à régulation mécanique ; ils permettent une amélioration de l'uniformité d'arrosage par la régulation de la vitesse d'enroulement, mais surtout une meilleure gestion du temps : on peut prévoir l'heure d'arrivée de appareil ce qui limite les pertes de temps lors des déplacements. Les derniers systèmes sont capables d'enregistrer les paramètres de fonctionnement (vitesse, dose, heures) et d'envoyer des alarmes à l'agriculteur par téléphone.

L'investissement reste supportable avec un coût à l'hectare variant de 500 à 800 €/ha (matériel à la parcelle uniquement), pour une durée de vie effective de plus de 20 ans. C'est une des raisons pour laquelle le marché de l'occasion est très dynamique. Le coût à l'hectare est estimé à 75 à 100 €/ha et par an (source CA Loiret) (cf. étude Midi-Pyrénées et colloque de Losse 2004). A cela, il faut ajouter un coût de l'énergie important du fait des pressions requises (6 à 10 bars à l'enrouleur). La même approche en Aquitaine pour une exploitation utilisant un lac collinaire, amène un coût de l'irrigation de 310 €/ha/an, dont 35% dus au matériel.

Le problème est que l'arrosage par canon est assez sensible au vent, délivre des intensités d'irrigation importantes, parfois incompatibles avec une bonne préservation des caractéristiques d'infiltration de la surface du sol.

La portée atteinte par le jet sera fonction de la pression de fonctionnement disponible au canon, sa valeur ne doit pas descendre en dessous de 4 bar, pour atteindre un bon rendement pression/portée vers 5,5 bar. Les appareils ne sont pas toujours bien entretenus et leur fonctionnement s'éloigne souvent des paramètres initiaux retenus pour leur calcul.
Des données acquises sur le terrain par Dubalen (1993) en France ont permis d'identifier les causes majeures des mauvaises performances de l'irrigation dans le cas de l'enrouleur. On constate souvent que ces causes résultent d'une mauvaise utilisation de l'appareil (espacements inadaptés, vitesse irrégulière) et d'une absence de contrôle des doses réellement délivrées (Pereira et al., 2002). Des résultats quelque peu similaires ont été obtenus aux USA par Pitts et al. (1996). Il convient d'ajouter que lorsque la maintenance du matériel ne peut être assurée, ces performances ont tendance à se dégrader comme le montrent Louie et Selker (2000).
Les connaissances accumulées sur le fonctionnement des canons en conditions ventées ont permis de mettre au point le modèle Irriparc® (Granier et al., 2003 ; Deumier et al., 2003) qui simule l'effet des pratiques de l'agriculteur sur la distribution d'eau pour plusieurs saisons climatiques et en tenant compte du vent (vitesse, direction). Cette méthode diffusée par Arvalis-Institut du Végétal et le Cemagref donne des résultats intéressants.

Perspectives d'amélioration :

De nombreux constructeurs ont cherché à améliorer les canons à enrouleurs, en remplaçant le canon par une rampe d'arroseur, ce qui ramène les pressions au niveau de celles utilisées pour les pivots, diminue la sensibilité au vent, mais nuit à la souplesse du système et augmente son coût. Ces dix dernières années, pour résoudre les problèmes d'arrosage en bord de parcelles, des brises jets régulés mécaniquement ont été mis au point, permettant de restreindre l'apport d'eau à la parcelle.
Plus récemment, on a commencé à voir des canons à secteur programmable, qui ouvrent la voie vers des canons asservis à diverses consignes (vent, obstacles, intensité d'apport…). Le problème initial de transfert d'information semble résolu soit par des tubes PE avec treillis métallique, soit par radio. Il s'agit là des premiers pas vers une irrigation de précision, à condition que des outils de pilotage spécifiques soient développés.

Les pivots et rampes frontales

Les surfaces irriguées par pivots et rampes frontales sont de 30% (Ruelle et al., 2005). Ces appareils qui se développent régulièrement depuis une trentaine d'années en France sont dédiés à une parcelle. Ils sont adaptés aux situations d'irrigation indispensable ou de complément. Ils ne réclament que très peu de surveillance au cours de la saison d'arrosage. Des solutions mobiles ont été développées pour éventuellement changer de parcelle, ou arroser une même parcelle en plusieurs postes, mais cela reste une solution provisoire. Au bout de quelques campagnes les appareils sont fixés, les agriculteurs utilisent cette solution pour échelonner l'investissement. Pour la seule irrigation, ces appareils doivent avant tout rester simples pour garder leur intérêt.
Leur développement est principalement le fait de remplacement d'enrouleurs, ce qui pose des problèmes d'excès de pression sur les réseaux anciens. La taille des projets est progressivement réduite du fait que les grandes parcelles ont été équipées en priorité. Dans le Sud-Ouest, la taille moyenne des projets est de 5 travées (moins de 20 ha).
Sur les nouveaux réseaux, la tendance est de baisser les pressions pour réduire les consommations énergétiques : le pivot s'impose alors comme solution d'arrosage à moyenne pression.

L'investissement pour l'équipement sur la parcelle représente 800 à 1500 €/ha, pour un coût d'utilisation de 80 à 110 €/ha et par an (source CA Loiret). Une étude détaillée en Aquitaine a montré que pour des charges d'irrigation de 260 €/ha/an, pour une alimentation par forages, le matériel représentait 40% environ du total sources. Les consommations en énergie sont plus faibles que pour un enrouleur, puisque la pression en tête requise varie de 2 à 5 bars.

Les nouvelles installations incluent un dispositif de fertigation, comme moyen efficace, bien que pas toujours maîtrisé, d'ajuster la fumure du dernier apport d'azote.
Les apports par passage sont de 15 à 30 mm, avec une moyenne autour de 20 mm. En France, la plupart des pivots sont équipés d'un canon d'extrémité, dont le réglage est très rarement réfléchi, bien que des références et des outils existent (au Cemagref par exemple). Le problème majeur rencontré

avec ce type d'appareils est l'intensité de l'application en extrémité, d'autant plus que l'appareil est de grande taille. En effet les arroseurs ayant une portée réduite vont appliquer la dose d'irrigation en un temps bref, donc avec une intensité élevée. Par contre, l'arrosage des pivots est très peu sensible au vent, du fait de la production de grosses gouttes ; il en est de même pour les pertes par évaporation et transport qui se concentrent sur les premières travées, donc sur une surface réduite. Ces pertes possibles sont généralement compensées par une augmentation de la dose apportée sur la zone.
Le contrôle à distance des machines tend à se développer, permettant de limiter considérablement les déplacements pour la surveillance et l'inconfort des interventions en urgence.

Perspectives d'améliorations

La tendance est d'aller vers plus d'asservissement des appareils aux besoins en intrants (eau, engrais, traitement) locaux, pour se rapprocher des concepts d'irrigation de précision. Le problème principal restant à régler est celui de l'établissement de la consigne d'arrosage, qui impose la mise au point de capteurs d'observation et/ou de moyens de simulation, capables de donner l'état de confort hydrique et éventuellement azoté de la culture, et au-delà l'état sanitaire à un pas de temps court (<1h).
Ces perspectives, pour intéressantes qu'elles soient, se heurtent à des problèmes de coûts pour le moment prohibitifs. C'est pourtant un des meilleurs moyens de concilier les impératifs de préservation des ressources de la nouvelle loi sur l'eau et la durabilité des exploitations agricoles.
En première approche, les améliorations les plus accessibles pourraient porter sur l'amélioration de la qualité d'arrosage, permettant de positionner effectivement l'eau dans la zone où elle est nécessaire (apport contrôlé spatialement, contrôle de la dérive et du ruissellement).
Enfin, les capacités de retour assez rapide de ces machines sur un même point de la parcelle, autorisent un pilotage assez fin des apports, bien que ce ne soit pas toujours la priorité de l'agriculteur.

Les couvertures d'asperseurs

En France, 11% des surfaces irriguées le sont en couverture d'asperseurs (Ruelle et al., 2005). Ce système reste le plus adaptable à la forme, la topographie et la nature du sol de la parcelle. La couverture d'asperseurs permet d'obtenir une bonne qualité d'arrosage (CU > 70%), avec des intensités très faibles, compatibles avec tous les types de sols. La sensibilité de la répartition pluviométrique au vent reste toutefois assez importante. L'efficience chute rapidement en présence de vent en conditions de faible pression et lorsque l'écartement des asperseurs est mal adapté. Des essais effectués au champ chez un échantillon d'agriculteurs par Dubalen (1993) mettent en évidence les causes majeures de faible performance de ce mode d'irrigation : l'espacement des asperseurs et les variations de pression. On observe une tendance à la réduction des surfaces en couverture traditionnelle à grands écartements (18 à 24 m), traditionnellement utilisés pour le maïs, pour aller vers des couvertures à faibles écartements (8 à 15 m) dont la pose et dépose sont automatisables, sur des cultures légumières de plein champ, voire à la micro-aspersion (écartement 2 à 5 m) sur des cultures pérennes ou dans les serres. Les solutions d'automatisation et de commande à distance des postes, permettant de faciliter la conduite des arrosages, sont nombreuses et en développement.

Ce mode d'aspersion peut être utilisé en lutte anti-gel, éventuellement asservi à un capteur de température. Le même principe avec une station météo peut permettre de déclencher un arrosage et de régler sa durée.

Perspectives d'améliorations :

La couverture intégrale du fait de sa souplesse autorise la mise en œuvre de méthodes de pilotage de l'irrigation très élaborées. Celles-ci restent encore trop peu utilisées bien qu'elles soient connues. De l'avis des techniciens, leur vulgarisation est à améliorer individuellement, en particulier en lien avec les opérations d'avertissement collectives. Le degré d'automatisation actuel ne permet qu'une commande globale des secteurs.
L'automatisation est une solution pour réduire les pertes par drainage ou ruissellement. En effet, cela permet aux irrigants de réduire la durée des positions d'arrosage : avant automatisation, les durées de position sont souvent de 12 heures (2 fois 12 h par jour) avec des doses unitaires de 35 mm à 48 mm, et l'automatisation permet des durées plus courtes (3 fois 8 h, 4 fois 6 h et même 6 fois 4 h) et des doses unitaires modérées (13 à 30 mm) plus conformes aux capacités de rétention des sols. Ce

dispositif permettrait d'économiser au minimum 20 à 25 mm (CR d'une expérimentation d'un dispositif de couverture intégrale automatisée – CA 31 mars 1999).
On commence à parler, en particulier en arboriculture, d'apports adaptés à chaque arbre ou plutôt groupe d'arbres, de pilotage en temps réels des apports de fertilisants (oligo-éléments), voire de pesticides (produits de contact). Ces dernières pratiques, si elles sont théoriquement possibles en plein air, imposent une prise en compte des facteurs climatiques pour éviter toute dérive ou contamination des environs et une clarification de la législation.
Les pratiques de chimigation autorisées, dans la plupart des pays européens, pourraient apporter des solutions intéressantes aux problèmes liés aux traitements terrestres classiques (dérive réduite, absence d'aérosols, positionnement du produit sur le feuillage ou au sol, limitation des passages d'engins…).

L'irrigation localisée (micro-irrigation)

L'irrigation localisée représente 3,8% des surfaces irriguées (97500 ha). C'est la technique la plus économe en eau sous climat aride pour un objectif de production donné, son niveau d'efficience pouvant atteindre 90%. Elle permet de limiter les contacts entre l'air et l'eau, donc l'évaporation, bien que celle-ci reste réduite sous nos climats. Comparé à un système en aspersion également parfaitement maîtrisé et supposé apporter une pluviométrie des plus homogènes, la pratique de l'irrigation localisée permettrait de réduire les pertes par évaporation et supprimer les pertes par dérive donc de réaliser une économie d'eau de l'ordre de 15 à 20% (Mailhol, 2005), car elle permet de positionner l'eau près de la plante. Dans la réalité des conditions françaises, la mauvaise prise en compte des pluies réduit fortement cet avantage par ailleurs réel en climat aride. La majeure partie des installations est couplée à des dispositifs de fertigation. La micro-irrigation est utilisée sur les cultures maraîchères de plein champ comme sous serre ainsi qu'en arboriculture fruitière.
En France, la conception des dispositifs est plutôt orientée vers une assurance de couverture des besoins, y compris dans des situations difficiles, plutôt qu'une économie d'eau, l'eau restant un facteur de production d'un coût peu élevé pour ce type de spéculation.
Au Maghreb, cette technique connaît un fort développement en raison de subventions conséquentes accordées aux agriculteurs par les gouvernements. Il est cependant encore trop tôt pour dire si ces mesures incitatives s'avèreront efficaces ou non vis-à-vis de l'objectif recherché qui est d'induire des économies d'eau. Difficultés liées à l'acquisition de cette nouvelle technique d'une part (Slatni et al., 2004) et absence de pénibilité du travail (contrairement aux techniques traditionnelles) peuvent engendrer des effets opposés à ceux espérés dans certains contextes.

Etant donné l'investissement que ces systèmes représentent (1500 à 3000 €/ha), les agriculteurs sont préoccupés par leur durabilité, souvent remise en cause par les problèmes de colmatage. C'est une des raisons pour laquelle les systèmes jetables se développent. Leur intérêt technique est bien compréhensible, mais on peut se demander quel est leur poids en terme de production de CO_2, bien qu'ils soient construits en matériaux recyclables.
Les systèmes de filtration utilisés permettent une bonne protection des installations à condition qu'ils soient bien adaptés aux caractéristiques de l'eau et des distributeurs. Cet accroissement de durabilité est d'autant plus nécessaire que les systèmes de goutte à goutte sont enterrés. Ces derniers ont montré de très bonnes performances.

Perspectives d'amélioration :

La principale amélioration serait d'abord d'augmenter la durabilité des systèmes de micro-irrigation, pour la rendre équivalente à celle des autres techniques d'irrigation : cela permettrait d'en développer la pratique et d'aller vers une meilleure maîtrise des apports. Pour cela, il y a besoin de travailler à la fois sur les problèmes de filtration et sur la mise au point de goutteurs insensibles au colmatage.
La diffusion de systèmes de détection de dysfonctionnement serait aussi une voie d'amélioration intéressante. Ces dispositifs existent déjà (pressostats, compteurs réagissant à des variations de débit…) mais sont peu répandus. Plus généralement, l'amélioration passera par tout système capable d'informer l'agriculteur d'un problème éventuel sur un secteur d'arrosage.

2.2.1.3.4.2. Retour sur quelques problèmes liés à l'aspersion

a) Eviter les pertes d'eau par évaporation : il y a peu à gagner

En conditions habituelles, les pertes nettes par évaporation s'avèrent être largement inférieures à 10% durant les irrigations (pour des doses de 30-40 mm) (Huber et Dubois de la Sablonnière, 1992 ; Ruelle et al., 2004). Calculs sommaires, approches basées sur une modélisation mécaniste des phénomènes en jeu (thèse M. Hendawi, 2006), et données de la littérature convergent sur le sujet. Hendawi (2006) fait état d'un niveau de pertes (estimées au pas de temps horaire) plafonnant à 6% dans des conditions de journées extrêmes pour des prairies irriguées de la plaine de Crau (Tmax = 32°, HR = 26%). Ce travail conclut que plus que la perte par évaporation, c'est le vent et ses effets sur la qualité de l'apport sur lequel il convient de se focaliser.

Outre l'importance du vent, Huber et Dubois de la Sablonnière (1992) signalent également le caractère déterminant de la température de l'eau d'irrigation sur les pertes par évaporation. Les pertes peuvent être minorées, dans les situations climatiques extrêmes en évitant les irrigations autour du midi solaire. Lors d'une journée sans passage nuageux, la période contribuant pour 50% à l'ETref est approximativement la plage horaire 11-15 h (heure solaire) en juillet et l'effet du vent ne doit pas être sous-estimé. En effet, il ne faut pas oublier que les pertes en eau deviennent élevées en conditions ventées, ce qui peut se produire de jour, mais aussi de nuit. En conditions expérimentales il est d'usage de ne pas irriguer lorsque la vitesse du vent atteint 2 m/s soit 7,2 km/h pour conserver une très bonne homogénéité des apports.

b) Réduire l'hétérogénéité spatiale des arrosages

La régularité médiocre des apports d'eau en particulier à cause du vent et de l'hétérogénéité des sols conduit parfois les irrigants à appliquer des doses d'irrigation "confortables" pour sécuriser les rendements. Ainsi, près de 50% de la surface d'une parcelle irriguée peut recevoir des doses différentes des doses souhaitées par l'agriculteur.

Les enjeux du réglage des matériels d'aspersion en particulier pour un canon enrouleur (diamètre de la buse, pression à la buse, angle du jet, écartement entre deux passages successifs, orientation de ces passages par rapport aux vents dominants et l'angle de secteur) sont importants. Ils peuvent être évalués en mesurant l'impact des hétérogénéités d'irrigation sur le rendement et la qualité des cultures, les pertes d'eau par drainage. Une expérimentation conduite sur maïs en 1991 situe les enjeux des réglages (Deumier et al, 2003). La répartition de l'eau d'irrigation a été mesurée entre deux positions d'un canon enrouleur. On observe alors un surdosage conséquent dans la zone de recoupement des jets (Figure 9). L'été 1991 ayant été particulièrement sec, l'effet sur le rendement du maïs a été très marqué.

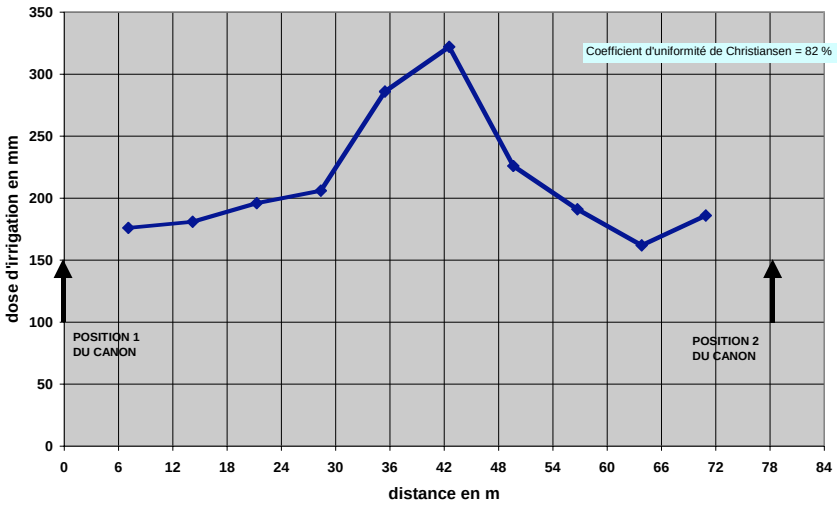


Figure 9. Dose d'irrigation totale entre deux passages de canon enrouleur (ITCF-Ecospace Schering-1991)

En reconstituant a posteriori les répartitions d'eau d'irrigation pour différents écartements entre passages du canon, il a été possible d'évaluer l'effet de ces répartitions sur :

- le rendement de la culture du maïs,
- la quantité d'eau inutile pour le maïs ou perdue par drainage (Tableau 9).

On constate que par exemple pour un coefficient d'uniformité (CUC) de 80% la perte de rendement est de 8 q /ha et l'eau inutile ou perdue représente environ 30 mm, soit environ une dose unitaire d'irrigation.

Tableau 9. Effet de l'écartement entre deux passages de canon sur le CUC*, le rendement du maïs et l'eau inutile ou perdue (ITCF-Ecospace Schering - 1991)

	écartement entre deux passages de canon en m						répartition idéale
	63 m	71 m	78 m	85 m	92 m	99 m	
CUC	72.3	80.4	85.9	90.9	83.3	76.3	100
rendement q/ha	108.9	112.3	114.6	116.7	113.5	110.6	120.5
eau inutile ou perdue m^3/ha	430	300	220	140	260	370	0
% dose totale	14	10	7	5	8	12	0

* CUC = Coefficient d'Uniformité de Christiansen défini dans le paragraphe "le logiciel IRRIPARC"

Des outils récents permettent d'homogénéiser et de maîtriser les doses sous le canon pour limiter le gaspillage (par exemple, le logiciel IRRIPARC, Granier et al., 2003). Des études régionales conduites dans 4 régions françaises ont eu pour objectif de proposer les réglages des canons enrouleurs pour mieux contrôler l'hétérogénéité à l'échelle des parcelles agricoles. L'effet de ces réglages sur la répartition de l'eau a été simulé avec le logiciel IRRIPARC. L'analyse des résultats permet alors de proposer des fiches de réglages adaptées à chaque contexte local : canon, culture, sol, vent (vitesse, direction), climat (Deumier et al, 2003). Ces études ont été conduites en étroite collaboration avec les acteurs locaux du conseil, de la distribution du matériel d'irrigation et des agriculteurs.

2.2.1.3.4.3. Irrigation de précision

L'irrigation de précision peut permettre une meilleure utilisation de la ressource en eau d'irrigation. Mais l'intérêt de cette technique n'apparaîtra de façon bien nette que dans certains cas :

- si les parcelles irriguées sont suffisamment grandes pour justifier de mettre en œuvre des appareils permettant de différencier spatialement les apports d'eau ;
- si la variabilité pédologique à cette échelle est suffisamment forte pour faire apparaître des différences de réserve utile importantes ;
- si l'on dispose d'un équipement d'irrigation capable de maîtriser correctement l'homogénéité d'apport d'eau (pivot) ;
- si la ressource en eau est limitée ;
- s'il existe des risques de pollutions par lessivage des nitrates.

En Beauce, où tous ces facteurs se trouvent réunis, certains agriculteurs se montrent intéressés par des systèmes permettant de différencier spatialement les apports d'eau. D'autres régions dans le Centre-Ouest de la France (Charente par exemple) peuvent aussi être concernées.

L'étude conduite en 2000 sur une parcelle de maïs à Villamblain dans le Loiret (Zanolin, 2003) illustre bien l'intérêt de l'irrigation de précision tant sur le plan environnemental que sur le plan de la valorisation de l'eau. Ce travail a permis de montrer comment on peut raisonner l'utilisation optimale d'une quantité d'eau limitée. Sur une parcelle constituée essentiellement de 2 types de sols (argilo-limoneux profond à forte réserve utile, et calcosol superficiel), on cherche à satisfaire au mieux les besoins en eau de la culture sur les sols les moins profonds : on assure ainsi un développement végétatif suffisant pour que la plante puisse prélever l'azote présent dans le sol, et on diminue ainsi le risque de lessivage ; par contre, on peut plus facilement diminuer les apports d'eau sur les sols profonds puisque la réserve du sol assure plus longtemps l'alimentation hydrique de la plante.

Par exemple, au cours de l'année 2000, en se basant sur un quota d'eau de 1350 m^3/ha, les simulations effectuées (sur la base du modèle STICS) ont montré que la meilleure conduite différenciée permettait d'obtenir les résultats suivants :

	Irrigation	Rendement	Drainage	Lessivage d'azote
Sol profond	90 mm en 3 apports	10.9 t/ha	171 mm	20 kg N/ha
Sol superficiel	180 mm en 6 apports	11.0 t/ha	307 mm	78 kg N/ha

Un apport d'eau homogène (135 mm) aurait pénalisé les zones à faible réserve sans permettre d'augmenter sensiblement le rendement des zones de sols profonds. Par contre, la réduction des apports d'eau en sol profond s'est faite en fin de végétation, ce qui a permis de bien contrôler le drainage en automne et de minimiser le lessivage d'azote au moins sur cette zone de la parcelle.

Mettre en œuvre une irrigation de précision peut permettre de limiter les apports d'azote, mais ceci impose de pratiquer la fertigation au moins pour le dernier apport. Le bénéfice environnemental est certain, tant du point de vue des transferts que du point de vue de la production de CO_2 grâce à la réduction du nombre de passages de tracteur et des doses d'engrais. L'économie d'eau potentielle est importante en valorisant au mieux les capacités de stockage du sol, minimisant l'humidité résiduelle dans le sol en fin de campagne, ce qui accessoirement peut faciliter les travaux de récolte et réduire la compaction. Il faut maintenant développer le matériel capable d'effectuer un apport différencié et les méthodes de pilotage et de simulation nécessaires. Etant donné l'effort de recherche requis, il semble difficile d'espérer une vulgarisation avant 2010.

2.2.1.3.5. Utiliser des outils d'aide à la décision tactiques pour apporter la quantité nécessaire et suffisante au bon moment

- **Les indicateurs de l'état hydrique de la plante** (Merrien et al., 1995 ; Katerji, 1997)

Des outils de détection de la contrainte hydrique perçue par la plante ont été développés pour aider au pilotage de l'irrigation. On peut citer plusieurs méthodes :
- mesure de la température de surface du couvert (par thermographie infra-rouge),
- mesure du potentiel hydrique foliaire (par chambre à pression),
- mesure de la variation du diamètre des organes végétaux (type Pepista).

Ces méthodes sont pertinentes sur le plan physiologique et rendent bien compte de la contrainte subie par la plante. Cependant elles sont complexes à mettre en œuvre, relativement coûteuses et peu représentatives de la variabilité spatiale. De ce fait, elles ne sont pas utilisables ni utilisées en grande culture.

Des méthodes empiriques basées sur l'appréciation visuelle de l'état de turgescence (enroulement des feuilles, par exemple) peuvent être mises en œuvre dans la mesure où la relation avec un critère quantitatif est possible (Downey et Miller, 1971).

La mesure de l'état hydrique du sol pour piloter les irrigations est davantage pratiquée en grande culture, par la pose de sondes tensiométriques ou capacitives (Tron et al., 2000). La diminution du potentiel hydrique au-delà d'un certain seuil peut être interprétée comme le signal d'un changement dans les conditions d'alimentation hydrique de la culture. Les tensiomètres sont des matériels simples et peu coûteux ce qui a facilité leur diffusion. Ces sondes sont nécessaires à la mise en œuvre de méthodes comme IRRINOV® (cf. plus loin).

- **Le bilan hydrique**

Dans beaucoup d'études, on considère que le simple suivi de la réserve en eau du sol fournit des éléments pour apprécier le confort hydrique des plantes. La détermination directe à la parcelle de la teneur en eau du sol (par gravimétrie ou sonde) n'étant pas réalisable en pratique, des modèles simples ont été développés pour prévoir l'évolution de la disponibilité en eau du sol (Choisnel, 1985 ; Leenhardt et al., 1995 ; Mailhol et al., 1996). Le bilan hydrique reste un outil de base pour les

avertissements irrigation délivrés par les Chambres d'Agriculture. On présente ici le cas du BHYP utilisé en Haute-Garonne (Deumier et al., 2005).

BHYP (bilan hydrique prévisionnel) permet à chaque agriculteur de suivre le bilan hydrique de ses îlots d'irrigation. Le BHYP est envoyé en juin aux agriculteurs et est réactualisé mi-juillet. Il se présente sous la forme d'un graphique que l'irrigant complète jour après jour en notant les pluies et les irrigations (Figure 10). Il est relativement facile d'utilisation et coûte 23 € HT par an.

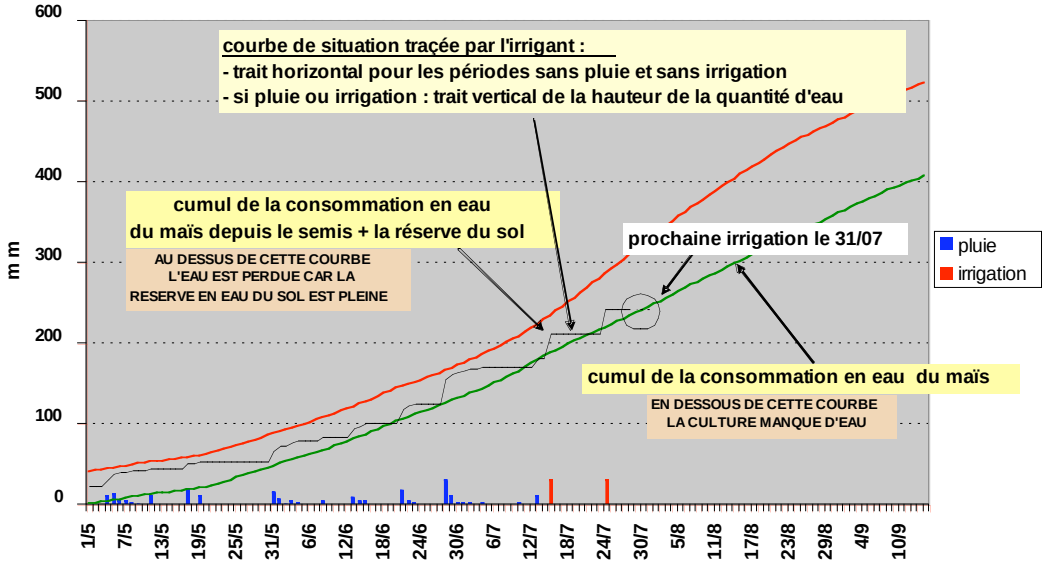


Figure 10. Exemple de BHYP (Deumier et al., 2005)

Des innovations pourraient être apportées pour une mise à disposition de l'information aux irrigants en temps plus utile pour l'action (bilan hydrique "assisté" par mesures de surface foliaire obtenues par télédétection, site internet…). La généralisation de la micro-informatique permet théoriquement à tout agriculteur un suivi du bilan hydrique de ses parcelles.

- **La méthode IRRINOV®**

La méthode IRRINOV® a été mise au point par ARVALIS - Institut du végétal et des partenaires régionaux : Chambres d'Agriculture et organismes économiques. Elle propose :

- de déterminer au champ les stades repères de la culture qui permettent de délimiter la période d'irrigation,
- un rythme d'irrigation par milieu (sol et climat), c'est-à-dire une dose d'irrigation unitaire et une fréquence d'apport nécessaire et suffisant pour couvrir les besoins en eau de la culture au moins 8 ans sur 10,
- des seuils de tension en eau[3] du sol dépendant du stade des cultures qui permettent de moduler le rythme standard proposé en fonction du climat et du besoin des plantes, et qui prend en compte la durée du tour d'eau,
- un site pilote avec 6 sondes Watermark® pour mesurer la tension en eau du sol et 1 pluviomètre, et les procédures pour bien positionner et bien utiliser le site de mesure. (Figure 11).

Toutes les règles de conduite sont dans les guides d'utilisation de la méthode ; les guides sont régionalisés et concernent les cultures suivantes : maïs, céréales, pois et pomme de terre. Ils sont accessibles sur le site www.ARVALISinstitutduvegetal.fr et auprès des partenaires régionaux. La Figure 12 indique la liste des guides disponibles par région en 2005.

[3]Tension en eau du sol : succion à exercer par les racines des plantes pour extraire l'eau du sol. Unité : kPa ou cbar

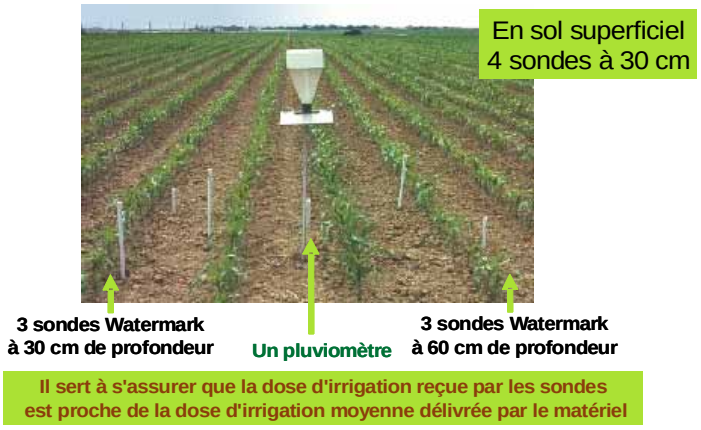


Figure 11. Un site de mesure IRRINOV® pour le maïs

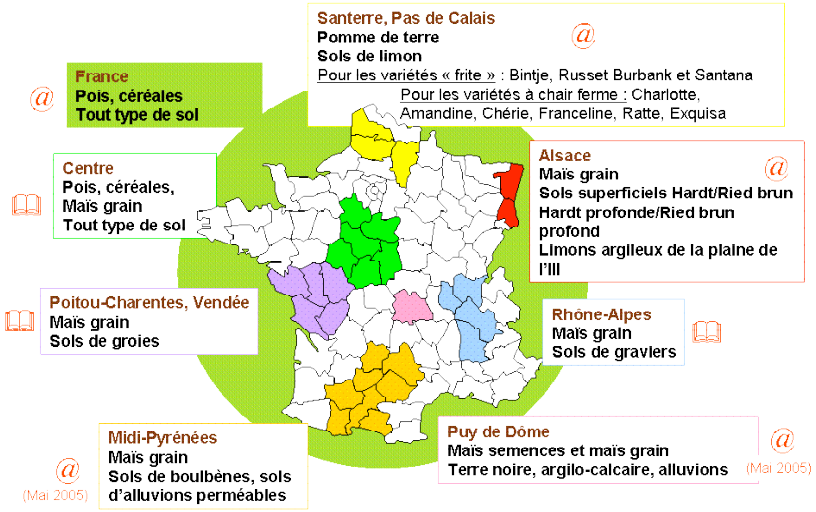


Figure 12. Carte IRRINOV®

La méthode IRRINOV® est adaptée aux contextes de ressource en eau confortable. Pour l'utiliser, l'irrigant doit disposer d'une ressource en eau et de moyens d'irrigation (matériel et main d'œuvre) lui permettant de couvrir les besoins en eau des cultures au moins 8 ans sur 10. Elle n'est donc pas adaptée aux ressources en eau restrictives.

La méthode a été paramétrée par milieu (sol et climat) à partir d'essais irrigation pluri-annuels. Chaque année, la comparaison de plusieurs régimes d'irrigation a permis de déterminer :

- le rythme d'irrigation optimal (fréquence d'apport) et la dose totale optimale,
- la dynamique optimale d'utilisation de la réserve en eau du sol, c'est-à-dire l'évolution des tensions en eau du sol au cours du cycle cultural.

L'analyse fréquentielle climatique pluri-annuelle permet de classer les années d'essais selon leur degré de "sécheresse" et de les situer dans une série climatique plus large que celle des années d'essais. On peut alors déterminer la valeur des deux paramètres précédents adaptés aux années sèches, particulièrement au 8e décile

Pour le maïs par exemple (Figure 13), les seuils tensiométriques sont faibles en début de cycle, modérés autour de la floraison et plus élevés en fin de cycle. Les seuils faibles permettent de ne pas trop mettre à contribution la réserve en eau du sol au début du cycle et donc de garder de l'eau pour participer à la couverture des besoins de pointe du maïs en juillet. En effet, les capacités d'irrigation des installations d'irrigation sont très souvent insuffisantes pour couvrir à elles seules les besoins de pointe du mois de juillet.

Après la floraison, les seuils plus élevés permettent une contribution du sol plus importante car l'enracinement de la plante est maximal et les besoins en eau plus faibles. La mise en œuvre progressive de la réserve en eau du sol s'inspire des propositions développées par Peyremorte et Tron (1989).

Depuis le début de sa diffusion en 2000, la méthode a été adoptée par environ 800 agriculteurs irrigants de grandes cultures. Par ailleurs, le projet IRRINOV® est l'occasion de formaliser des règles de décision d'irrigation avec des partenaires de la recherche et du conseil. Aussi est-elle souvent utilisée comme référence pour rédiger les avertissements irrigation.

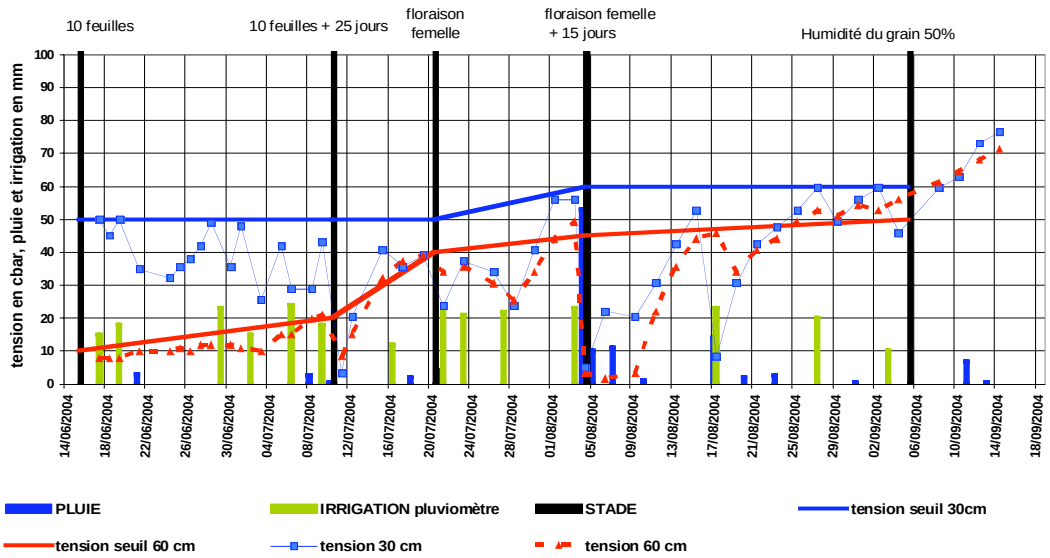


Figure 13. Evolution des tensions en début de tour d'eau par rapport aux seuils tensiométriques de la méthode - Utilisation par un agriculteur sur maïs en sol de boulbènes superficielles de Midi-Pyrénées en 2004 (source : Deumier et al., 2005)

2.2.1.2.6. Utiliser des outils d'aide à la décision stratégiques

Depuis quelques années des logiciels informatiques ont été conçus pour aider les techniciens et les agriculteurs à raisonner et à prendre des décisions stratégiques dans la gestion de l'irrigation (Deumier et al., 2006b) :

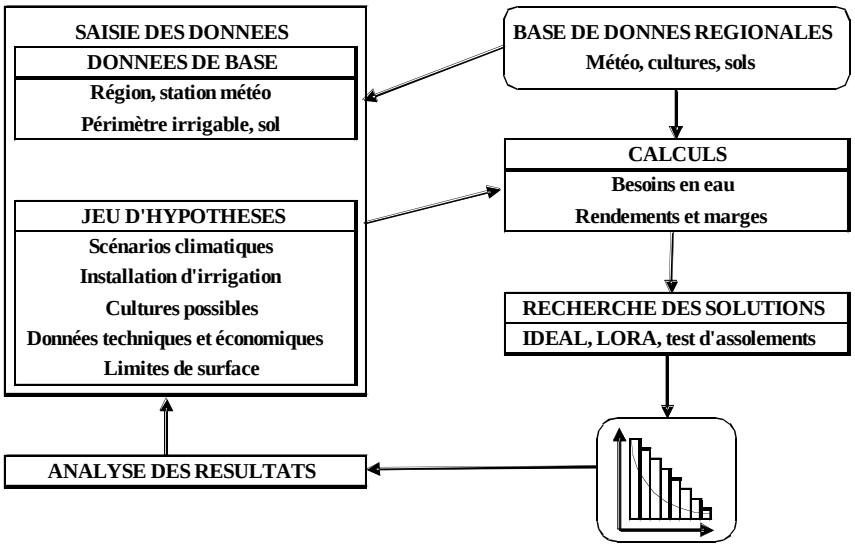
- LORA : pour raisonner l'assolement sur le périmètre irrigable,
- IRMA : pour raisonner les règles de conduite et d'organisation des chantiers d'irrigations,
- MODERATO : pour simuler les stratégies de conduite de l'irrigation du maïs en contexte limitant.

Encadré 4. Le logiciel LORA : raisonner l'assolement sur le périmètre irrigable

LORA est un instrument d'aide à la décision pour le choix de l'assolement sur le périmètre irrigable de l'exploitation agricole (Jacquin et al., 1993 ; Leroy et Jacquin, 1994).

Compte tenu du milieu (réserve en eau des sols et climat) et du contexte technique et économique de l'exploitation (rendements, prix des produits, aides compensatoires, coût des inputs et notamment de l'eau), LORA recherche un assolement de cultures irriguées et cultivées en sec :
• qui maximise la marge sur le périmètre irrigable ;
• est compatible avec les ressources de l'installation d'irrigation en terme à la fois de volume et de capacité d'irrigation par décade liée au débit disponible et à la disponibilité de la main d'oeuvre ;
• tient compte de la variabilité climatique à travers un ensemble de scénarios basés sur un historique climatique.

Figure 14. Structure du logiciel LORA



Pour rechercher l'adéquation entre les besoins en irrigation de cet assolement et les ressources, LORA envisage plusieurs niveaux de conduite d'irrigation : conduite "bien irrigué" et conduites "restrictives". Il mobilise alors des modèles agronomiques (bilan hydrique et fonction de production) pour évaluer pour chaque conduite et chaque culture, les niveaux d'apport correspondant et les conséquences sur les rendements (Leroy et Jacquin, 1994).

LORA propose des solutions (assolement IDEAL adapté à chaque année climatique, assolement LORA optimisé sur l'ensemble des scénarios climatiques) mais permet également de tester l'assolement de l'agriculteur et de comparer les résultats au niveau économique et au niveau de l'utilisation des ressources. On peut aussi comparer les niveaux de conduite de l'irrigation par culture selon les scénarios climatiques.

En faisant varier certaines hypothèses, on peut alors évaluer l'intérêt et les risques associés à différentes solutions d'assolement. L'analyse de ces solutions donne également une idée des volumes d'eau disponibles pour chaque espèce, et permet ainsi une première approche de la stratégie d'irrigation inter-espèces sur la sole irrigable de l'exploitation.

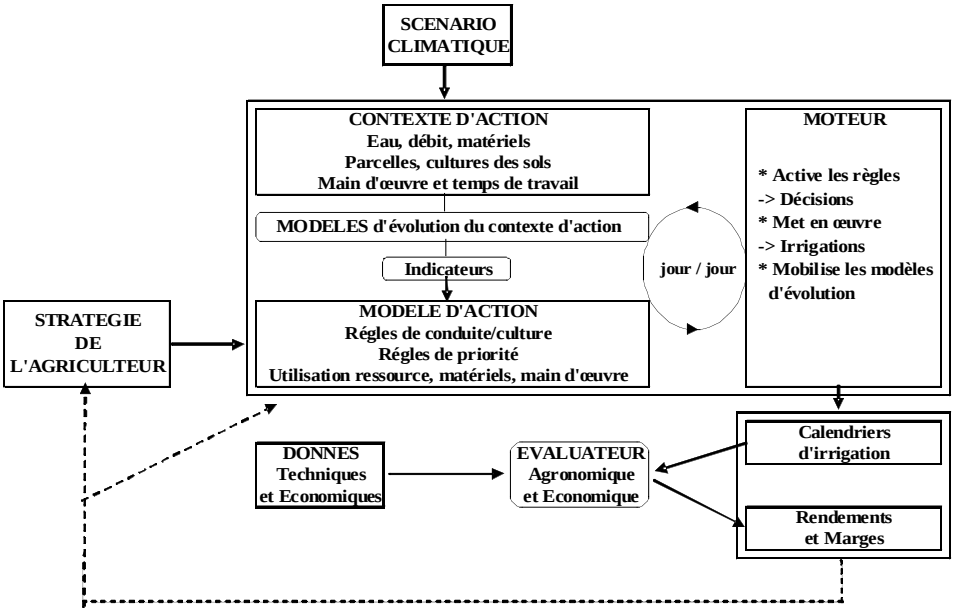
Ce logiciel est actuellement utilisé dans plusieurs régions (Aquitaine, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes…) pour étudier avec les irrigants les évolutions possibles des systèmes irrigués (découplage PAC dès 2006, Loi sur l'Eau 2006, nouvelle tarification EDF…) (Jacquin et al., 2004 ; Lévy et al., 2005...).

Encadré 5. Le simulateur IRMA : raisonner les règles de conduite et d'organisation des chantiers d'irrigation

Ce simulateur d'irrigation a été conçu par l'INRA et ARVALIS - Institut du végétal (Deumier et al., 1995 ; Leroy et al, 1996 ; Labbe et al., 2000)

Son objectif est d'apporter une aide à l'élaboration d'une stratégie d'irrigation pour ***l'ensemble des cultures irriguées du périmètre irrigable****, en tenant compte des caractéristiques précises de l'installation d'irrigation et des contraintes de l'exploitation. Il permet de raisonner les règles de conduite d'irrigation et les règles d'organisation des chantiers d'irrigation (Figure 15).*

Figure 15. Les principes du simulateur IRMA



Il est fait l'hypothèse que l'agriculteur utilise un ensemble de règles de décision plus ou moins implicites pour piloter l'irrigation au cours de la campagne et gérer ses ressources. Ce corps de règles de décision régit l'organisation des chantiers d'irrigation compte tenu des cultures irriguées, des caractéristiques physiques et agronomiques des parcelles irriguées, du débit et du volume d'eau disponible, de la structure du réseau d'irrigation de l'exploitation, des caractéristiques des équipements et du temps de travail. Une série d'entretiens et un travail de suivi de campagnes d'irrigation auprès d'agriculteurs ont amenés à structurer ces règles de décision de la façon suivante :

• des règles de constitution de blocs d'irrigation regroupant les positions d'irrigation (de tout ou partie d'une ou de plusieurs parcelles) gérées de façon homogène ;

• des règles de conduite des irrigations par bloc pour décider des doses et des dates de déclenchement, de retour et d'arrêt des irrigations. Ces règles de la forme "si condition alors action" mobilisent un ensemble d'indicateurs relatifs aux conditions climatiques, à l'état hydrique du sol, aux stades phénologiques des cultures, à l'état actuel ou prévu des ressources... ;

• des règles de gestion des priorités entre les différents blocs d'irrigation précédemment définis ;

• des règles d'utilisation de la ressource en eau, des débits et des équipements sur les différents blocs, compte tenu des caractéristiques et des contraintes propres à l'exploitation ou imposées par l'environnement ;

• des règles de gestion du temps de travail de l'agriculteur.

Ce modèle décisionnel est confronté à différents scénarios climatiques. Pour chacun d'eux, il reconstitue des calendriers d'irrigation pour l'ensemble des parcelles irriguées.

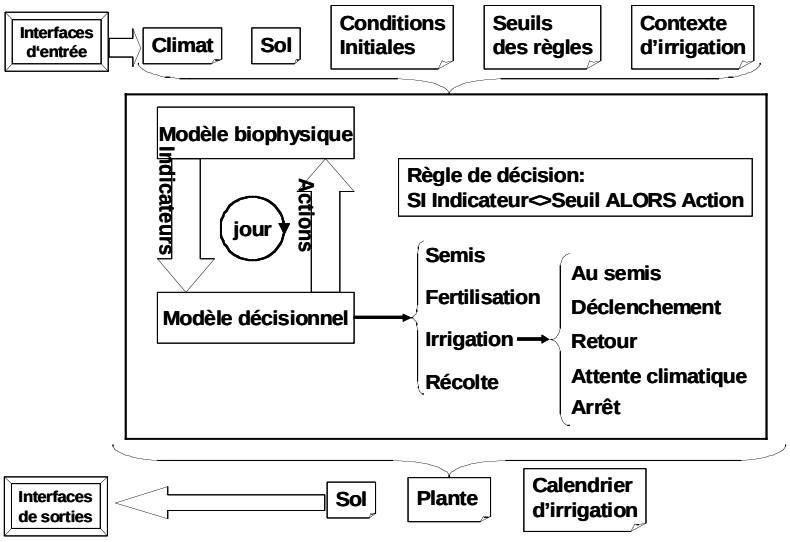
Une base de modèles agronomiques permet d'évaluer tout au long de la simulation l'état des indicateurs utilisés dans les règles de décision, ainsi que les conséquences des calendriers d'irrigation simulés sur l'état hydrique du sol, la satisfaction des besoins en eau des cultures et son effet sur les rendements. Des hypothèses économiques sur le prix des cultures, le coût de l'eau et des autres intrants permettent alors d'évaluer les marges brutes par culture et pour l'assolement, pour chaque scénario climatique envisagé.

L'objectif de ce simulateur est de faire réfléchir l'irrigant sur les règles qu'il mobilise pour gérer sa campagne d'irrigation, d'évaluer leurs cohérences avec ses objectifs et ses stratégies d'irrigation en les confrontant à différents scénarios climatiques.

Encadré 6. MODERATO : simulateur de stratégie de conduites de l'irrigation du maïs en contexte limitant

MODERATO est un outil informatique issu d'une collaboration entre l'INRA Agronomie Toulouse, et ARVALIS – Institut du végétal (Bergez et al., 2001 ; Bergez et al., 2002). Son objectif est de simuler l'application d'une stratégie d'irrigation (ensemble de règles de décision d'irrigation paramétrées visant un objectif donné pour un ensemble de contraintes énoncées) sur une série climatique et sur un sol donné. Il est aussi utilisable en diagnostic, c'est-à-dire pour analyser un calendrier d'irrigation simulé ou observé pour une année particulière, l'évolution de l'état hydrique du sol et du fonctionnement biophysique de la culture. Il est destiné à être utilisé par des techniciens et des chercheurs.

Figure 16. Les principes de fonctionnement de MODERATO



La stratégie de conduite de l'irrigation (maïs) est décrite sous forme de règles de décision représentant de manière simplifiée mais réaliste les décisions de l'agriculteur. Ainsi l'irrigation est représentée par un enchaînement de cinq règles de décision élémentaires : (i) irrigation pendant la période semis-levée, (ii) démarrage de la campagne d'irrigation, (iii) reprise de chaque nouveau tour d'eau, (iv) attente en cas de pluie, (v) décision de fin des irrigations. La règle pour la reprise d'un nouveau tour d'eau inclut des variations de la dose et de la fréquence de retour en fonction du stade de développement de la culture (4 périodes) et selon le volume d'eau restant. Chaque règle fait intervenir un ou plusieurs indicateurs qui déclenchent la décision s'ils atteignent un certain seuil. Ces indicateurs sont calculés par le modèle biophysique et peuvent être soit simples (un nombre de jours) soit plus complexes (une fraction de réserve en eau du sol transpirable). Dans le cadre préétabli de ces règles, l'utilisateur peut tester différentes valeurs de seuils pour les indicateurs et en analyser les conséquences sur les calendriers d'irrigation, les quantités d'eau utilisée, les rendements, les marges.

C'est à l'échelle d'un bloc d'irrigation que sont représentées les décisions de conduite de l'irrigation. On appelle bloc d'irrigation l'unité de surface arrosée par un même matériel et une même ressource. Il est considéré comme homogène du point de vue du sol. La prise en compte du débit et du temps de fonctionnement du matériel permet de tenir compte du temps nécessaire pour arroser l'ensemble des positions du bloc d'irrigation (tour d'eau). Pour ce faire, l'outil simule le fonctionnement de la première et de la dernière position d'irrigation, ainsi que de la médiane, en relation avec le corps de règles de décision choisi. Il est alors possible d'étudier l'hétérogénéité consécutive au temps d'irrigation (Bergez et Nolleau, 2003).
Les contraintes d'équipement sont traduites sous la forme : i) du débit disponible par unité de surface ; ii) du temps d'utilisation de l'installation d'irrigation en heures par jour et iii) des jours éventuels de la semaine sans possibilité d'irriguer. La combinaison de ces éléments permet de calculer une "capacité d'irrigation" en mm par jour. Les contraintes de ressources en eau sont prises en compte par la fixation éventuelle d'un volume d'eau alloué pour la campagne par unité de surface, par des restrictions éventuelles de débit de la ressource pendant la période d'irrigation et par des restrictions éventuelles de droit de prélèvement certains jours de la semaine.

Le modèle biophysique décrit le fonctionnement du système sol-plante pour le maïs en intégrant l'action de la contrainte hydrique sur la mise en place de la surface foliaire, l'accumulation de biomasse, et la mise en place du rendement (Wallach et al., 2001). Il s'agit d'un modèle biophysique dynamique basé sur le concept général

d'interception – conversion du rayonnement au cours du cycle de la culture dont le développement dépend des sommes de températures.
Les données d'entrée ont été choisies pour permettre une utilisation pour le conseil. Il s'agit de données climatiques sur 1 à n années (Tmin, Tmax, rayonnement global, évapotranspiration potentielle (ETP), pluie), de caractéristiques du sol permettant de calculer la réserve utile (profondeur, humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, densité apparente, taux volumique de cailloux par horizon), de l'état hydrique initial du sol, de la date de début de simulation et de la description des règles ou du calendrier d'irrigation.
Les sorties permettent de suivre l'évolution journalière de la culture et du bilan hydrique du sol pour chaque année simulée ainsi que de représenter le calendrier d'irrigation résultant de l'application des règles. En simulation de règles sur plusieurs années, les sorties synthétiques permettent de visualiser et d'analyser la variabilité des résultats : quantité d'eau utilisée, rendement de la culture, comparaison au rendement potentiel (sans stress hydrique), eau perdue par drainage…
MODERATO possède également un générateur de données climatiques et un module d'optimisation des stratégies de conduite. Il est alors possible de proposer une amélioration automatisée des stratégies de conduite de l'irrigation pour des situations moins bien connues (changement climatique, évolution des prix, rareté de la ressource en eau).

2.2.1.2.7. Entre tactique et stratégique : utilisation des modèles de culture comme outils d'aide à la gestion de l'irrigation et à la négociation entre les irrigants et les autorités administratives

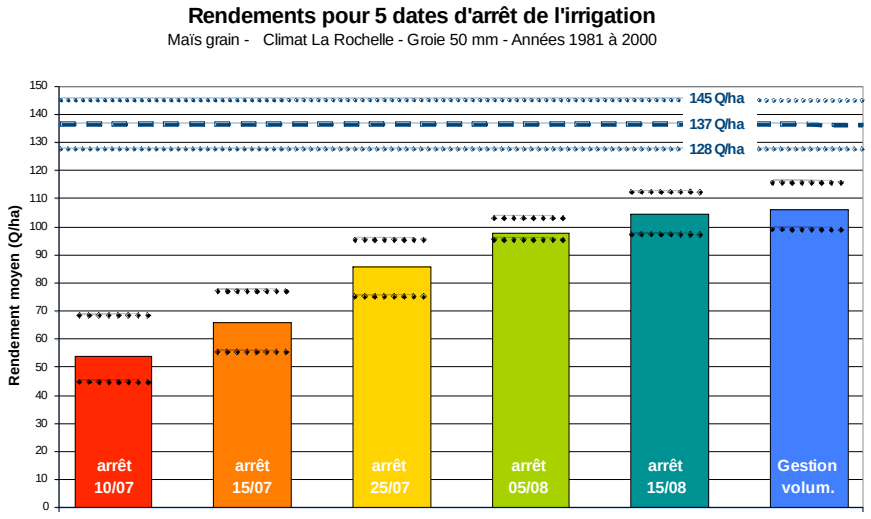
Le logiciel COGITO développé conjointement par AgroTransfert Poitou-Charentes et l'INRA (Levrault et Ruget, 2002) est constitué (i) d'un moteur de modélisation de la culture de maïs (ou de sorgho) permettant de simuler la croissance, le rendement et la consommation d'eau d'une culture donnée dans un contexte pédo-climatique donné (type de sol et série climatique locale) en fonction d'itinéraires techniques déterminés (date de semis, choix variétal, conduite de l'irrigation), et (ii) une interface modèle-utilisateur qui permet de connecter le modèle à des séries climatiques et à une base de données sols puis de gérer les sorties du modèle en terme de graphiques et d'analyses fréquentielles. Dans une première étape, le modèle STICS a été paramétré et validé dans les conditions de Poitou-Charentes à partir de réseaux d'essais (Tayot et al., 1999). Ensuite, l'outil COGITO a été transféré aux conseillers "irrigation" des Chambres d'Agriculture de la Région Poitou-Charentes dans le but de les initier au maniement de l'outil conçu comme une aide au conseil en matière d'irrigation, tant en termes de conduite en temps réel qu'en termes stratégique ou diagnostique hors campagne d'irrigation.

L'outil, dans sa version diffusée permet d'effectuer un certain nombre de simulations de situations concrètes et de scénarios permettant (i) d'éclairer le conseil en irrigation à l'échelle individuelle, (ii) d'organiser une animation collective à l'échelle d'un périmètre ou d'un bassin d'irrigation, ou/et (iii) de servir de base de discussion et de négociation entre les collectifs d'irrigants et les autorités administratives responsables de la gestion des ressources en eau.

En matière de conseil en irrigation, l'outil permet d'effectuer un **diagnostic de gestion de l'irrigation** à l'échelle de l'exploitation individuelle en confrontant pour la campagne écoulée le calendrier des apports d'eau réalisé par l'irrigant à celui qui est proposé par le modèle COGITO. Ainsi l'irrigant peut se rendre compte *a posteriori* de possibles sous- ou sur-irrigations liées à ses pratiques ou au dimensionnement de ses infrastructures. L'outil COGITO fournit également les bases d'une **adaptation tactique** de l'irrigation en cours de campagne, le simulateur permettant de faire un état de la situation de la culture en utilisant les données climatiques passées jusqu'au jour J, et de proposer des hypothèses d'évolution météorologique à partir de cette date, ces hypothèses pouvant être liées à des prévisions plus ou moins fiables. Ces simulations assez lourdes à réaliser au niveau de cas individuels peuvent être faites, dans le cadre d'un service d'avertissement local à l'irrigation, sur des cas types (dates de semis – variétés - types de sol) auxquels chaque irrigant peut se référer. Des conseils plus spécifiques sur les dates de début d'irrigation ou les dates de fin d'irrigation ont montré qu'il y avait à ce niveau une économie d'eau potentielle par rapport à des pratiques d'assurance couramment adoptées en l'absence de tels outils. Enfin, l'outil COGITO permet aux différents acteurs de mieux définir leurs **stratégies en matière d'irrigation** : évaluation fréquentielle des besoins en eau

d'irrigation, dimensionnement de la sole irriguée et/ou des équipements (matériels et réserve collinaire, par exemple), optimisation de répartition spatiale et/ou temporelle d'un volume d'eau limité ou contingenté.

L'outil COGITO, s'il est partagé par l'ensemble des acteurs peut permettre une gestion plus collective des ressources en eau : mise en place d'une gestion volumétrique sur la base de données objectives, estimation plus objective des pertes de rendements liées à des restrictions temporelles d'irrigation, etc., en tant qu'**outil d'aide à la négociation**. A titre d'exemple parmi beaucoup d'autres, la Figure 17 élaborée dans le cadre d'un arbitrage entre un collectif d'irrigants et le service des eaux d'une grande ville, illustre l'effet sur le rendement d'arrêtés d'interdiction d'irrigation plus ou moins précoces. On s'aperçoit par exemple qu'un arrêt d'irrigation après le 15 août ne pénalise pratiquement pas les rendements par rapport à ceux obtenus en gestion volumétrique (plafond à 2700 m^3/ha sans date d'arrêt).



Bâtons et droite en tireté : médianes 1981-2000 ; Pointillés : 1er et 4e quintiles 1981-2000.

Figure 17. Effet sur le rendement-grain du maïs d'un arrêt de l'irrigation plus ou moins précoce et comparaison au rendement grain en gestion volumétrique (bâton de droite) et au rendement grain potentiel (droites en haut) - Simulations COGITO.
(source : F. Levrault, Agrotransfert Poitou-Charentes & S. Hanot, CA 17 – 2003)

Un second exemple (Tableau 10) illustre l'intérêt d'un simulateur tel que COGITO pour comparer les performances de stratégies d'irrigation en conditions sub-optimales.

Tableau 10. Comparaison de 2 stratégies d'irrigation du maïs en début de campagne.
Simulations COGITO - Groie 75 mm - Climat Niort - Années 1991 à 2000
(F. Levrault, Agro-Transfert Poitou-Charentes & P. Boucheny, CA 79 - 2001)

Stratégie 1 : suppression du 1er tour d'eau

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	moyenne
Irrigation (mm)	210	120	270	210	240	330	210	300	240	270	240
Irrig < 15/07 (mm)	0	0	30	60	30	30	0	60	60	30	30
Ecart de rdt (Q/ha)	-10	-10	-2	-7	-8	-8	-8	-10	-10	-12	-9

Stratégie 2 : réduction des apports antérieurs au 16/07

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	moyenne
Irrigation (mm)	230	140	280	210	250	340	230	300	240	280	250
Irrig < 15/07 (mm)	20	20	40	60	40	40	20	60	60	40	40
Ecart de rdt (Q/ha)	-3	-2	-1	-6	-5	-8	-3	-9	-8	-8	-5

Dans une première stratégie, on supprime systématiquement le premier tour d'eau par rapport à une conduite non limitante. Dans une seconde stratégie, on divise par deux les doses des apports antérieurs au 15 juillet par rapport à la même conduite non limitante. Les résultats de rendement sont exprimés en différentiel par rapport au rendement sans contrainte hydrique. La simulation, opérée sur une série de 10 années, fait apparaître la stratégie 2 comme plus pertinente puisqu'à apport d'eau quasi identique, elle minimise nettement la réduction de rendement.

Un tel outil, compte tenu de sa lourdeur relative de manipulation, n'est pas destiné à être proposé comme outil d'aide à la décision pour l'irrigant individuel, même si certains d'entre eux peuvent le manipuler et s'en servir efficacement. Cet outil est surtout destiné aux conseillers en irrigation qui peuvent acquérir par là une possibilité d'adaptation de leurs conseils à différentes situations concrètes en engageant un véritable dialogue avec les irrigants, soit au niveau individuel soit au niveau collectif. Cet outil est aussi destiné à des ingénieurs et techniciens des services administratifs qui peuvent ainsi mieux prendre en compte les contraintes réelles des irrigants en partageant avec eux une même vision objective des problèmes. De plus cet outil a montré de réels atouts sur le plan pédagogique, il devrait pouvoir servir efficacement dans les cycles de formation initiale et/ou professionnelle.

Conclusion sur les outils

L'agriculteur et son environnement de conseil disposent aujourd'hui d'un panel d'outils pour piloter et planifier l'irrigation.
Dans la plupart des cas, les **outils stratégiques** sont pris en main par les ingénieurs du Développement en vue d'une analyse de groupe lors des changements importants de la PAC ou d'accès à la ressource (exemple de LORA, Jacquin et al., 2004). Il peut s'agir également de réviser les règles d'action en fonction d'un nouveau contexte pédoclimatique, économique ou réglementaire afin de mettre à jour le conseil.
Les **outils de pilotage** sont destinés directement aux agriculteurs mais sont encore peu employés malgré leur simplicité. Les irrigants utilisent des règles d'action plus empiriques (Darracq, 1996). Ce constat est valable pour d'autres types de décision mais plus spécialement pour l'irrigation, où la décision tactique est beaucoup plus contrainte par la stratégie que pour d'autres décisions (par exemple l'application d'un fongicide). Les outils fondés sur le bilan hydrique sont plus largement utilisés pour les fonctions d'avertissement à l'irrigation (exemple du BHYP : quand démarrer ? quand arrêter ?) ou d'alerte sécheresse (exemple de Météo-France).
Les outils disponibles sont encore perfectibles tant sur le plan des processus représentés (trop schématiques ou trop restreints au cycle de l'eau) que de leur ergonomie. LORA mériterait ainsi une représentation plus dynamique du besoin en eau des cultures.

Actuellement, des modèles de simulation dynamiques qui permettent d'intégrer les connaissances sur le fonctionnement du système climat-sol-plante sont au cœur des nouveaux outils stratégiques. Ainsi, **Cogito** et **Moderato** sont 2 exemples d'outils pris en main par les ingénieurs du développement pour tester des stratégies d'irrigation (définies ou non par des règles de décision). Ces outils nécessitent encore une validation étendue dans les conditions réelles de l'application.

L'utilisation de ces outils permet de déterminer plus sûrement le calendrier optimal dans un contexte de ressources plus ou moins limitées (en volume, en débit, à certaines périodes de la campagne…). Pour autant, ils ne peuvent garantir une réduction du volume d'irrigation mais plutôt une utilisation plus rationnelle (meilleure valorisation des potentialités dans certains cas, réduction du risque environnemental lié au drainage dans d'autres situations). Ils peuvent permettre également de réviser les règles dès lors que le contexte réglementaire, économique ou climatique a significativement évolué. Ce sont davantage des simulateurs que des générateurs de solutions complètement nouvelles.

2.2.1.4. Conclusion : Quelles solutions pour les systèmes de grande culture ?

En situation irriguée, la réserve utile du sol est souvent limitante bien que l'on ne puisse strictement superposer les cartes de réserve utile et les cartes d'irrigation à l'échelle du territoire. Un grand

nombre de ‘terres à maïs’ se situent en sols de vallée, à texture légère : l’irrigation y est souvent plus accessible, elle est généralement nécessaire car les réserves en eau sont assez faibles même si le sol est profond. Dans ces milieux, les alternatives rentables au maïs irrigué dépendront du rendement accessible avec d’autres cultures peu ou pas irriguées. Dans certains sols (boulbènes du Sud-Ouest, par exemple), l’excès d’eau hivernal limite les possibilités de cultures d’hiver.

Dans les régions méridionales à pluviométrie annuelle de 600-700 mm, on ne peut se passer d’irrigation pour le maïs-grain même en sol profond. Dans le Centre (Beauce, par exemple), les sols superficiels ou moyennement profonds justifient l’irrigation notamment pour le maïs et pour les céréales d’hiver certaines années à printemps sec. En Picardie, l’irrigation est justifiée surtout par son impact positif sur la régularité interannuelle des rendements garantissant l’approvisionnement des usines et par son intérêt pour maîtriser la qualité des cultures industrielles (pomme de terre principalement).

Selon les contextes hydrauliques, les questions de gestion optimale de la ressource en eau d’irrigation se posent différemment à l’échelle de l’exploitation (Puech et al., 1997) :

• en conditions où l’eau d’irrigation est peu ou pas limitante, les cultures exigeantes, à forte valorisation de l’eau (maïs, soja) sont possibles : il s’agit alors d’optimiser le calendrier d’irrigation pour chaque culture, en donnant la priorité au pilotage de l’irrigation (assurer les besoins) avec le souci de maîtriser la fourniture d’azote (sans excès) et de veiller à préserver la structure du sol pour la culture suivante ;

• en conditions d’irrigation plus limitée (volumes, débits, surfaces), il s’agit d’optimiser le choix d’assolement et d’allocation de la ressource entre cultures (voire variétés) compte tenu de leurs périodes de sensibilité au stress : une diversification plus grande est nécessaire, avec des cultures faiblement voire non irriguées.

Lorsque l'eau disponible pour l'irrigation s'avère limitée, deux stratégies sont possibles à l’échelle de l’exploitation :

1) concentrer les volumes disponibles sur des surfaces plus limitées, affectées à des cultures fortement consommatrices à l’hectare mais bien rémunérées (arboriculture fruitière, légumes, production de semences) et, hors de ces périmètres irrigués restreints, choisir des cultures à plus faibles besoins, ou bien assumer les risques de perte sur des cultures plus exigeantes. Cette stratégie peut aussi s’appliquer au maïs dans certains contextes où les potentialités de la culture restent fortes (R > 120 q/ha) et où la rentabilité est conservée dans le cadre de la nouvelle PAC.
Pour ne pas conduire, en année sèche, à des prélèvements "excessifs" ou contestables dans les cours d'eau ou les nappes rechargeables, la surface irriguée intensivement doit être calibrée selon des hypothèses raisonnables.

2) répartir l'eau sur des surfaces plus étendues, en privilégiant l'irrigation de complément avec des niveaux de prélèvement très variables selon les conditions climatiques de l'année. Cette option implique une "sous-utilisation" des ressources en année humide ou "normale" (ressources "perdues" ou stockées selon le régime hydrologique local), mais assure une marge de sécurité pour les années sèches. Cette option implique de réduire significativement les surfaces affectées à des cultures exigeant systématiquement des apports d'eau conséquents, qui sollicitent les ressources en permanence.

Le choix entre ces deux options dépend des moyens d’arrosage disponibles (matériel, ressource), du temps de travail que l’agriculteur accepte de consacrer à l’irrigation, des rapports de prix, enfin de la fréquence des années sèches.

Les conditions diffèrent également selon que l'irrigant dispose d'une ressource individuelle ou commune à quelques agriculteurs (retenue collinaire, dont le remplissage est connu et l'accès garanti...) ou utilise une ressource gérée par un tiers, susceptible d'imposer en cours de saison des restrictions de prélèvement au vu de l'état de la ressource. S'y ajoutent des contraintes liées à l'équipement d'irrigation de l'agriculteur, qui peut imposer une limitation du débit, des surfaces irrigables, de durée du tour d'eau.

Selon que la limitation est provoquée par le débit (épuisement de la ressource, équipement insuffisant) ou par le volume (lac non rempli), les stratégies d'irrigation devront être différentes, en particulier pour le maïs : stockage précoce de l'eau d'irrigation dans le premier cas et mobilisation des réserves du sol en fin de cycle, concentration du volume autour de la floraison dans le second cas.

Diversifier davantage les successions de cultures par des espèces d'hiver ou des espèces tolérant la sécheresse est un impératif pour assurer la durabilité des systèmes en sec dans un contexte de sécheresse plus fréquent (répartir les risques, éviter les problèmes parasitaires et le salissement des sols). C'est également le cas pour les systèmes irrigués dès lors qu'ils sont soumis à un risque de restriction en débit ou en volume.

Le conseil technique communique principalement sur le pilotage des irrigations pour les différents contextes hydrauliques et pédoclimatiques, et moins sur l'adaptation des systèmes de culture aux évolutions de la ressource en eau, en partie faute d'outils. Pour cette fonction, la promotion des modèles de simulation devrait être encouragée dans le but de proposer les meilleurs choix 'culture x variété x date de semis x irrigation' pour les contextes actuels et pour les scénarios de climat et de ressource en eau à venir.

Pour réduire le recours à l'eau d'irrigation, on peut envisager plusieurs scénarios :

1) **Assolement constant, sans réduction a priori de la performance productive du système** : mobiliser les matériels les plus efficients, pratiquer les conditions d'application les plus efficientes, utiliser les outils d'aide au pilotage pour apporter ce qui convient au bon moment…
On se positionne ici dans une approche d'irrigation **raisonnée,** qui évite les gaspillages, et peut sensiblement améliorer la performance agronomique, économique et environnementale des systèmes de culture.
Là où elle sera pratiquée, l'irrigation devra probablement se conformer à ce cahier des charges pour être durable.
Il n'est pas évident que cette pratique permette des économies d'eau substantielle par rapport à la pratique actuelle (où on peut penser que certains irrigants sont inefficients par défaut). Un meilleur raisonnement, s'il était appliqué partout, ne conduirait pas à une diminution des quantités d'irrigation de plus de 10%.

2) **Assolement constant, avec une réduction des objectifs de production** : il s'agit alors de réduire le besoin en eau d'irrigation de la culture par des variétés précoces et un ajustement des autres intrants à l'objectif de rendement (densité de semis, azote). Dans le cas du maïs, la baisse de rendement peut être compensée, dans les zones où des restrictions estivales sont fréquentes, par une meilleure efficience de l'eau et une diminution du coût de séchage. Ceci suppose que l'effort de sélection permette de décorréler en partie rendement et précocité. D'après les premiers résultats de Lorgeou et al (2006), les économies d'eau seraient de l'ordre de 15-20% par rapport à la pratique actuelle si l'on généralisait cette pratique.

3) **Assolement modifié, dans le sens d'une moindre dépendance à l'eau d'irrigation** : c'est un scénario qui peut avoir de nombreuses variantes (forte proportion de cultures à irrigation d'appoint, augmentation de la part de cultures non irriguées, augmentation de la part des cultures d'hiver…). Il est clair que ce scénario est le mieux à même de réduire significativement la quantité d'irrigation et, si la proportion de cultures d'hiver et de printemps est forte, de décaler l'utilisation de l'eau vers des périodes moins concurrentielles. Ce scénario est aujourd'hui davantage évoqué dans les zones d'irrigation où le maïs avait pris une forte extension, notamment parce que les coûts de séchage sont de plus en plus élevés, que le prix du maïs a baissé, que la nouvelle PAC nivelle les avantages comparatifs en terme de marges des différentes cultures et qu'une simplification du chantier d'irrigation est souhaité par de nombreux irrigants. Selon la proportion de l'assolement qui sera conduit en irrigation d'appoint, les économies seront variables : la substitution d'un maïs irrigué par un sorgho irrigué permet une économie d'au moins 50% des volumes d'eau, celle d'un maïs irrigué par un blé dur avec irrigation d'appoint une économie d'au moins 60% (cf. Figures 3 et 6). La faisabilité de ces substitutions de cultures doit cependant être étudiée au cas par cas : elle sera limitée

par une baisse trop forte des marges, des problèmes de succession de cultures (blé sur blé) et certains effets sur les filières.

Aussi ces chiffres doivent ils être replacés dans le contexte des contraintes agronomiques et pédoclimatiques.

- Dans les zones à risque d'anoxie et d'ennoyage hivernal, seules les cultures d'été sont souvent envisageables (si l'on ne souhaite pas revenir à la prairie). L'irrigation est alors nécessaire car la réserve en eau du sol n'est pas suffisante.
- Pour des contraintes d'ordre phytosanitaire mais aussi d'organisation du travail et de répartition des risques, on ne peut envisager des systèmes à base uniquement de cultures d'hiver, sauf dans des milieux très contraints où l'irrigation n'est pas possible.
- Si telle ou telle culture apparaît comme une solution possible tant sur le plan agronomique que économique (cas du blé dur vis-à-vis du maïs dans le Sud-Ouest), l'augmentation des surfaces ne peut s'envisager (si elle n'est pas contingentée) sans remise en cause de la rentabilité de la culture (problèmes pathologiques, baisse des prix).

Une régionalisation des solutions doit nécessairement être proposée pour tenir compte :
- des cultures possibles (aire de production),
- des contraintes économiques (quotas, débouchés),
- des contraintes liées à la nature de la ressource et aux usages concurrents.

Remerciements à Jean-Marc Deumier (Arvalis-Institut du Végétal) pour la mise à disposition de la documentation technique.

Références bibliographiques

Aboudrare A., Debaeke P., Bouaziz A., Chekli H. (2006). Effects of soil tillage and fallow management on soil water storage and sunflower production in a semiarid Mediterranean climate. *Agricultural Water Management*, 83, 183-196.

Agreste (2001). Recensement agricole 2000. Résultats régionaux et départementaux.

Agreste (2004). Enquête sur les pratiques culturales en 2001. *Agreste, Chiffres et Données*, n°159, 253 p.

Anastasi U., Cammarata M., Abbate V. (2000). Yield potential and oil quality of sunflower (oleic and standard) grown between autumn and summer. *Italian Journal of Agronomy,* 4, 23-36.

Anderson W.K. (1984). Plant populations for triticale in a Mediterranean environment. *Field Crops Research,* 8, 281-295.

Anderson W.K. (1985). Grain yield responses of barley and durum wheat to split nitrogen applications under rainfed conditions in a Mediterranean environment. *Field Crops Research* , 12, 191-202.

Balas B, Deumier J.M, Merrien A., Lacroix B., Bouthier A. (1995). Boulbènes de l'Astarac. Quel assolement, quelle stratégie d'irrigation ? *Perspectives Agricoles,* 200, 96-103.

Bergez J.E., Nolleau S. (2003). Maize grain yield variability between irrigation stands: a theoretical study. *Agricultural Water Management,* 60, 43-57.

Bergez J.E., Deumier J.M., Lacroix B., Leroy P., Wallach D. (2002). Improving irrigation schedules by using a biophysical and decisional model. *European Journal of Agronomy,* 16, 123-135.

Bergez J.E., Debaeke P., Deumier J.M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P., Wallach D. (2001). MODERATO : an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological Modelling*, 137, 43-60.

Blanchet R., Merrien A., eds (1990). *Le tournesol et l'eau*. Coll. Points Science, Cetiom, 137 p.

Blum A. (1972). Effect of planting date on water-use and its efficiency in dryland grain sorghum. *Agronomy Journal,* 64, 775-778.

Blum A. (1993). Selection for sustained production in water-deficit environments, in : *International Crop Science I*, CSSA, Madison (WI, USA), p.343-346

Bougel F., Champolivier L., Lespinas L., Merrien A., Reau R., Le Clech B., Paget G. (2001). Irrigation du tournesol : une méthode de pilotage économe en eau. *Oléoscope*, 60, 15-17.

Boujghagh M. (1990). Effets des semis d'hiver sur deux génotypes de tournesol dans la région du Saïss-Fès. *Helia*, 13 (13), 107-119.

Bouthier A. (2005). Irrigation des céréales : pour sécuriser rendement et qualité. *Perspectives Agricoles*, 313, 68-71.

Bouthier A., Bonnifet J.P., Merrien A., Deumier J.M., Lacroix B. (1995). Poitou-Charentes: vers une meilleure gestion de l'eau. *Perspectives Agricoles,* 203, 18-26.

Braun P., Laconde J.P., Hervillard A.S., Bonnefoy M., Bernicot M.H. (2006). Blé dur : choisir des variétés adaptées à ses contraintes. *Perspectives Agricoles,* 322, 44-51.

Bremner P.M., Preston G.K., Fazekas de St Growth C. (1986). A field comparison of sunflower (Helianthus annuus) and sorghum (Sorghum bicolor) in a long drying cycle. I. Water extraction. *Australian Journal of Agricultural Research,* 37, 483-493.

Brown S.C., Keatinge J.D.H., Gregory P.J., Cooper P.J.M., (1987). Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in Northern Syria. I. Root and shoot growth. *Field Crops Research,* 16, 53-66.

Burt C.M., Clemmens A.J, Strelkoff T.S., Solomon K.H., Howell T., Eisenhauer D. Bleisner R. (1997). Irrigation performance measures. Efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123(6), 423-442.

Cabelguenne M. (1981). *Facteurs technico-économiques de la valorisation de l'irrigation : le cas des grandes cultures d'été dans le Sud-Ouest de la France*. Thèse, Univ.Toulouse-Le Mirail, 214 p.

Cabelguenne M., Marty J.R., Hilaire A. (1982). Comparaison technico-économique de la valorisation de l'irrigation par 4 cultures d'été (maïs, soja, sorgho, tournesol). *Agronomie,* 2, 567-576.

Cantero-Martinez C., Villar J.M., Romagosa I., Fereres E. (1995). Nitrogen fertilization of barley under semi-arid conditions, *European Journal of Agronomy,* 4, 309-316.

Cetiom (2001a). Tournesol et environnement (1ère partie). *Oléoscope,* 60, 9-23.

Cetiom (2001b). Tournesol et environnement (2èmee partie). *Oléoscope,* 63, 9-21

Champolivier L., Merrien A. (1996). Effects of water stress applied at different growth stages to Brassica napus L. var. oleifera on yield, yield components and seed quality. *European Journal of Agronomy,* 5, 153-160.

Choisnel E. (1985) Un modèle agrométéorologique opérationnel de bilan hydrique utilisant les données climatiques. In : *Les besoins en eau des cultures.* Conférence Internationale CIID, Paris, 11-14 Sept 1984, INRA, Paris, p.115-132.

Clemmens A.J. (2000). Measuring and improving irrigation system performance at the field level. In *Proceedings of 2000 National Conference and Exhibition*, *Irrigation Association of Australia*, May 2000, Melbourne (Australia), pp 190-199.

Connor D.J., Loomis R.S. (1991). Strategies and tactics for water-limited agriculture in low rainfall Mediterranean climates, in : *Proceedings International Symposium on Improvement and Management of Winter Cereals under Temperature, Drought and Salinity Stresses*, INIA, Cordoba (Spain), p. 441-465

Cooper P.J.M., Gregory P.J (1987). Soil water management in the rain-fed farming systems of the Mediterranean region. *Soil Use and Management*. 3, 57-62.

Coupiac J. (1998). Le sorgho : des rendements en nette progression. *Perspectives Agricoles,* 237, 19-25.

Darracq S. (1996). Identification et modélisation des règles de décision utilisées par les maïsiculteurs en Aquitaine. Mémoire de DAA INA PG, 65 p..

Debaeke P. (2004). Scenario analysis for cereal management in water-limited conditions by the means of a crop simulation model (STICS). *Agronomie (N° Special STICS)* 24, 315-326.

Debaeke P., Cabelguenne M. (1994). Influence of previous crop on available water for a subsequent winter wheat on a deep silty clay soil. *Proc. 3rd ESA Congress*, Padova (Italy), p. 682-683.

Debaeke P., Hilaire A. (1997). Production of dryland and irrigated crops under different crop rotations and input levels in Southwestern France*. Canadian Journal of Plant Science,* 77, 539-548.

Debaeke P., Nolot J.M. (2000). Testing crop management systems for sunflower in South-West France. *Proc.15th Int.Sunflower Conf*., Toulouse, C, 1-6

Debaeke P, Aboudrare A. (2004). Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy,* 21, 433-446.

Debaeke P., Nolot J.M., Raffaillac D. (2006). A rule-based method for the development of crop management systems applied to grain sorghum in south-western France. *Agricultural Systems,* 90, 180-201.

Debaeke P., Nolot J.M. (2006). Evaluation expérimentale et par modèle de systèmes de culture adaptés à la disponibilité en eau d'irrigation. *Agronomy for Sustainable Development* (soumis)

Deblonde P.M.K, Haverkort A.J, Ledent J.F (1999). Responses of early and late potato cultivars to moderate drought conditions : agronomic parameters and carbon isotope discrimination. *European Journal of Agronomy,* 11, 91-105.

De La Torre C., Benoit M. (2004). *Changement climatique et observations à long terme en Unités Expérimentales : évolution des pratiques agricoles et des réponses physiologiques des couverts végétaux*. Document INRA. MICCES-04, 50 p.

Deumier J.M, Jacquin C., Leroy P. (1995). *Simulateur de conduite des irrigations.* Rapport de l'étude réalisée avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Alimentation. ITCF-INRA, Paris.

Deumier J.M., Balas B., Bouthier A. (1995). Boulbènes de l'Astarac. Quel assolement, quelle stratégie d'irrigation? *Perspectives Agricoles,* 200, 96-103.

Deumier J.M., Balas B., Bouthier A, Lacroix B., Golaz F. (2001). Raisonner l'arrêt de l'irrigation sur le maïs : des indicateurs utiles pour décider. *Perspectives Agricoles,* 270, 70-75

Deumier J.M, Lacroix B., Mangin M., Vallade S., Molle B., Granier J. (2003). IRRIPARC : II - Des réglages de canons enrouleurs adaptés aux conditions de vent. *Proc.54th Conférence ICID*, Montpellier, 14-19 Sept, 2003, 17 p.

Deumier JM, Boussaguet J., Mailheau M. (2005). Stratégie des agriculteurs, pilotage et ajustement des apports d'eau aux besoins des cultures. *Colloque Cemagref « Eau et agriculture durable »,* SIMA, Paris, 1/03/2005., 8p.

Deumier J.M, Lacroix B., Bouthier A., Verdier J.L, Mangin M. (2006a). Stratégies de conduite de l'irrigation du maïs et du sorgho dans les situations de ressource en eau restrictive. www.irrinov.arvalisinstitutduvegetal.fr

Deumier J.M, Leroy P, Jacquin C., Balas B., Bouthier A., Lacroix B., Bergez J.E (2006b). Gestion de l'irrigation au niveau de l'exploitation agricole. *Traité d'irrigation* (à paraître)

Doorenbos J., Kassam A.H (1979). *Yield response to water*, Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, Rome (Italy), 193 p.

Downey L., Miller J. (1971). Rapid measurements of relative turgidity in maize (Zea Mays L.). *New Phytologist* , 3, 555-560.

Druesne C., Baudart C., Bouthier A., Clouté G., Leclech N., Moynier J.L, Renoux J.P, Fournier C. (2006). Irrigation : anticiper les restrictions d'eau. *Perspectives Agricoles,* 322, 19-33.

Dubalen J. (1993). Utilisation des matériels d'irrigation par aspersion. Diagnostic de fonctionnement au champ. *La Houille Blanche* 2/3, 183-188.

Fereres E., Gimenez C., Fernandez-Martinez J. (1986). Genetic variability in sunflower cultivars under drought. I. Yield relationships*. Australian Journal of Agricultural Research,* 37, 573-582.

Fischer, R.A. (1981). Optimizing the use of water and nitrogen through the breeding crops. *Plant and Soil,* 58, 249-278.

Fischer R.A., Howe G.N., Ibrahim Z. (1993). Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. I. Grain yield and protein content. *Field Crops Research,* 33, 37-56.

Flagella Z., Rotunno T., Tarantino E., Di Caterina R., De Caro A. (2002) Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (Helianthus annuus L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *European Journal of Agronomy*, 17, 221-230.

Garabet S., Ryan J., Wood M. (1998). Nitrogen and water effects on wheat yield in a Mediterranean-type climate. II Fertilizer-use efficiency with labelled nitrogen. *Field Crops Research,* 58, 213-221.

Gerik T, Freebairn D. (2004). Management of extensive farming systems for drought-prone environments in North America and Australia. In "New directions for a diverse planet", *Proc 4th Int Crop Science Cong.*, Brisbane (Australia), www.cropscience.org.aus, 9 p.

Gimenez C., Fereres E. (1986). Genetic variability in sunflower cultivars under drought. II. Growth and water relations. *Australian Journal of Agricultural Research,* 37, 583-597.

Gimeno V., Fernandez-Martinez J.M., Fereres E. (1989). Winter planting as a means of drought escape in sunflower. *Field Crops Research,* 22, 307-316.

Gonzalez A, Martin I, Ayerbe L (1999). Barley yield in water-stress conditions. The influence of precocity, osmotic adjustment and stomatal conductance. *Field Crops Research,* 62, 23-34.

Granier J., Molle B., Folton C., Deumier J.M. (2003). IRRIPARC : I - Modeling spatial water distribution under a sprinkler, in windy conditions. *Proc.54th Conférence ICID*, Montpellier, 14-19 Sept 2003.

Gregory P.J., Shepherd K.D., Cooper P.J.M. (1984). Effects of fertilizer on root growth and water use of barley in northern Syria. *Journal of Agricultural Science,* 103, 429-438.

Harmsen K. (1984). Nitrogen fertilizer use in rainfed agriculture, *Fertilizer Research,* 5, 371-382.

Hattendorf M.J., Redelfs M.S., Amos B., Stone L.R., Gwin R.E., Jr. (1988). Comparative water use characteristics of six row crops. *Agronomy Journal* , 80, 80-85.

Hendawi M. (2006) *Etude des pertes d'eau par évaporation et dérive sur un jet d'asperseur.* Thèse Université Aix-Marseille 2, 217 p

Hergert G.W., Klocke N.L., Pedersen J.L., Nordquist P.T., Clark R.T., Wicks G.A (1993). Cropping systems for stretching limited irrigation supplies. *Journal of Production Agriculture,* 6, 520-529.

Herwaarden A.F. van, Farquhar G.D., Angus J.F., Richards R.A., Howe G.N. (1998). 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertiliser. I.Biomass, grain yield, and water use. *Australian Journal of Agricultural Research,* 49, 1067-1081.

Huber L., Dubois de la Sablonnière F. (1992). L'irrigation est-elle synonyme de fortes pertes par évaporation pendant les heures chaudes de journées estivales. *Perspectives agricoles* 170, 59-64.

Isbérie C, Peyremorte P., Bouthier A, Belueau E., Le Doré F. (1995). Les outils de conduite fondés sur la mesure de l'état hydrique du sol. In La conduite de l'irrigation. *De la stratégie au pilotage de l'irrigation*. RNED Hydraulique, AFEID, Cemagref Editions, p 85-99.

ITCF (1993). *Gérer l'irrigation en grandes cultures*, Brochure Optim'Eau, Mai 1993, 56 p

ITCF (2002). *Choisir : Sorgho*. *Variétés – conduites de culture*. ITCF (Paris), 67 p.

Justes E., Dorsainvil F., Thiébeau P., Alexandre M. (2002). Effect of catch crops on the water budget of the fallow period and the succeeding main crop. *Proc 7th ESA Congress*, Cordoba (Spain), p. 503-504.

Jacquin C., Deumier J.M., Leroy P. (1993). LORA et la gestion de l'eau dans l'exploitation agricole. *Perspectives Agricoles,* 184, 73-82.

Jacquin C, Marsac S, Porte-Laborde A, Campagnaud M (2004). Maîtriser les coûts de l'irrigation : incidence de la nouvelle PAC sur la gestion de l'eau dans les exploitations. *Colloque au champ « Eau, source de cultures »,* 11 Juin 2004, Losse (Landes), p. 67-89.

Katerji N (1997). Les indicateurs de l'état hydrique de la plante. In « *L'eau dans l'espace rural* » (Riou C, Bonhomme R, Chassin P, Neveu A, Papy F, eds), AUPELF-URELF & INRA Editions, pp. 169-177.

Krieg D.R., Lascano R.J. (1990). Sorghum. In : (B.A.Stewart and D.R.Nielsen eds), *Irrigation of Agricultural Crops, Agronomy Monograph* N°30, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, p 719-739.

Labbe F, Ruelle P, Garin P, Leroy P (2000). Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages *European Journal of Agronomy* 12, 55-67.

Latiri-Souki K., Nortcliff S., Lawlor D.W. (1998). Nitrogen fertilizer can increase dry matter, grain production and radiation use efficiencies for durum wheat under semi-arid conditions. *European Journal of Agronomy,* 9, 21-34.

Leenhardt D., Voltz M., Rambal S. (1995). A survey of several agroclimatic soil water balance models with reference to their spatial application. *European Journal of Agronomy* , 4 (1), 1-14.

Leroy P., Jacquin C. (1994). *Un logiciel pour le choix d'assolement sur le périmètre irrigable d'une exploitation.* 17ème Conf. Rég. Europ. Irrigation Drainage ICID/CIID, Varna (Bulgarie), 16-22/05/1994. Vol 2, p 61-72.

Leroy P., Deumier J.M., Jacquin C. (1996). Water management at farm level. Method and tool to support strategic decisions - In: *Management of Limited Water Resources. Agro-economical Consequences.* Final report of the EU contract no. 8001-CT91-0109.

Lespinas J.L, Merrien A, Champolivier L. (2004). Contrôler la surface foliaire pour décider d'irriguer le tournesol. *Oléoscope,* 74, 23-24.

Levrault F., Ruget F. (2001). Cogito, un modèle pour l'irrigation du maïs. In : Malézieux E, Trébuil G, Jaeger M, eds., *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision.* CIRAD-INRA, 187-202.

Lévy J.D., Bertin M., Combes B., Mazodier J., Roux A., (2005). *Irrigation durable*. Rapport CGGREF-MAAPR, 38 p. + annexes.

Loomis R.S. (1983). Crop manipulations for efficient use of water: an overview. In : *Limitations to efficient water use in crop production (*Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R., eds), American Society of Agronomy, Madison (WI, USA), p.345-374.

Lopez-Bellido L., Fuentes M., Castillo J.E., Lopez-Garrido F.J., Fernandez E.J. (1996). Long-term tillage, crop rotation, and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal,* 88, 783-791.

Lorgeou J., Martin B. (2005). Précocité des variétés de maïs grain. *Perspectives Agricoles,* 309, 66-75.

Lorgeou J., Bouthier A., Renoux JP, Cloute G. (2006). Stratégie d'évitement en maïs grain dans le Centre—Ouest : adapter le cycle aux contraintes hydriques par la précocité. *Perspectives Agricoles,* 321, 62-67.

Louie M.J., Selker J.S. (2000) Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126, 142-148.

Ludlow M.M., Muchow R.C. (1990). A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Advances in Agronomy,* 43, 107-153.

Mailhol J.C (2003). Analyse de la consommation en eau dans les différents contextes d'agriculture irriguée. Etude MEDD, Avril 2003, 33p (http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/eau/etude_cemagref_prelevements_2001.pdf)

Mailhol J.C. (2005). *Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Univ. Montpellier II, 74p +annexes

Mailhol J.C., Revol P., Ruelle P. (1996). PILOTE: an operational model for identifying crop water stress. In : Sustainability of irrigated agriculture: crop-water-environment models. *Proceedings of workshop at the 16th ICID Congress*, Cairo, Egypt, 17 Sept 1996.

Marty J.R, Puech J., Maertens C., Blanchet R. (1975). Etude expérimentale de la réponse de quelques grandes cultures à l'irrigation. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France,* 61 (10), 560-570.

Merrien A., Champolivier L. (1995). Tournesol : Existe-t-il une réponse variétale à la sécheresse? *Oléoscope,* 26, 22-24.

Merrien A., Isbérie C, Bouthier A, Peyremorte P., Ruelle P. (1995). Des capteurs pour demain : outils de contrôle de l'état hydrique du végétal. In La conduite de l'irrigation. *De la stratégie au pilotage de l'irrigation*. RNED Hydraulique, AFEID, Cemagref Editions, pp 109-124.

Muchow R.C., Hammer G.L, Vanderlip R.L. (1994). Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. II. Effects of planting date, soil water at planting, and cultivar phenology, *Field Crops Research,* 36, 235-246.

Munawar A, Blevins R. L., Frye W. W. (1990). Tillage and cover crop management for soil water conservation. *Agronomy Journal,* 82, 773-777.

Nielsen D.C, Vigil M.F, Anderson R.L, Bowman R.A, Benjamin J.G, Halvorson A.D (2002). Cropping system influence on planting water content and yield of winter wheat. *Agronomy Journal,* 94, 962-967.

Nolot, J.M, Debaeke, P. (2001). A generic model to manage N in cropping systems differing by water availability. *11th Nitrogen Workshop*, Reims (France), 9-12 /09/2001, 401-402

Nolot J.M., Debaeke P. (2003). Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. *Cahiers Agricultures,* 12, 387-400

Nordblom T.L., Ahned A.H., Miller S.F., Glenn D.M. (1985). Long-run evaluation of fertilization strategies for dryland wheat in Northcentral Oregon: simulation analysis. *Agricultural Systems,* 18, 133-153.

Norwood C. (1994). Profile water distribution and grain yield as affected by cropping system and tillage. *Agronomy Journal* , 86, 558-563.

Norwood C.A, Currie R.S (1997). Dryland corn vs grain sorghum in Western Kansas*. Journal of Production Agriculture,* 10, 152-157.

Norwood C.A. (2001). Planting date, hybrid maturity, and plant population effects on soil water depletion, water use, and yield of dryland corn. *Agronomy Journal,* 93, 1034-1042.

Oweis T., Hachum A., Pala M. (2005). Faba bean productivity under rainfed and supplemental irrigation in northern Syria. *Agricultural Water Management* , 73, 57-72.

Passioura J.B. (1977). Grain yield, harvest index and water use of wheat. *Journal of Australian Institute of Agricultural Science,* 43, 117-120.

Passioura J.B (2006). Increasing crop productivity when water is scarce – from breeding to field management. *Agricultural Water Management,* 80, 170-196.

Pereira L.S., Oweis T., Zairi A. (2002) Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management* 57, 175-206.

Peyremorte P., Tron G. (1989). Prédominance du contexte physique et humain pour le choix d'une stratégie de pilotage des irrigations. In : *Actes du colloque des Nations Unies sur les méthodes améliorées pour préserver et protéger les ressources en eau et augmenter le rendement des cultures*. Avignon 25-29 /09/1989, 12p

Pitts D., Peterson K., Gilbert G., Fastenau R. (1996). Field assessment of irrigation system performance. *Applied Engineering in Agriculture* 12, 307-313

Puech J, Cabelguenne M, Attonaty JM, Leroy P, Amigues JP, Balas B, Perarnaud V (1997). Gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation agricole. In « *L'eau dans l'espace rural* » (Riou C, Bonhomme R, Chassin P, Neveu A, Papy F, eds), AUPELF-URELF & INRA Editions, p. 101-119.

Rachidi F., Kirkham M.B., Stone L.R., Kanemasu E.T. (1993). Soil water depletion by sunflower and sorghum under rainfed conditions. *Agricultural Water Management,* 24, 49-62.

Richards R.A. (2006). Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. *Agricultural Water Management,* 80, 197-211.

Rinaldi M., Rizzo V., Franceso F. (1996). Effects of winter sowing on sunflower yield, oil and plant characteristics in Southern Italy. *Proc 14th Int.Sunflower Conf*., Beijing (China), 345-350.

Rinaldi M. (2004). Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with the CERES-Wheat model. *Field Crops Research,* 89, 27-37.

Robinson C.A. (2003). Dryland farming. In *Encyclopedia of Water Science,* B.A. Stewart & T.Howell (eds), Marcel Dekker, Inc., New York, 183-186.

Ruelle P., Mailhol J.C, Itier B. (2004). Evaluation des pertes par évaporation lors des irrigations par aspersion en condition de fort déficit hydrique. *Ingénieries – E.A.T*, n°38, 13-20.

Ruelle P., Mailhol J.C., Molle B. (2005). Systèmes et stratégies d'irrigation pour une agriculture durable. *Comptes Rendus de l' Académie d'Agriculture de France,* 16 Mai 2005, Paris, 16p.

Sadras V.O., Connor D.J. (1991). Physiological basis of the response of harvest index to the fraction of water transpired after anthesis: a simple model to estimate harvest index for determinate species. *Field Crops Research,* 26, 227-239

Scopel E. (1994). Le *semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique: Intérêt de cette technique pour améliorer l'alimentation hydrique du mais pluvial en zones à pluviométrie irrégulière*. Thèse de doctorat, INA PG, 334 p.

Sinclair T.R., Muchow R.C. (2001). System analysis of plant traits to increase grain yield on limited water supplies. *Agronomy Journal*. 93, 263-270

Sivakumar M.V.K, Glinni A.F (2002). Applications of crop growth models in the semiarid regions, in : Ahuha L.R., Ma L., Howell T.A. (Eds), *Agricultural System Models in Field Research and Technology transfer*, Lewis Publishers, 2002, 178-205.

Soltani A., Galeshi S. (2002). Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperate sub-humid environment : experimentation and simulation, *Field Crops Research,* 77, 17-30.

Soriano M.A, Orgaz F., Villalobos F.J, Fereres E. (2004). Efficiency of water use of early plantings of sunflower. *European Journal of Agronomy,* 21, 465-476.

Stone L.R, Schlegel A.J, Gwin R.E, Khan A.H (1996). Response of corn, grain sorghum, and sunflower to irrigation in the High Plains of Kansas. *Agricultural Water Management,* 30, 251-259.

Tanner C.B, Sinclair T.R (1983). Efficient water use in crop production: research or re-search. In : *Limitations to efficient water use in crop production (*Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R., eds), American Society of Agronomy, Madison (WI, USA), p.1-27.

Tayot X., Ruget F., Bouthier A., Lorgeou J., Lacroix B., Pons Y. (1999). STICS en Poitou-Charentes : calibration et validation sur maïs et sorgho. *Perspectives Agricoles,* 243, 87-95.

Teyssier F. (2006). Consommations d'eau pour irrigation sur 2001-2005 en Midi-Pyrénées. *Agreste Midi-Pyrénées*, Données n°35, 4p.

Tron G., Isbérie C., Chol P. (2000). *La tensiométrie pour piloter les* irrigations : une *gestion raisonnée de la ressource en eau*. Educagri Editions, 247 p.

Turner N.C. (2004a). Agronomic options for improving rainfall use efficiency of crops in dryland farming systems. *Journal of Experimental Botany* , 54, 2413-2425.

Turner N.C. (2004b). Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. *Annals of Applied Biology* , 144, 139-147.

Turner N.C., Wright G.C., Siddique K.H.H. (2001). Adaptation of grain legumes (pulses) to water-limited environments*. Advances in Agronomy,* 71, 193-231.

Turner N.C., Prasertsak P., Setter T.L. (1994). Plant spacing, density, and yield of wheat subjected to postanthesis water deficits. *Crop Science,* 34, 741-748.

Unger P.W. (1990). Sunflower. In: *Irrigation of Agricultural Crops*. B.A. Stewart and D.R. Nielson (eds). ASA Monograph n° 30, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 775-791.

Unger P.W., Stewart B.A., Parr J.F., Singh R.P. (1991). Crop residue management and tillage methods for conserving soil and water in semi-arid regions. *Soil Tillage Research,* 20, 219-240.

Van den Boogaard R., Veneklaas EJ, Peacock JM, Lambers H (1996). Yield and water use of wheat in a Mediterranean environment : cultivar differences and sowing density effects. *Plant and Soil,* 181, 251-262.

Vlek P.L.G, Fillery I.R.P., Burford J.R. (1981). Accessions, transformation and loss of nitrogen in soils of the arid region. *Plant and Soil* , 58, 133-176.

Wade L.J., Douglas A.C.L. (1990). Effect of plant density on grain yield and yield stability of sorghum hybrids differing in maturity (Sorghum bicolor). *Australian Journal of Experimental Agriculture,* 30, 257-264.

Wagner-Riddle C., Gillespie T.J., Swanton C. J. (1994). Rye cover crop management impact on soil water content, soil temperature and soybean growth. *Canadian Journal of Plant Science,* 74, 485-495.

Wahbi A., Sinclair T.R. (2005). Simulation analysis of relative yield advantage of barley and wheat in an eastern Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 91, 287-296.

Wallach D, Goffinet B, Bergez J.E, Debaeke P, Leenhardt D, Aubertot JN (2001). Parameter estimation for crop models : a new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal,* 93, 757-766.

Westfall D.G., Havlin J.L., Hergert G.W., Raun W.R. (1996). Nitrogen management in dryland cropping systems. *Journal of Production Agriculture,* 9, 192-199.

Winter S.R., Musick J.T. (1993). Wheat planting date effects on soil water extraction and grain yield. *Agronomy Journal,* 85, 912-916.

Woodruff D.R., Tonks, J. (1983). Relationship between time of anthesis and grain yield of wheat genotypes with different development patterns. *Australian Journal of Agricultural Research* , 34, 1-11.

Zanolin A. (2003) *Irrigation de Précision en Petite-Beauce : Mesures au champ et modélisation stochastique spatialisée du fonctionnement hydrique et agronomique d'une parcelle de maïs.* Thèse Université Paris 6.

2.2.2. Cultures pérennes

Christian Gary (INRA Montpellier)

La question de la sécheresse et des moyens d'y faire face ne se posent pas de la même façon pour l'ensemble des cultures pérennes. En viticulture, la maîtrise de l'élaboration du rendement et de la qualité du raisin de cuve passe par une limitation de l'alimentation hydrique et la norme est la culture en sec. Faire face à des sécheresses plus fréquentes et/ou plus intenses tout en préservant les états hydriques recherchés passe par une limitation de l'augmentation de la demande en eau et des pertes par évaporation, transpiration et ruissellement. Ces recours étant épuisés, une irrigation de complément peut être envisagée pour autant que la réglementation l'autorise (cf. Encadré).

En arboriculture et pour la production de raisin de table, rendement et qualité sont assurés par des apports plus proches de la satisfaction de la demande en eau et la norme est la culture irriguée chaque fois que nécessaire. En France, environ les trois quarts des superficies de production fruitière sont irriguées (Callais, 2003). Certaines espèces comme les clémentines et les kiwis sont irriguées de façon systématique, tandis que 95% des vergers de pêchers et 85% des vergers de pommiers le sont. L'occurrence d'épisodes de sécheresse pose la question de l'efficience des systèmes d'irrigation dans un contexte de plus forte concurrence pour la ressource en eau.

2.2.2.1. Réduire la sensibilité des systèmes de culture à des sécheresses excessives

Les différents termes du bilan hydrique de parcelles viticoles peuvent faire l'objet d'interventions. La pluviométrie peut être mieux valorisée en favorisant l'infiltration et en réduisant le ruissellement, en particulier dans les régions méditerranéennes caractérisées par de fortes intensités de pluie. Cela passe par la création et l'entretien d'états de surface favorables à l'infiltration, en particulier grâce au travail du sol, à l'enherbement spontané ou à l'engazonnement. Les pertes par évaporation du sol peuvent être réduites grâce au travail du sol et à l'utilisation de mulchs ou de paillages. Si un couvert herbacé permet de réduire le ruissellement en période hivernale, il prélève ensuite dans la réserve en eau du sol. Dans les sols profonds, cette concurrence pour l'eau est atténuée par la capacité de la vigne à redistribuer son système racinaire pour mieux valoriser les ressources non accessibles au couvert herbacé (Celette et al., 2005). Dans les sols superficiels, la consommation d'eau par le couvert herbacé peut être limitée par le choix d'espèces à cycle court (légumineuses annuelles) ou à faible croissance (voire à dormance) estivale.

Les interventions sur l'environnement de la vigne peuvent également porter sur des composantes du paysage : création de terrasses, implantation de bandes enherbées en bordures de parcelles, configuration des fossés, plantation de brise-vents…

Le choix variétal devrait privilégier des porte-greffes (Carbonneau, 1985) et des variétés (cépages) plus tolérants à la sécheresse. On peut s'appuyer pour cela sur l'existence de types variétaux contrastés présentant des comportements soit isohydriques, avec une forte régulation stomatique tendant à atténuer les variations de potentiel hydrique de la plante, soit anisohydriques, avec une propension à maintenir les échanges gazeux au prix d'une réduction de potentiel hydrique (Schultz, 2003).

En situation de sécheresse, la structure du couvert végétal doit continuer à faire un usage efficient de l'eau disponible : densité de plantation plus faible, taille hivernale tendant à limiter le développement végétatif, formation du couvert végétal favorisant une bonne exposition des feuilles.

Encadré : La réglementation sur l'irrigation des vignobles

La réglementation en vigueur repose sur un décret de 1964[1] amendé par des arrêtés en 1966 et 1969. Ces textes prévoient une interdiction de l'irrigation des vignes à raisin de cuve pendant toute la période de végétation, c'est-à-dire d'avril à octobre. Des dérogations peuvent être accordées "à titre exceptionnel" avant le 1er août sur déclaration préalable et par décision conjointe des ministères chargés de l'agriculture et de l'économie et des finances, après avis de l'INAO[2]. Cette lourdeur administrative et la difficulté de définir les périmètres d'autorisation rendent la réglementation difficilement applicable. Pourtant certaines appellations méridionales prévoient l'irrigation dans leurs décrets, et environ 40000 ha seraient irrigués en France (Pomel, 2006), soit 4,7% des surfaces en production en 2005[3].

La sécheresse de 2003 n'est pas étrangère à la mobilisation récente de l'INAO (pour les AOC) et de l'ONIVINS[4] (pour les vins de pays et de table) pour assouplir et rendre plus applicables les règles d'irrigation. Un projet de décret en cours de discussion (mars 2006) prévoit une autorisation d'irrigation jusqu'au 15 août pour les vins de pays et de table. Pour les AOC, l'irrigation serait possible jusqu'au 1er mai pour compenser un éventuel déficit pluviométrique hivernal et entre le 1er juillet et le 15 août sur proposition de l'INAO et si le décret d'appellation l'autorise.

2.2.2.2. Evaluer l'opportunité d'introduire l'irrigation

On considère que l'irrigation de la vigne s'impose dans les régions où la pluviométrie ne dépasse pas 350 mm par an (Carbonneau, 1998). Si ce seuil n'est jamais franchi en France, un examen plus attentif du bilan hydrique saisonnier fait apparaître localement des risques de sécheresse excessive. Dans le cadre d'un zonage viticole de l'Union Européenne, Riou (1994) utilise comme indicateur de disponibilité en eau un bilan hydrique "potentiel" sur la période moyenne de végétation de la vigne, c'est-à-dire du 1er avril au 30 septembre. Ce bilan est la résultante d'une réserve hydrique initiale, de la pluviométrie, de la transpiration potentielle (l'ETP multipliée par une séquence de coefficients culturaux) et de l'évaporation du sol (considérée comme significative un jour après chaque épisode pluvieux dont l'intensité moyenne est estimée à 5 mm/j).

A partir d'une réserve hydrique initiale de 200 mm, Tonietto et Carbonneau (2004) considèrent que les seuils suivants de réserve hydrique calculée fin septembre sont à considérer :
- de 50 à -100 mm, sécheresse modérée, favorable à une bonne maturation, irrigation occasionnelle ;
- de -100 à -200 mm, sécheresse forte, irrigation courante ;
- moins de -200 mm, sécheresse très forte, irrigation obligatoire.

Si on calcule ce bilan hydrique sur plusieurs années, on peut tenir compte du caractère total ou partiel de la reconstitution hivernale des réserves hydriques[5]. La comparaison des résultats obtenus sur les grands bassins viticoles français montre que :

- les vignobles les plus continentaux (Alsace, Bourgogne) ne connaissent des déficits hydriques "potentiels" que pour des années climatiques exceptionnelles (2003 et 2005) ou pour des vignobles qui seraient implantés sur des sols superficiels (dont la réserve en eau accessible serait bien inférieure aux 200 mm retenus ici) ;

1 http://www.legifrance.gouv.fr/texteconsolide/RGHAE.htm
2 Institut National de l'Origine et de la Qualité (www.inao.gouv.fr)
3 http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/saa2006T8-2.pdf
4 Office national interprofessionnel des vins (www.onivins.fr), devenu le 1er janvier 2006 l'Office national interprofessionnel des fruits, des légumes, des vins et de l'horticulture (Viniflhor)
5 Pour les besoins de la comparaison, on fait ici l'hypothèse, comme Riou (1994) et Tonietto et Carbonneau (2004), d'une réserve hydrique maximale de 200 mm.

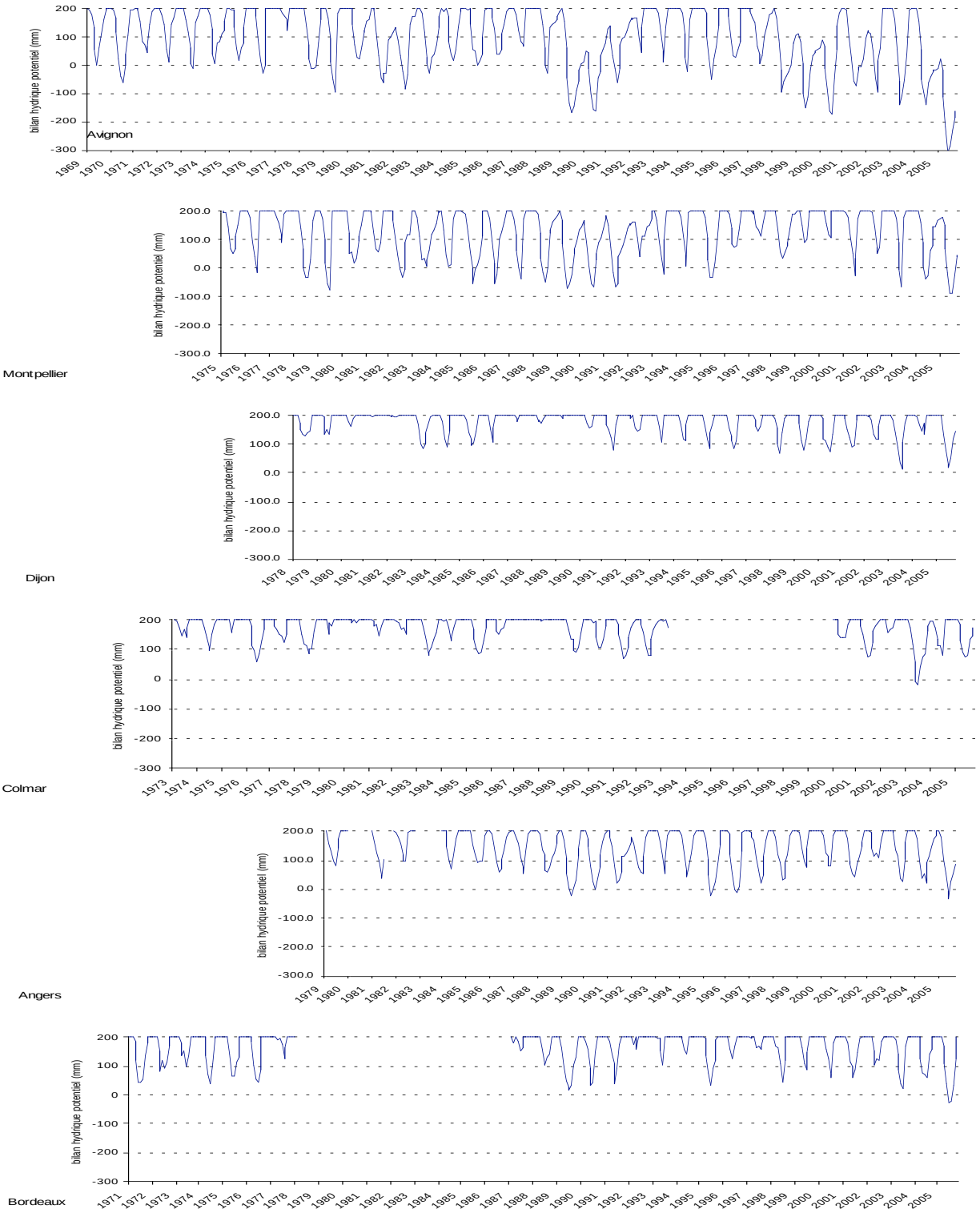


Figure : Bilan hydrique potentiel estimé selon Riou (1994) et Tonietto et Carbonneau (2004) et calculé à partir de séries climatiques pluri-annuelles.

L'interruption de certaines courbes est liée à des données manquantes (ETP).

- les vignobles océaniques (Val de Loire, Bordelais) sont soumis à des déficits hydriques "potentiels" plus fréquents mais modérés, y compris si la réserve hydrique est faible ;
- les vignobles méridionaux (Languedoc, basse vallée du Rhône) subissent de façon répétée de forts déficits hydriques "potentiels" ; cela est vrai en particulier pour la basse vallée du Rhône qui subit des niveaux d'ETP particulièrement élevés certains étés (2005), ne reconstitue pas toujours la réserve hydrique du sol en hiver, réserve hydrique qui franchit parfois la barre des -100 mm fin septembre (1989, 1990, 1999, 2000, 2003, 2004, 2005). Ce seuil à partir duquel la question de l'opportunité de l'irrigation peut être posée est d'autant plus fréquemment franchi que la réserve d'eau accessible est limitée.

Ainsi, au delà des valeurs moyennes de ressources en eau et de demande climatique, la question de l'introduction de l'irrigation en viticulture doit être examinée en tenant compte des fortes variabilités spatiales et temporelles. Dans une même région, le risque de sécheresse excessive sera beaucoup plus élevé sur des sols superficiels et en pente (éventuellement sensibles au ruissellement non pris en compte dans le modèle simplifié de Riou, 1994) que sur des sols profonds comportant une nappe phréatique accessible à la vigne (remontées capillaires non prises en compte dans le modèle). Les variations interannuelles de bilan hydrique sont également très élevées. Les calculs réalisés à partir de la série climatique d'Avignon montrent une fréquence élevée d'épisodes de sécheresse "forte" depuis le début des années 1990.

L'irrigation suppose un accès à la ressource en eau et elle implique des investissements lourds. Sa pratique dans certaines zones viticoles est manifestement justifiée, mais son introduction doit s'appuyer sur une analyse fine des conditions locales de sols et de climat et de leur variabilité.

2.2.2.3. Gérer plus efficacement les systèmes irrigués

Pour la vigne comme pour les différentes espèces fruitières, on dispose de connaissances agronomiques et de références expérimentales qui permettent d'estimer l'évolution des besoins en eau en relation avec l'élaboration du rendement et de la qualité. D'une façon générale mais avec de fortes variations interspécifiques, on considère qu'une certaine contrainte hydrique est souhaitable pour limiter la croissance végétative à différentes étapes du développement reproducteur : induction florale (année n-1), période de durcissement du noyau pour la pêche, période pré- puis post-véraison chez la vigne (année n).

Pour les productions fruitières, cela conduit à la diffusion de tables de coefficients culturaux (demande en eau / ETP) à intégrer dans des modèles simples de bilan hydrique pour évaluer les besoins d'irrigation. Les gammes de coefficients culturaux varient de 0,4-0,5 pour le raisin de table et l'amandier à 0,6-0,9 pour le pommier et le pêcher. Pour la vigne à raisin de cuve, les références sont plutôt diffusées sous la forme de potentiels hydriques de base dont les valeurs devraient baisser pendant le cycle végétatif de valeurs proches de zéro à la floraison jusqu'à -0,5 à -0,6 MPa suivant le type de vin recherché (Deloire et al., 2003 ; Pellegrino et al., 2005).

Ces besoins en eau justifiés par des objectifs de rendement et de qualité étant identifiés, l'irrigation peut être gérée précisément, en tenant compte des autres termes du bilan hydrique. Or les enquêtes sur les pratiques agricoles du SCEES[6] montrent qu'un quart seulement des arboriculteurs notent les apports d'eau et les dates d'irrigation, et que les techniques d'irrigation dominantes (aspersion et irrigation par gravité) sont les moins économes en eau (Callais, 2003).

Si des épisodes de sécheresse devenaient plus fréquents ou plus sévères et que cela entraîne dans les régions arboricoles une concurrence accrue sur la ressource en eau, une gestion plus raisonnée des apports

6 Service central des enquêtes et des études statistiques, Ministère de l'agriculture et de la pêche

d'eau et l'usage de techniques plus économes (comme le goutte à goutte ou le microjet déjà répandus dans le Val de Loire) devraient se généraliser.

Le caractère très inégal de la disponibilité de la ressource en eau dans les régions viticoles où l'irrigation se justifie impose une gestion économe de l'irrigation. De plus, la maîtrise de l'irrigation déficitaire est plus difficile dans un contexte français marqué par une forte variabilité climatique interannuelle que dans les régions du monde présentant systématiquement une sécheresse prolongée pendant une grande partie du cycle de la vigne (Chili, Australie…). C'est toutefois de ces régions du monde que viennent la plupart des références en matière de gestion de l'irrigation en viticulture (par exemple, McCarthy et al., 2000 ; Ortega-Farías et Acevedo, 2004).

Références bibliographiques

Callais M.J. (2003). Le verger poursuit sa recomposition. Moins de pommiers et de pêchers mais plus de noyers. *Agreste Primeur*, 127, 4 p.

Carbonneau A. (1985). The early selection of grapevine rootstocks for resistance to drought conditions. *American Journal of Enology and Viticulture*, 36, 195-198

Carbonneau A. (1998). Irrigation, vignoble et produits de la vigne. In : Tiercelin J.R. (ed.) *Traité d'irrigation*. Lavoisier, Paris, 257-276

Celette F., Wery J., Chantelot E., Celette J., Gary C. (2005). Belowground interactions in a vine (*Vitis vinifera* L.)-tall fescue (*Festuca arundinacea* Shreb.) intercropping system: water relations and growth. *Plant and Soil*, 276, 205-217

Deloire A., Carbonneau A., Wang Z., Ojeda H. (2003). Vine and water: a short review. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 38, 1-13

Grasselly C., Duval H. (eds) (1997). *L'amandier*. Ctifl, Paris

Hilaire C., Giauque P. (eds) (2003). *Le pêcher*. Ctifl, Paris

Huguet, J.G.;Génard, M. (1998). Irrigation et qualité des fruits. In : Tiercelin J.R. (ed.) *Traité d'irrigation*. Lavoisier, Paris, 276-288

McCarthy M.G., Loveys B.R., Dry P.R. (2000). Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines. In: *Deficit irrigation practices. Water reports* 22, FAO, Rome, 79-87 ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/004/y3655e/y3655e09.pdf

Ortega-Farías S., Acevedo C. (2003). Irrigation scheduling on vineyards (VIth Region of Chile) by using the time domain reflectometry. *Acta Horticulturae*, 646,115-119

Pellegrino A., Lebon E., Simmoneau T., Wery J. (2005). Towards a simple indicator of water stress in grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Australian Journal of Grape and Wine Research,* 11, 306-315

Pomel B. (2006). Réussir l'avenir de la viticulture de France. Plan national de restructuration de la filière viti-vinicole française. Rapport au ministre de l'agriculture et de la pêche, 40 p. http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/rapport_pomel_mars2006.pdf

Riou C. (ed.) (1994). *Le déterminisme climatique de la maturation du raisin : application au zonage de la teneur en sucre dans la Communauté Européenne*. Commission Européenne, Luxembourg, 322 p.

Schultz H.R. (2003). Differences in hydraulic architecture account for nearisohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant, Cell and Environment*, 26, 1393–1405

Tonietto J., Carbonneau A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology,* 124, 81–97

Trillot M., Masseron A., Mathieu V., Bergougnoux F., Hutin C., Lespinasse Y. (eds) (2002). *Le pommier*. Ctifl, Paris, 288 p.

Vaysse P., Soing P., Peyremorte P. (eds) (1990). *L'irrigation des arbres fruitiers*. Ctifl, Paris

Vidaud J., Charmont S., Wagner R. (eds) (1993). *Le raisin de table*. Ctifl, Paris

2.2.3. Systèmes fourragers et élevage

Gilles Lemaire (INRA Lusignan), Luc Delaby (INRA Rennes), Jean-Louis Fiorelli (INRA Mirecourt), Didier Micol (INRA Theix)

Face au risque de sécheresse, les éleveurs doivent assurer une ressource alimentaire constante à leurs troupeaux, malgré les pénuries fourragères de plus ou moins longue durée. Comme nous l'avons analysé dans le chapitre 1., ceci implique (i) une **adaptation stratégique** des systèmes fourragers et du système d'élevage en fonction d'une certaine appréhension du risque sécheresse en terme de fréquence, et (ii) une flexibilité du système fourrager et du système d'élevage qui est du domaine de **l'adaptation tactique**. L'adaptation stratégique concerne donc les choix de systèmes d'élevage : date de vêlage ou d'agnelage, niveau de production laitière, type de production animale (gras ou maigre ; broutards, bouvillons ou boeufs…), et de systèmes fourragers (niveau de chargement en fonction de la Surface toujours en herbe (STH) ou de la Surface fourragère principale (SFP), niveau d'utilisation des concentrés, part de l'herbe et du maïs ensilage, pâturage ou foin et ensilage d'herbe...). L'adaptation tactique concerne quant à elle la gestion annuelle et saisonnière du système fourrager en fonction de l'évolution climatique subie ou prévue (date de mise à l'herbe, gestion des stocks, utilisation des cultures à double fin : maïs ensilage *vs* grain, céréales immatures, utilisation des pailles).

2.2.3.1. Le maïs ensilage, une ressource fourragère essentielle…

En France, dans la plupart des systèmes d'élevage de ruminants, la culture du maïs, lorsqu'elle est possible, est devenue un élément essentiel des systèmes fourragers. En effet, son utilisation sous forme d'ensilage permet de sécuriser la constitution de stocks fourragers de très bonne valeur alimentaire sachant que ces stocks sont nécessaires pour l'alimentation hivernale des troupeaux (4 à 6 mois selon les régions) et qu'ils peuvent permettre de pallier l'absence de croissance d'herbe pendant les mois d'été (2 à 3 mois selon les régions et les années) (Chénais et al., 1997). Certains systèmes d'élevage laitiers intensifs ont fait de cette culture la ration unique de leur troupeau tout au long de l'année (Bretagne, Pays de Loire, Sud-Ouest). L'ajustement tactique de ce système vis-à-vis des aléas de sécheresse consiste en une double valorisation de la sole semée en maïs, la part du maïs récolté en grain à l'automne s'ajustant en fonction du niveau de rendement permis par le climat de l'été.

… mais parfois remise en cause

Dans un certain nombre de situations, le recours à l'irrigation, notamment dans les régions à risque de sécheresse plus important (Poitou-Charentes), permet d'assurer une très grande régularité de la production d'ensilage et d'avoir un système extrêmement sécurisé. Ce système, malgré sa simplicité et sa sécurité, se heurte cependant à un certain nombre de contraintes de divers ordres :

(i) restrictions locales de la ressource en eau plus ou moins forte comme en Poitou-Charentes, ce qui limite les volumes d'eau disponibles et les périodes d'irrigation ;
(ii) problèmes environnementaux liés à la trop grande importance du maïs dans les rotations, à la difficulté à assurer une couverture du sol en hiver pour éviter la lixiviation du nitrate, à l'utilisation trop systématique d'herbicides, et aux difficultés de gestion des effluents d'élevage dans ces systèmes trop intensifs (Le Gall et al., 1997) ;
(iii) problèmes économiques liés au coût de l'unité fourragère produite (Grasset, 1997) ;
(iv) interdiction de l'ensilage pour certaines filières fromagères ;
(v) dépendance vis-à-vis des filières d'approvisionnement en complément azoté et minéral ;
(vi) pressions locales de la société vis-à-vis des problèmes de gestion des ressources en eau.

En absence d'irrigation, la production de maïs ensilage peut varier dans de très grandes proportions, notamment dans les sols à faibles réserves hydriques. En Poitou-Charentes, même dans un sol à réserve utile d'environ 150 mm (sol rouge à châtaignier, INRA de Lusignan) la production de maïs

ensilage peut varier de 9 tonnes de matière sèche à l'hectare en année très sèche (1976, 1991, 2003) à 18-20 tonnes en années humides. Une telle variabilité peut devenir très difficile à gérer. En sol à moindre réserve utile, il devient impossible de baser un système d'élevage sur la seule ressource fourragère du maïs en absence d'irrigation dans les régions à sécheresse accentuée.

2.2.3.2. Le sorgho grain ensilé, une alternative possible au maïs en région sèche avec des atouts environnementaux

L'ensilage de sorgho grain pour l'utilisation par les bovins s'est développé localement dans certaines régions du Sud-Ouest comme alternative au maïs en situations de sécheresse (Legarto, 2000). L'analyse de cette solution alternative doit se faire à deux niveaux : (i) adaptation de la culture du sorgho vis-à-vis de la sécheresse comparativement au maïs, et (ii) valeur et efficacité alimentaire de l'ensilage de sorgho pour différents types d'animaux.

Des études agronomiques ont été réalisées à l'INRA de Lusignan permettant de comparer la production de matière sèche du sorgho et du maïs en condition sèche et sous irrigation. Le tableau 1 permet de synthétiser ces résultats (Lemaire et al., 1996).

Tableau 1. Comparaison de la production de matière sèche, de la consommation totale d'eau (irrigation, pluie, réserve du sol), de l'efficience de l'eau et des prélèvements d'azote, entre une culture de maïs et une culture de sorgho récoltés en ensilage à l'INRA de Lusignan. (d'après Lemaire et al., 1996)

	Irrigué		Sec	
	Maïs*	Sorgho*	Maïs	Sorgho
Production de Matière Sèche (t/ha)	24	18	9	13
Consommation d'eau (mm)	615	480	300	310
Efficience de l'eau (kgMS/mm)	39	37	30	42
Prélèvement d'azote (kgN/ha)	288	290	135	240
Prélèvements d'azote (kgN/mm H_2O)	0,47	0,60	0,33	0,74

* Maïs : cv Furio ; Sorgho : cv DK18

En condition non limitante d'alimentation en eau, le maïs ensilage a un potentiel de production nettement plus élevé que le sorgho. Cela est dû à une croissance foliaire plus rapide du maïs qui intercepte ainsi une plus grande quantité de rayonnement. On retrouve là l'exigence thermique plus importante du sorgho par rapport au maïs. Ceci montre qu'en absence de sécheresse ou en conditions d'irrigation, le maïs reste la culture la plus intéressante en terme de rendement par hectare. Cependant, cette forte production du maïs ne peut être obtenue qu'avec une consommation d'eau globale très importante de 615 mm. Sur ces 615 mm d'eau consommée, un total de 350 mm a été apporté par irrigation, ce qui représente une pression sur la ressource de 3 500 m^3 par hectare. Le sorgho, du fait de son potentiel de production plus faible, n'a consommé que 480 mm d'eau au total, et a nécessité une irrigation de 160 mm seulement, soit un prélèvement sur la ressource de 1 600 m^3 par hectare. On pourrait alors en déduire qu'en cas de ressource en eau quantitativement limitée, il serait préférable d'irriguer du sorgho que du maïs. L'efficience de l'eau du maïs et du sorgho en situation irriguée étant identique (39 *vs* 37 kgMS/mm H_2O), on peut penser qu'il aurait été possible d'obtenir sur le maïs une production de 18 tonnes de MS par hectare, équivalente au sorgho, en utilisant la même quantité d'eau d'irrigation de 160 mm. Cependant on s'aperçoit que l'efficience de l'eau du maïs diminue de 40 à 30 kg de MS par mm d'eau consommée lorsqu'il passe d'une condition non limitante d'alimentation hydrique à une condition très restreinte, alors que l'efficience du sorgho augmente de 37 à 42. Cette différence entre maïs et sorgho avait déjà été signalée et quantifiée par Marty et Puech (1971). Ainsi, en conditions de restriction du volume d'eau disponible, une plus grande efficience de l'eau sera obtenue par l'irrigation du sorgho que par l'irrigation restrictive du maïs. En conditions de sécheresse prononcée, le maïs et le sorgho consomment une même quantité d'eau de 300 mm environ correspondant à l'extraction de l'eau du sol (180 mm environ) et à l'apport des pluies. Cependant le

maïs ne produit que 9 tonnes de MS par hectare alors que le sorgho en produit 13 du fait de sa meilleure efficience pour l'eau dans ces conditions. Il y a donc une inversion du potentiel de production entre le sorgho et le maïs lorsque l'on passe d'une condition non limitante d'alimentation en eau à une condition de sécheresse importante. Ces résultats sont confirmés par les observations faites par Straeber et Le Gall (1998) qui indiquent en effet, à partir de résultats obtenus dans la région Aquitaine, qu'en situation de sécheresse importante le sorgho maintient une production plus élevée que le maïs (Tableau 2).

Tableau 2. Comparaison du maïs et du sorgho récoltés en ensilage dans un réseau de fermes de référence 1988-1990 en Aquitaine (EDE, Institut de l'Elevage, GIE Aquitaine). (d'après Straeber et Le Gall, 1998)

	Conditions sèches	Conditions moyennes	Conditions favorables
Nombre de situations	27	28	8
Maïs tMS/ha	8,9	10,1	15,7
Sorgho tMS/ha	9,8	10,7	14,0
Maïs % grain	25	41	51
Sorgho % grain	51	57	63

Il doit donc exister un point d'équi-potentialité entre les deux cultures qui doit permettre de déterminer les situations où la culture du maïs reste favorable et celles où la culture du sorgho devient plus intéressante. Ce point d'équi-potentialité est difficile à établir expérimentalement dans chaque cas car il est fonction des types de sol et du climat. Il peut être approché par des modèles comme STICS. Ceci est d'autant plus aisé que la prédiction de la production de biomasse par ces modèles est relativement robuste par rapport à la prédiction du rendement en grain.

Une des explications fournies par Lemaire et al. (1996) pour expliquer la variation différente de l'efficience de l'eau pour le maïs et le sorgho en fonction de la sécheresse est qu'en situation de sécheresse le prélèvement d'azote du sorgho est peu affecté, alors que le prélèvement d'azote du maïs l'est plus nettement. Cette diminution importante du prélèvement d'azote du maïs en condition sèche entraîne un déficit de nutrition azotée de la culture dont l'effet s'ajoute à l'effet du déficit hydrique proprement dit, ainsi que cela a été montré par différents auteurs pour d'autres espèces (Garwood et Williams, 1967 ; Lemaire et Denoix, 1987). Cette limitation supplémentaire de nutrition azotée affecte donc l'efficience de l'eau. On peut observer dans la dernière ligne du tableau 1 que la quantité d'azote prélevée par mm d'eau consommée par le maïs diminue en cas de sécheresse alors qu'elle a tendance à augmenter pour le sorgho, ce qui est corrélatif de la diminution et de l'augmentation respectives de l'efficience de l'eau. On conçoit aisément que moins il y a d'azote accompagnant l'eau prélevée par les plantes, moins l'efficience de cette eau pour la croissance des plantes sera élevée.

Cette grande capacité du sorgho à prélever l'azote du sol n'est pas à l'heure actuelle parfaitement expliquée. Elle tient probablement à l'architecture de son système racinaire, plus ramifié que celui du maïs. Mais cela peut aussi provenir de propriétés intrinsèques des racines (transporteurs membranaires de nitrate plus efficaces) ou de caractéristiques rhizosphériques (Lemaire et al., 2003). Cette capacité du sorgho à prélever l'azote du sol se manifeste essentiellement en situation de faible fertilisation, comme l'indique le tableau 2.

Tableau 3. Production et prélèvement d'azote comparés entre maïs et sorgho en irrigué et en fonction de l'apport d'azote. (d'après Lemaire et al., 1996)

	N = 30		N = 200	
	Maïs*	Sorgho*	Maïs	Sorgho
MS produite t/ha	18	18	24	18
N prélevé kg/ha	160	240	288	290
INN	0,70	1,12	0,98	1,35

* Maïs : cv Furio ; Sorgho : cv DK18

En effet, en situation de faible apport d'azote (30 unités par hectare), le sorgho est capable de prélever 80 kg d'azote de plus que le maïs et d'atteindre ainsi son potentiel de croissance avec une consommation excédentaire d'azote (Indice de Nutrition Azotée de 1,12), alors que le maïs est loin de son potentiel (INN de 0,70). En situation de nutrition azotée abondante (200 unités par hectare), le maïs et le sorgho ont une capacité de prélèvement d'azote similaire, le sorgho ayant une prélèvement excédentaire de 35% environ (INN = 1,35) alors que le maïs a juste satisfait sa demande (INN = 0,98). Cette capacité du sorgho à prélever l'azote du sol est un atout environnemental qu'il convient de valoriser : (i) cette culture exige une fertilisation azotée très réduite et permet donc de réduire notablement les intrants ; (ii) elle laisse très peu de reliquats azotés dans le sol après récolte, d'autant plus qu'après ensilage il peut y avoir une repousse en vert qui peut permettre éventuellement d'immobiliser les nitrates produits par la minéralisation tardive d'automne. La capacité de cette culture à continuer à prélever l'azote malgré le dessèchement du sol permet également de fortement atténuer les accumulations excessives de nitrates dans les sols souvent observées après les sécheresses estivales.

L'introduction du sorgho dans les systèmes fourragers en substitution au maïs ensilage, quels que soient ses avantages agronomiques et environnementaux, implique qu'il puisse fournir des stocks fourragers de qualité comparable à celle du maïs ensilage ou du moins pas trop pénalisante en fonction des exigences alimentaires des animaux. Différentes études ont été menées sur la valorisation des ensilages de sorgho par des vaches laitières (Legarto, 1991, 2000 ; Nascimento et al., 2005). Le tableau 3 résume une étude menée à l'INRA de Lusignan comparant directement un ensilage de sorgho grain conduit en sec avec un ensilage de maïs conduit la même année en irrigué.

Tableau 4. Performances comparées d'ensilage de maïs et d'ensilage de sorgho
(d'après Emile et al., INRA Lusignan, données non publiées)

	Culture			Ensilage		
	Pluie (mm)	Irrigation (mm)	Rendement (t/ha)	MAT (%)	NDF (%)	Amidon (%)
Maïs	190	152	20,1 t/ha	8,2	39	30,4
Sorgho	162	0	14,3 t/ha	10,4	40	27,7

MAT : Matières Azotées Totales **; NDF :** Neutral Detergent Fiber (Teneur en fibres)

	Performances animales				
	Quantités ingérées (kg)	Lait (kg)	Taux butyreux (%)	Taux protéique (%)	Poids vif (kg)
Maïs	17,0	29,9	4,01	3,21	+ 20
Sorgho	19,9	30,3	4,26	3,21	+ 29

Ces résultats encore préliminaires et en cours de confirmation indiquent que l'ensilage de sorgho grain effectué dans de bonnes conditions (teneur en MS de 33% par rapport à 35% pour le maïs) a une valeur alimentaire comparable à celle du maïs. On peut noter cependant que le sorgho présente 2 points de MAT de plus que le maïs, ce qui est confirmé par Legarto (2000). L'ensilage de sorgho est davantage consommé que l'ensilage de maïs. Cet avantage ne se retrouve pas dans la production laitière mais seulement dans l'état corporel des animaux. Ces résultats impliquent donc que la substitution du maïs irrigué par du sorgho s'accompagnerait d'une affectation accrue de surface par vache (i) pour compenser l'écart de production de 6 tonnes de MS par ha, soit une augmentation de 30% et (ii) pour compenser le différentiel de consommation qui est de 17%, soit au total une augmentation de la surface par vache à production laitière constante de près de 50%. Cependant, en toute rigueur, la comparaison entre maïs et sorgho aurait dû s'effectuer dans les mêmes conditions de non irrigation. Compte tenu de l'intensité assez faible de la sécheresse en cette année 2004, le volume d'eau d'irrigation n'a été que de 150 mm. Si l'on prend comme hypothèse une efficience de l'eau de 40 kg de MS par mm d'eau, le même maïs en sec aurait eu un déficit de production de 6 tonnes de MS, soit une production équivalente à celle du sorgho cette année là. Dans ces conditions d'équi-production des deux cultures, la substitution du maïs par le sorgho se heurte à la moindre valorisation du sorgho ensilé en terme de lait produit. Mais on peut prédire que dans toutes les situations à sécheresse plus forte entraînant une production du maïs inférieure à plus de 20% à celle du sorgho, la

substitution du premier par le second sera économiquement avantageuse. Seule une étude fréquentielle sur un simulateur de culture tel que STICS, prenant en compte le type de sol et la variabilité climatique, permettra de déterminer dans chaque situation s'il y a un avantage stratégique à substituer le sorgho au maïs. Ce type d'étude est en cours à l'INRA de Lusignan dans le cadre du projet PRAITERRE (Agriculture et Développement Durable). Elle sera couplée avec une analyse économique. Comme signalé par Straeber et Le Gall (1998) et indiqué dans le tableau 2, il est important de tenir compte du fait qu'en condition de déficit hydrique prononcé, la teneur en grain du maïs est fortement diminuée alors que celle du sorgho est maintenue à au moins 50%. Ceci se traduit par une détérioration importante de la qualité du maïs ensilage en situation de déficit hydrique et une baisse importante des performances animales permises.

Des recherches complémentaires sont indispensables afin de voir comment mieux optimiser l'utilisation du sorgho grain ensilé dans les rations pour l'élevage des ruminants. La plus faible efficacité alimentaire du sorgho par rapport au maïs mérite d'être plus précisément analysée afin d'en déterminer les causes : moins bonne digestibilité de la partie "tige" ou moindre efficacité du type d'amidon. Des études sur d'autres types d'animaux seraient également nécessaires, notamment pour l'engraissement. Au niveau du matériel génétique végétal, une grande variabilité de types de sorgho est disponible avec des rapports tiges/grain très variables et des précocités très différentes. L'utilisation des sorghos dits "sucriers" (Soudais, 1998) qui accumulent des sucres solubles dans leur tige permettrait d'accroître les potentialités de production par rapport aux sorghos grain classiques de 10 à 40%. Cependant les taux de grain de ces types de sorgho sont très variables et ne permettent pas toujours d'atteindre une teneur en MS de 35% pour la récolte, ce qui handicape la qualité de l'ensilage en terme d'ingestion. Il existe donc un certain nombre de voies à explorer afin de permettre une meilleure utilisation de cette espèce.

En conclusion on peut dire que, dès à présent, le sorgho grain ensilé peut devenir une alternative au maïs ensilage dans les régions sèches du Sud-Est, du Sud-Ouest et du Centre-Ouest dans des situations où l'irrigation n'est pas possible ou trop sujette à restrictions. Cette culture n'apparaît cependant possible qu'au sud de la Loire en l'état actuel du matériel génétique. Elle doit cependant être réservée à des sols suffisamment profonds permettant d'atteindre des niveaux de rendements suffisants sans recours à l'irrigation. Afin de limiter les fluctuations de rendements les années les plus sèches, des irrigations de complément en quantité limitée pourraient être envisagées, du fait de la bonne efficience de cette culture en conditions de limitation d'alimentation hydrique.

2.2.3.3. Une stratégie fourragère pour valoriser au mieux les ressources naturelles en eau : pluies et réserves du sol

Lorsque la sécheresse estivale est trop intense, et en situation de sols à réserve hydrique trop limitée pour assurer une culture d'été, la stratégie qui doit être recherchée est la constitution de stocks fourragers à partir de plantes réalisant l'essentiel de leur croissance dans les périodes où la sécheresse est limitée, ces stocks fourragers devant permettre d'assurer l'alimentation des animaux à la fois pendant la période sèche et pendant la période hivernale.

. Les céréales immatures

L'ensilage de céréales immatures peut constituer une solution pour fournir des stocks fourragers en situations où les cultures d'été telles que maïs ou sorgho ne sont pas possibles. De nombreuses études, tant en France qu'à l'étranger, ont montré tout l'intérêt de l'ensilage des céréales d'hiver pour l'alimentation des troupeaux (Legall et al., 1998 ; Bergen et al., 1991 ; Garnsworthy et Stokes, 1993 ; Jobim et Emile, 1999 ; Mac Cartney et Vaage, 1997). Pfimlin (1998) indique que les céréales étant généralement présentes dans les régions d'élevage, à l'exception de la montagne, elles peuvent constituer le cas échéant une solution de rattrapage pour pallier un déficit fourrager occasionnel. A ce titre, les céréales immatures constituent sans doute la première sécurité par rapport à un déficit

fourrager car elles peuvent être menées soit en grain soit en ensilage. En effet, pour ces cultures, la décision de les reconvertir en ensilages au stade immature se prend en début d'été, moment où l'éleveur peut déjà évaluer le risque de sécheresse. D'autre part, d'un point de vue zootechnique, il est plus rassurant pour l'éleveur de faire consommer 5 kg de blé dans l'ensilage que de distribuer séparément le grain et la paille aux animaux (Pfimlin, 1998). Cependant, on peut penser que l'utilisation systématique de cette ressource fourragère peut devenir la règle dans un certain nombre de situations à sécheresse chronique.

La production de matière sèche permise par l'ensilage des céréales immatures récolté un mois avant la récolte en grain (stade grain laiteux-pâteux) se situe à environ 150-190% du rendement en grain exprimé à 15% d'humidité (Le Gall et al., 1998). Ces auteurs montrent ainsi que dans le Maine et Loire, sur la période 1981-1997, le blé immature ensilé peut produire de 6 à 12 tonnes de matière sèche, ce qui correspond au niveau de production du maïs ensilage dans cette région pour la même période. Une même étude dans le Pas de Calais sur la période 1992-1997 (Le Gall et al., 1998) indique une production moyenne de blé immature de 14,8 tonnes de matière sèche à l'hectare avec un écart de 13 à 18 t/ha, alors que le maïs ensilage produit en moyenne 14 tonnes de matière sèche à l'hectare avec une variation de 10 à 16 t/ha. On voit donc que même dans des conditions a priori peu sèches, l'utilisation des céréales immatures peut devenir intéressante. Dans les régions les plus sèches du Centre-Ouest (Sud Bretagne, Pays de Loire et Poitou-Charentes, les céréales immatures présentent une régularité de rendement supérieure au maïs ensilage. Ces estimations de rendement ont été réalisées sur la base des cultures de céréales en grain, principalement les blés. Or il est possible de diversifier la gamme de céréales, en utilisant soit de l'orge soit de l'avoine (Garnsworthy et Stokes, 1993 ; Mac Cartney et Vaage, 1994). L'utilisation du triticale permet d'avoir des productions de matière sèche souvent supérieures (Royo et Pares, 1996 ; Andrews et al., 1991).

L'évolution rapide de la qualité impose une récolte à un stade "laiteux-pâteux" correspondant à une teneur en matière sèche comprise entre 30 et 40%. Pour le blé, l'avoine et le triticale, cela correspond en moyenne à 39-40 jours après la floraison. En revanche, l'orge doit être récoltée plus tôt (15-20jours après floraison) en raison de la présence des barbes. Dans les tables alimentaires de l'INRA (1998), la digestibilité des céréales immatures est donnée à 60% (0,64 UFL/kgMS) contre 70% au maïs ensilage. Cependant des essais plus récents (Emile et al., données non publiées) donnent des valeurs un peu plus élevées (0,70 UFL/kgMS). Des travaux danois (Kristensen, 1992) indiquent même des valeurs quasiment identiques à celle du maïs ensilage. De plus des résultats obtenus en Angleterre (Tetlow, 1992) montrent que l'application d'urée ou de soude permet d'améliorer l'ingestibilité et la digestibilité de ces ensilages de 2 à 5 points. Leaver et Hill (1995) montrent que les performances laitières permises par l'ensilage de céréales immatures sont analogues à celle des ensilages d'herbe. Les travaux d'Arvalis sur la ferme de la Jaillière dans le Maine et Loire ont permis de comparer les performances laitières de vaches alimentées avec des ensilages de céréales et avec de l'ensilage de maïs (ITCF, 1990, cité par Le Gall et al., 1998). La conclusion de ces travaux est que : (i) l'ingestion des céréales immatures est inférieure à l'ingestion de l'ensilage de maïs, (ii) la production laitière permise par l'ensilage de blé immature est nettement plus faible que celle observée pour le maïs ensilage (-3 kg lait/vache), (iii) mais les taux protéiques et butyreux sont supérieurs ainsi que l'état corporel des animaux. Le Gall et al. (1998) indiquent que les quantités ingérées d'ensilage de céréales peuvent être supérieures à celle du maïs et conduisent à des performances identiques en terme de GMQ (gain moyen quotidien) que les ensilages de maïs. En conclusion de leur étude, Le Gall et al. (1998) indiquent que "les performances permises par l'ensilage de céréales immatures sont proches de celles obtenues par les bons ensilages d'herbe et légèrement inférieures à celles observées avec le maïs. Ces résultats sont très rassurants pour un fourrage qui a surtout une fonction de sécurité…". De façon plus structurelle, l'ensilage de céréales immatures pourrait être avantageusement associé à l'ensilage d'herbe. C'est aussi un excellent complément du pâturage de cultures dérobées et des repousses d'herbe d'automne pour la production de viande.

Le recours à l'utilisation de céréales immatures pour constituer des stocks fourragers de bonne qualité constitue donc une solution permettant à la fois de sécuriser les systèmes fourragers et d'élevage dans les situations où l'irrigation du maïs n'est pas possible. Des études complémentaires sont en cours

actuellement à l'INRA de Lusignan pour essayer d'optimiser cette production. En effet, une analyse plus exhaustive des différents types de céréales utilisables, tant au niveau des espèces (blé, orge, avoine, triticale) que des variétés, s'avère nécessaire. De plus, il semble possible d'améliorer la valeur énergétique et protéique en introduisant des légumineuses à graine en mélange dans la céréale : culture de vesce-avoine, blé-pois ou triticale-pois par exemple (Lecomte et Parache, 1993), à l'image de ce qui est parfois réalisé en agriculture biologique. Ainsi les céréales immatures pourraient passer du statut de culture fourragère "opportuniste" permettant seulement d'apporter une sécurité au système fourrager en année sèche, à un statut de culture fourragère "de base" permettant de réaliser tout ou partie des stocks fourragers dans un certain nombre de conditions, ce qui constitue alors une véritable stratégie d'évitement de la sécheresse au niveau du système fourrager. Enfin, il est intéressant d'analyser cette culture dans le cadre d'un développement agricole plus durable. En effet, les itinéraires techniques pour la production d'ensilage ne sauraient être les mêmes que ceux mis en œuvre pour la production de grain. La gestion des apports azotés, du désherbage et des maladies sur cette nouvelle culture doit pouvoir conduire à des économies appréciables d'intrants par rapport aux productions céréalières classiques. Ceci doit être analysé et intégré dans une analyse environnementale et technico-économique.

. La luzerne pure ou en mélange

Les surfaces de luzerne ont continuellement diminué en France depuis les années 1960, passant de plus d'un million d'hectares et se stabilisant à environ 470 000 ha (Arnaud et al., 1993). Cette diminution correspond pour partie à la disparition de l'élevage dans les régions céréalières. Mais même dans certaines zones de polyculture-élevage cette culture, pourtant dotée de propriétés agronomiques et environnementales indéniables, reste largement sous-utilisée dans les systèmes fourragers. Face à la simplicité d'utilisation du maïs ensilage, la luzerne présente certaines contraintes de récolte et d'utilisation, notamment pour les premières coupes, période à laquelle la réalisation de foins de qualité reste délicate et aléatoire. La déshydratation est apparue comme une solution idéale, ce qui a permis le maintien de la luzerne dans les rotations céréalières en Champagne. On peut noter que la luzerne déshydratée constitue une ressource fourragère largement mobilisée par différents types d'élevage, notamment pendant les épisodes de sécheresse. Cependant cette solution, techniquement très satisfaisante, ne peut guère être généralisable étant donné le prix de l'énergie. Il est cependant possible que des solutions techniques plus souples comme le séchage en grange utilisant des sources d'énergie alternatives puissent se développer localement pour permettre de sécuriser la récolte de foins de qualité (Baud, 1998 ; Foucras, 1998).

En situations de faibles disponibilités en eau, la luzerne peut produire 12 à 14 tonnes de matière sèche là où le maïs n'en produit que 10 à 12 (Straëbler et Le Gall, 1993). La luzerne est naturellement adaptée à la sécheresse grâce à son enracinement profond. Il importe alors de la réserver à des sols permettant à cet enracinement de se développer. Les deux premières coupes de printemps sont généralement récoltées en foin ou en ensilage. Les foins sont difficiles à réaliser pour la première coupe. Cependant la technique de l'enrubannage peut permettre une récolte plus facile et de meilleure qualité (Le Gall et al., 1993). Les repousses d'été, d'intensité assez variable avec la sécheresse et le type de sol, peuvent être aisément pâturées. Le mélange de la luzerne avec des graminées telles que le dactyle ou la fétuque élevée permet en général une meilleure fenaison et une utilisation plus souple de la luzerne (Lavoinne et Peres, 1993).

Les foins de luzerne sont un très bon complément alimentaire du maïs ensilage ou des ensilages de céréales immatures. Malgré des teneurs en MAT assez élevées, la luzerne a une valeur azotée assez moyenne du fait de la grande dégradabilité de ses protéines dans le rumen, c'est pourquoi son association avec un ensilage riche en amidon est préférable.

Cette ressource fourragère est assez négligée à notre avis dans bon nombre de régions. Ses qualités agronomiques (économie d'azote) devraient lui donner un grand regain d'intérêt. Dans le cadre d'une agriculture durable, il est important de prendre en compte les économies d'énergie réalisées par l'utilisation de la luzerne à travers les économies d'engrais azotés. Enfin, cette culture limite de manière importante les fuites de nitrate vers les nappes et ne requiert qu'une très faible application

d'herbicides. Malgré une efficience pour l'eau de l'ordre de 25 kgMS/mm H_2O, comparée à celle du maïs de 40 kgMS/mm, une irrigation d'appoint de la luzerne en fin de printemps peut permettre d'assurer une troisième, voire une quatrième, coupe en été qui peut procurer un excellent foin. Cette irrigation précoce de la luzerne peut se situer avant le début de l'irrigation du maïs.

. L'extension de la période de pâturage

L'allongement de la période de pâturage au-delà des dates habituellement pratiquées, que ce soit en été ou en hiver, permet d'augmenter la part de l'herbe pâturée dans l'alimentation des troupeaux (Pottier et al., 2001 ; O'Donovan et al., 2004). De ce fait, il est possible de diminuer la part des stocks nécessaires. Cette extension de la période de pâturage consiste essentiellement à faire consommer au pâturage, en période de faible croissance de l'herbe en hiver ou en été, des stocks sur pied qui ont été élaborés pendant des saisons où le croissance de l'herbe était possible (automne et fin de printemps, début d'été avant la sécheresse). Mieux valoriser la croissance hivernale par le pâturage à une période où il n'y a aucun risque de sécheresse est un moyen de produire sans réduire la disponibilité en eau aux périodes à risque. C'est aussi un moyen de réduire la consommation en fourrages conservés qui seront ainsi disponibles en plus grande quantité pour réduire le déficit fourrager en été sec.

La croissance d'herbe est peu importante en hiver dans certaines régions, alors que dans les zones océaniques elle peut produire jusqu'à 10-15 kg de MS par ha et par jour (Lemaire et Salette, 1982). Dans les Pyrénées, le pâturage de prairies en hiver peut contribuer de façon significative aux besoins nutritionnels des brebis en lactation, grâce notamment à une excellente valeur alimentaire de l'herbe ingérée (Gibon, 1981 ; Dedieu et al., 1991). Cependant, lorsque l'on laisse un stock d'herbe sur pied important à l'automne pour être consommé pendant l'hiver, l'accumulation de matériel sénescent diminue fortement la qualité de l'herbe (Lemaire, 1999 ; Ducrocq, 1996 ; Delagarde et al., 1999). Il s'agit donc d'avoir une gestion adaptée du pâturage en cette saison pour tirer un profit maximum de cette ressource en faisant coïncider les périodes à faibles besoins des animaux avec les périodes à faible croissance de l'herbe et en adaptant le chargement aux conditions climatiques (Pottier et al., 2001). Le pâturage hivernal peut être soit partiel et réduit aux "marges de l'hiver" (pâturage tardif et/ou précoce), soit total (Dobbels et al., 1996). Pottier et al. (2001) rapportent une série d'expérimentations où ils montrent que le pâturage hivernal de prairies temporaires ou permanentes n'a pratiquement pas affecté la production d'herbe du printemps suivant, seul un décalage de la production en début de printemps est observé. Il importe cependant d'utiliser cette pratique avec une certaine prudence en évitant de trop forts chargements instantanés qui pénaliseraient la prairie par le piétinement en période trop humide et qui poseraient des problèmes environnementaux de lixiviation du nitrate. Dans cette expérimentation, toujours selon Pottier et al. (2001), la conduite des bovins et des ovins en plein air pendant l'hiver n'a pas d'effet négatif sur les performances, sous réserve d'une disponibilité minimale de l'herbe. Dans une étude expérimentale, Pottier et al. (1996) ont montré qu'à l'échelle d'un système ovin, il était possible d'exploiter l'herbe jusqu'à une hauteur de 2 à 2,5 cm sur la totalité de la surface en hiver, sans que cela porte préjudice ni à la production fourragère ni aux performances animales. Au cours des 5 années d'expérimentation, les surfaces consacrées aux stocks n'ont pas diminuées et le système est devenu excédentaire donc beaucoup moins vulnérable aux aléas de la sécheresse estivale. On peut donc dire que dans les régions océaniques à climat relativement doux en hiver, le pâturage des prairies temporaires ou naturelles pendant la période hivernale peut, dans les conditions qui s'y prêtent (portance des sols) fournir un supplément de ressource fourragère non négligeable qui permet d'aborder les périodes sèches de l'été avec plus de sécurité. En effet, l'herbe produite en fin d'automne et en hiver, si elle n'est pas consommée sur place par les animaux sera perdue par sénescence (Lemaire, 1999). Il s'agit donc d'exploiter au mieux une ressource fourragère naturelle qui bien que modeste peut fournir une part de l'alimentation de certains troupeaux. Lemaire (1991) a montré que la précocité de croissance de l'herbe en fin d'hiver et au début du printemps était fortement dépendante des modes d'exploitation de l'herbe à l'automne. On peut en outre penser que le réchauffement climatique en cours devrait permettre dans les années à venir une contribution plus importante de l'hiver au pâturage.

Il est possible également de reporter une partie de la croissance d'herbe de la fin du printemps pour être consommée sur pied pendant la période estivale en situation de sécheresse (Pottier et al., 2001). Des essais dans le Morbihan ont montré que la suppression d'une fauche de parcelles d'excédent en fin d'été et son dessèchement sur pied permettait un prolongement de 25 jours de la saison de pâturage estival en pâturant des repousses âgées de 50 à 100 jours d'une herbe bien consommée (association dactyle - trèfle blanc) qui conserve l'essentiel de sa valeur alimentaire. Cette technique de pâturage de stocks sur pied, comparée au système classique de constitution maximum de stocks au printemps, a permis dans cette expérience de passer d'une conduite déficitaire en fourrages conservés à une conduite excédentaire plus robuste face à l'aléa sécheresse. Ainsi Thébault (1999) signale qu'en Bretagne les repousses feuillues peuvent être pâturées en juillet-août après plus de 55 jours de repousse, notamment lorsque la prairie comporte du trèfle blanc. Du fait de l'association avec le trèfle blanc, ces repousses feuillues conservent une valeur alimentaire très intéressante malgré un âge de repousse élevé (0,75 à 0,80 UFL, 80 à 90 g PDI ; Delaby et Peccatte, 2003). Surault et al. (2001) ont réalisé une étude sur la valorisation du report sur pied en été de repousses de ray-grass anglais en comparant 4 variétés. Cette étude montre que la baisse de la qualité de l'herbe lorsqu'elle se dessèche sur pied reste relativement faible (-3 points de digestibilité entre 42 et 63 jours) et que la qualité de l'herbe consommée est relativement haute : en moyenne 79% de digestibilité à 63 jours de repousse. Cette étude confirme les résultats obtenus par Lemaire et al. (1989) qui montraient que la qualité de la luzerne était en général augmentée par la sécheresse. En effet, la diminution de la digestibilité au cours du temps est liée à la croissance des plantes (Duru et al., 1995 ; Ducrocq et Duru, 1996) or celle-ci devenant presque nulle avec la sécheresse, la digestibilité ne diminue que très lentement.

En conclusion, on peut dire que l'extension de la saison de pâturage en hiver et au printemps permet de valoriser au mieux la croissance d'herbe permise par les ressources naturelles en eau, réserves du sol et pluie, en rendant les systèmes fourragers moins dépendants des aléas de la sécheresse. Il faut noter également que ces techniques sont susceptibles d'abaisser assez significativement les coûts de l'unité fourragère produite et doivent être analysées en conséquence à l'échelle du système de production. Pour que cette technique apporte réellement un surcroît de sécurité dans les systèmes fourragers, il importe qu'elle soit mise en œuvre à chargement animal constant. Il ne s'agît pas ici d'exploiter une nouvelle ressource fourragère entraînant une possibilité d'augmentation du chargement, car dans ces conditions la sensibilité du système d'élevage aux aléas de la sécheresse estivale serait accrue. Il s'agit par contre, en utilisant cette nouvelle ressource fourragère, de diminuer la dépendance des troupeau vis-à-vis des stocks fourragers en limitant la consommation de ceux-ci durant la période hivernale afin d'en réserver le plus possible l'usage pour les périodes de pénurie d'herbe en été.

. La paille une ressource à mobiliser

D'après le Bureau Commun des Pailles et Fourrages, environ 40% des pailles produites sont autoconsommés, 20% sont régulièrement commercialisés et plus de 30% seraient enfouis pour l'entretien organique des terres (Pflimlin et al., 1997). Ceci permet donc une certaine mobilisation supplémentaire de la ressource en cas de pénurie fourragère importante au niveau régional ou national. Ainsi en 1976, il a été possible de mobiliser de 3 à 4 millions de tonnes de paille supplémentaire pour l'alimentation des animaux, sur un total de 20 millions de tonnes de paille produite. Ceci n'a été possible qu'au prix d'un grand effort de solidarité nationale (plan "paille"). Cependant, cette ressource est plutôt en régression du fait que les zones céréalières prennent de plus en plus conscience de l'entretien organique de leurs sols.

La paille peut être consommée en l'état et il n'est pas besoin de la broyer ni de la hacher. Les traitements chimiques ne sont pas nécessaires lorsque la paille est distribuée avec des concentrés. Des régimes paille + concentrés conviennent à toutes les catégories d'animaux, la part de concentrés dans la ration devant être ajustée au niveau de performances animales attendues (Pflimlin et al., 1997).

Conclusions

En dehors des systèmes d'élevage basés sur la production de maïs ensilage en irrigué et de sa complémentation protéique par du soja importé, tous les systèmes d'élevage doivent s'adapter au risque de sécheresse. Dans tous les cas, cette adaptation passe par (i) une plus grande diversification du système fourrager, et (ii) une stratégie de constitution de stocks permettant de passer les périodes de pénurie fourragère sans diminution trop forte de la production animale. Dans les zones de polyculture-élevage, des éléments de flexibilité existent grâce aux cultures à double fin : maïs ensilé-maïs grain, céréales immatures, permettant une adaptation des systèmes. Ceci conduit à une diminution des cultures de vente, à une augmentation de la surface fourragère et donc à une diminution du chargement. Dans les zones herbagères, l'adaptation essentielle au risque de sécheresse réside dans la constitution de stocks fourragers suffisamment conséquents et à des reports de stocks d'une année sur l'autre. Ceci conduit donc également à des limitations du chargement animal. Ainsi dans tous les cas, l'adaptation des systèmes fourragers au risque de sécheresse se traduit par un coût correspondant à la limitation du chargement animal.

Références bibliographiques

Andrews A.C., Wright R., Simpson P.G., Jessop R., Reeves S., Wheeler J., 1991. Evaluation of new cultivars of triticale as dual-purpose forage and grain crops. *Australian Journal of Experimental Agriculture,* 31: 769-775.

Arnaud J.D., Le Gall A., Pflimlin A., 1993. Evolution des surfaces en légumineuses fourragères en France. *Fourrages*, 134: 145-154.

Baud A., 1998. En Franche-Comté, du foin de qualité par le séchage en grange. *Fourrages*, 156 : 451-458.

Bergen W.G., Byrem T.M., Grant A.L., 1991. Ensiling characteristics of whole-crop small grains harvested at milk and dough stages. *Journal of Animal Sciences*, 69:1766-1791.

Chénais F., Le Gall A., Legarto J., Kerouanton J., 1997. Place du maïs et de la prairie dans les systèmes fourragers laitiers. I- l'ensilage du maïs dans le système d'alimentation. *Fourrages*, 150 : 123-136.

Dedieu B., Gibon A., Roux M., 1991. Notion d'état corporel des brebis et diagnostic des systèmes d'élevage ovin. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement,* INRA, 48 p.

Delaby L., Peccatte J.R., 2003. Valeur alimentaire des prairies d'association ray-grass / trèfle blanc utilises entre 6 et 12 semaines de repousse. *Rencontres Recherches sur les Ruminants.* 10 : 389.

Delagarde R., Peyraud J.L., Delaby L., 1999. Effet des quantités offertes sur l'ingestion de l'herbe d'automne chez la vache laitière au pâturage. *Rencontres Recherches sur les Ruminants,* 6 :135-138.

Dobbels M., Pottier E., Van Quackebeke E., 1996. Hivernage des brebis sous taillis et pâturage précoce de printemps. *Rencontres Recherches sur les Ruminants. 7 :123-125.*

Ducrocq H., 1996. Croissance des prairies de graminées selon la fertilisation azotée, l'intensité et la fréquence des défoliations. Thèse de Doctorat, 150p.

Ducrocq H., Duru M., 1996. Effet de la conduite d'un pâturage tournant sur la digestibilité de l'herbe offerte. *Fourrages,* 145 : 91-104

Duru M. Calviere I., Tirilly V., 1995. Evolution de la digestibilité *in vitro* du dactyle et de la fétuque élevée au printemps. *Fourrages,* 141 : 63-74.

Foucras J., 1998. Le séchage en grange dans les systèmes laitiers en Aveyron. *Fourrages,* 156 : 477-486.

Garwood E.A., Williams T.E., 1967. Soil water use and growth of grass swards. *Journal of Agriculture Sciences Cambridge*, 68: 281-292.

Gibon A., 1981. Pratiques des éleveurs et résultants d'élevage dans les Pyrénées Centrales. Thèse INA-PG, 106 p.

Garnsworthy P.C., Stokes D.T., 1993. The nutritive value of wheat and oat silages ensiled on three cutting dates. *Journal of Agriculture Sciences Cambridge*, 121: 233-240.

Grasset M., 1997. Place du maïs et de la prairie dans les systèmes fourragers laitiers. II- Aspects technico-économiques et exemples en Bretagne. *Fourrages*, 150 : 137-146.

Jobim C.C., Emile J.C., 1999. Systèmes d'utilisation des céréales d'hiver pour l'alimentation des animaux au Brésil. *Fourrages*, 159 : 259-267.

Kristensen V.F., 1992. The production and feeding of whole-crop cereals and legumes in Denmark. In: *Whole-Crop Cereals*, B.A. Stark and J.M. Wilkinson eds., 21-37.

Lavoine M., Pérès M., 1993. Intérêt des associations fourragères graminées-luzerne pour economiser la fumure azotée. *Fourrages,* 134 : 205-210.

Lecomte P., Parache P., 1993. L'association avoine-pois : une culture fourragère adaptée aux régions de demi-altitude et utilisable comme plante abri d'un semis fourrager. *Fourrages,* 134 : 211-216.

Le Gall A., Corrot G., Campagnaud M., Garrigue G., 1993. L'enrubannage : une technique pour optimiser la récolte de la luzerne. *Fourrages*, 134 : 234-250.

Le Gall A., Ledgarto J., Pflimlin A., 1997. Place du maïs dans les systèmes fourragers laitiers. III- Incidences sur l'environnement. *Fourrages*, 150 : 147-169.

Le Gall A., Delattre J.C., Cabon G., 1998. les céréales immatures et la paille : une assurance pour les systèmes fourragers. *Fourrages,* 156 : 557-572.

Legarto J., 1991. Le sorgho grain ensilé en plante entière. Utilisation par les vaches laitières. Comptes Rendus N° 91062 et 92081. Institut de l'Elevage ARPEB.

Legarto J., 2000. L'utilisation en ensilage plante entière des sorghos grains et sucriers : intérêts et limites pour les régions sèches. *Fourrages*, 163 :323-338.

Leaver J.D., Hill J., 1995. Feeding cattle on whole-crop cereals. In: *Whole-Crop Cereals*, B.A. Stark and J.M. Wilkinson eds.

Lemaire G., 1999. Les flux de tissues foliaires au sein des peuplements prairiaux. Eléments pour une conduite raisonnée du pâturage. *Fourrages*, 159 : 203-222.

Lemaire G., Charrier X., Hébert Y., 1996. Nitrogen uptake capacities of maize and sorghum crops in different nitrogen and water supply conditions. *Agronomie*, 16: 231-246.

Lemaire G., 1991. Précocité de croissance d'une prairie au printemps. Importance de la densité de talles. *Fourrages,* 127 : 313-320.

Lemaire G., Denoix A., 1987. Croissance estivale en matière sèche de peuplements de fétuque élevée et de dactyle dans l'Ouest de la France. II) Interactions entre les niveaux d'alimentation hydrique et de nutrition azotée. *Agronomie,* 6 : 381-389.

Lemaire G., Durand J.L., Lila M., 1989. Effet de la sécheresse sur la digestibilité *in vitro*, la teneur en ADF et la teneur en azote de la luzerne. *Agronomie*, 9 : 841-848.

Lemaire G., Salette J., 1982. The effects of temperature and fertilizer nitrogen on the sring growth of a tall fescue and cocksfoot. *Grass and Forage Science,* 37: 191-198.

Lemaire G., Recous S., Mary B., 2003. Managing residues and nitrogen in intensive cropping systems. New understanding for efficient recovery by crops. *International Congress of Crop Sciences.* Brisbane, Australia.

Mac Cartney D.H., Vaage A.S., 1994. Comparative yield and feeding value of barley, oat and triticale silages. *Canadian Journal of Animal Sciences*, 74: 91-96.

Marty J.R., Puech J., 1971. Efficience de l'eau en production fourragère. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France,* 57 : 938-949.

Nascimento W.G., Barrière Y., Charrier X., Huyghe C., Emile J.C., 2005. Evaluation of sweet grain sorghum silage for dairy cows as an alternative to irrigated maize silage. *Proceedings of the XXth International Grassland Congress,* University College Dublin, Eire, 2 :679.

O'Donovan M., Delaby L., Peyraud J.L., 2004. Effect of time of initial grazing date and subsequent stocking rate on pasture production and dairy performance. *Animal Research*, 53: 489-502.

Pflimlin A., 1997. Sécheresse: gérer les risques. Dossier spécial, Institut de l'Elevage. Mai 1997, 111 p.

Pflimlin A., 1998. Risques climatiques et sécurités fourragères selon les régions d'élevage. Cas de la sécheresse. *Fourrages,* 156 : 541-556.

Pottier E., d'Hour P., Havet A., Pelletier P., 2001. Allongement de la saison de pâturage pour les troupeaux allaitants. *Fourrages*, 167 : 287-310.

Pottier E., Sagot L., Van Quackebeke E., 1996. Paturage hivernal de brebis dans le cadre d'une conduite extensive. *Rencontres Recherche sur les Ruminants*, 3 : 99.

Royo C., Pares D., 1996. Yield and quality of winter and spring triticales for forage and grain. *Grass and Forage Science*, 51: 449-455.

Soudais D., 1998. Le sorgho grain ensilage. Document des Journées d'été de la Confédération Paysanne FADEA, Saint Gaudens. Chambre d'Agriculture de la Haute-Garonne.

Surault F., Hazard L., Emile J.C., 2001. Une approche qualitative des ray-grass anglais en stock sur pied au pâturage. *Fourrages*, 168 : 499-508.

Straëbler M., Le Gall A., 1993. Luzerne sorgho et betterave. Trois cultures fourragères sécurisantes en conditions sèches ou froides. *Fourrages*, 156 : 573-587.

Tetlow R.M., 1992. A decade of research into whole-crop cereals at Hurley. In: *Whole-Crop Cereals*, B.A. Stark and J.M. Wilkinson eds., p.73.

Thébault M., 1999. Gestion du pâturage d'été. *Revue Elevage Rentabilité,* 355 : 5-7.

2.3. Adaptations socio-économiques au risque de sécheresse

Alban Thomas (INRA, Toulouse), Sophie Allain (INRA Paris – ENS de Cachan), Jean-Pierre Amigues (INRA, Toulouse), Bernard Barraqué (CNRS – Ecole nationale des ponts et chaussées, Marne-la-Vallée), Stéphane Couture (INRA, Nancy), Arnaud Reynaud (INRA, Toulouse)

Ce chapitre contient un aperçu des différentes voies envisageables (et utilisées en pratique) de lutte contre les conséquences de sécheresses, par les acteurs socio-économiques impliqués. En premier lieu et de façon relativement naturelle, nous présentons les stratégies à l'échelle de l'exploitation, qui mobilisent en particulier la modification du niveau requis des facteurs de production (y compris l'eau), mais également la modulation des surfaces cultivées entre les différentes productions (en fonction de leur sensibilité au stress hydrique par exemple). Les épisodes de sécheresse étant des événements aléatoires, un détour par une analyse du comportement du producteur vis-à-vis du risque est un préalable indispensable. Dans une deuxième partie, nous discutons des assurances sécheresse comme une option intéressante mais dont l'application à la France soulève un certain nombre de questions relatives notamment à la nature du risque encouru. Les exemples américain et espagnol sont brièvement discutés. Ensuite, ce chapitre s'attache à présenter, dans la section 2.3.3., les actions collectives comme des options intéressantes à un niveau plus agrégé (le bassin versant, par exemple). Les cas de l'Australie et de la Californie sont présentés en détail, avec une attention particulière à la performance attendue des instruments envisagés (contrat, etc.) et aux difficultés de mise en place de ces mesures décentralisées.

2.3.1. Adaptation socio-économique à l'échelle de l'exploitation

Nous discutons dans cette partie des stratégies pouvant être conduites par les exploitants agricoles, de façon à gérer au mieux l'incidence d'une sécheresse sur leurs résultats économiques. On parlera donc ici de stratégies privées, faisant intervenir des décisions en termes de pratiques agricoles et culturales, d'assolement, etc., par opposition aux politiques publiques et aux modes de gestion ou stratégies collectives d'acteurs. Un aspect essentiel de la question relative à l'adaptation socio-économique des exploitations réside bien entendu dans le degré de flexibilité induit par les choix technologiques. Nous commençons donc par présenter l'analyse micro-économique traditionnelle en matière de production.

Mentionnons tout d'abord qu'une distinction importante sera effectuée dans le texte entre deux types de comportement : les exploitants peuvent être neutres ou averses au risque (riscophobes). Dans le premier cas, l'exploitant cherchera à maximiser l'espérance de profit, calculée à partir d'une certaine fonction de probabilité sur les événements aléatoires (la température, les précipitations, l'intrusion de ravageurs des cultures, etc.). Dans le second cas, l'exploitant aura comme fonction objectif l'espérance de l'utilité du profit. Nous détaillerons le cas de l'exploitant averse au risque dans la section portant sur l'assurance.

2.3.1.1. Le manque d'eau : la nécessaire analyse (micro-)économique

L'eau d'irrigation appartient à un ensemble de facteurs de production (inputs) liés entre eux par la définition d'une technologie de production. L'eau d'irrigation peut *a priori* être considérée comme n'importe lequel des inputs nécessaires (à des degrés divers) à l'obtention d'un rendement de la culture, mais ce facteur a clairement pour particularité un degré de substitution quasi-parfait avec des apports d'eau "naturels" (via l'eau de pluie). Cependant, le caractère aléatoire de la distribution des précipitations empêche la définition d'une frontière de production déterministe (le rendement maximal certain que l'on peut atteindre étant donné une combinaison donnée des inputs).

Le problème de production s'écrit formellement comme suit. Soit Q le niveau de rendement, obtenu à partir d'un ensemble (vecteur) de n intrants noté $x = (x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_n)$, *via* une technologie (fonction de production) $Q \leq f(x)$. Pour un niveau de rendement prédéterminé, correspondant à la frontière d'efficience $\overline{V}(Q) = \{x \text{ tel que } Q = f(x)\}$, le taux marginal de substitution technique entre x_i et x_j est donné par :

$$\frac{\partial x_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial f(Q)/\partial x_j}{\partial f(Q)/\partial x_i}.$$

La mesure de la substitution technique entre deux facteurs de production est nécessairement positive, dans la mesure où les productivités marginales le sont. La mesure de courbure de l'isoquante (élasticité de substitution) est donnée par

$$\frac{\Delta k}{\Delta t} \times \frac{X/E}{f_E / f_X}, \quad \text{où} \quad \frac{\Delta k}{\Delta t} = \frac{d\left(E/X\right)}{d\left(f_X / f_E\right)}.$$

Les élasticités de substitution renseignent sur les possibilités de réaliser un objectif de rendement en palliant par exemple la diminution du niveau d'un intrant (en cas de restriction ou de hausse de son prix), par l'augmentation de la quantité de l'autre facteur de production. Dans la pratique, il existe la plupart du temps plus de deux intrants significatifs (dont la variation entraîne une modification du niveau de production), et le caractère positif de la substitution n'est plus automatique (voir Chambers, 1988). Il n'existe malheureusement pas d'études à grande échelle sur les possibilités de substitution entre facteurs y compris l'eau d'irrigation dans le cas de la France. Le plus souvent, les intrants sont en nombre très limités (par exemple, engrais, semences, travail, capital) et des contraintes fortes sont imposées à la technologie par la spécification du modèle de production (technologie Cobb-Douglas par exemple, voir Chambers, 1988 ; Just et Pope 1979).

Dans le cas de la production agricole par exemple, on conçoit aisément que des facteurs de production tel l'azote et l'eau sont plus complémentaires que substituts. Il importe dans notre cas de considérer l'apport d'eau total nécessaire aux cultures comme la somme de deux variables : l'eau d'irrigation, contrôlée par le producteur, et l'eau provenant des précipitations (exogène). Dans la mesure où les précipitations ne sont pas du ressort de l'exploitant, ce facteur ne serait pas *a priori* considéré de la même façon que les autres composantes du vecteur *x*. Les précipitations agiraient plutôt comme une variable conditionnant les rendements agricoles, dont les niveaux sont modulés par les décisions de production (utilisation des intrants). Il n'en demeure pas moins que, le niveau des précipitations affectant de façon non ambiguë l'usage des intrants (l'eau d'irrigation en particulier), les deux sources d'eau à usage agricole peuvent éventuellement être considérées comme des facteurs de même nature, du point de vue de la technologie de production. Ceci n'est vrai que si, comme pour les facteurs de production sous le contrôle de l'exploitant, on peut raisonnablement supposer que le niveau des précipitations est connu avec précision, de façon à faire jouer en toute connaissance de cause les relations de substitution ou de complémentarité entre les facteurs de production.

Nous introduisons à présent le problème d'un niveau de précipitations aléatoire. Considérons tout d'abord pour simplifier le cas d'une seule production. Le problème du producteur neutre au risque est de maximiser son profit espéré par rapport au niveau des intrants. Si l'on suppose de plus que les prix sont connus avec certitude et que l'aléa est unique (le niveau des précipitations par exemple), le profit espéré s'écrit :

$$\max_{x_1,\ldots,x_n} E(\Pi) = pE\left[Q(x),\varepsilon\right] - rx, \quad x_i \geq 0, \forall i = 1,2,\ldots,n,$$

où p est le prix de production, r le vecteur de prix unitaires des intrants, et ε est la variable aléatoire associée au risque de production. L'espérance est prise par rapport à la distribution statistique du seul terme aléatoire ε. La solution de ce problème est donnée par le système suivant :

$$\frac{r_i}{r_j} = \frac{\partial E\left[Q(x,\varepsilon)\right]/\partial x_i}{\partial E\left[Q(x,\varepsilon)\right]/\partial x_j}, \; i,j = 1,2,\ldots,n,$$

soit l'égalité entre le rapport des prix unitaires et les productivités marginales espérées des intrants correspondants. La frontière d'efficience, définie plus haut comme le lieu de production maximale pour une combinaison de facteurs donnée, devient ici un concept en espérance. La distinction entre les facteurs de production "marchands" (dont le coût est connu) et les précipitations dont le coût unitaire est supposé nul (en négligeant les coûts de transfert éventuels) apparaît clairement à présent ; une modification dans le niveau attendu des précipitations déplacera la frontière d'efficience espérée, et les facteurs *x* devront s'ajuster sur un nouveau point d'équilibre. Dans le cas d'intrants complémentaires,

la demande en eau d'irrigation augmentera en cas de sécheresse attendue, ce qui pourra entraîner par exemple une augmentation de la demande en énergie (pompage). Ou bien, dans le cas de facteurs de production substituts, le travail peut diminuer avec l'augmentation de l'eau d'irrigation.

Considérons à présent le problème étendu à celui du choix simultané de la combinaison d'intrants et des surfaces à allouer à chaque culture. Les variables de contrôle du producteur sont la combinaison d'intrants à associer à chaque culture, et la proportion de terre arable à affecter à chaque culture. La solution optimale revient à procéder en deux étapes : 1) déterminer tout d'abord la combinaison optimale d'intrants pour chaque culture (comme dans le cas d'une production unique) ; 2) étant donné la solution trouvée en 1), maximiser le profit total par rapport à la proportion de surface allouée à chaque culture. Ce mode de résolution nécessite cependant de supposer l'absence de relations de "jointure" (jointness) entre les intrants (le facteur travail ou capital en particulier). La deuxième étape peut, de plus, faire intervenir une valorisation différenciée du facteur terre via l'introduction de subventions publiques associées à la surface (primes PAC).

Formellement, le problème du producteur neutre au risque s'écrit :

$$\max_{x,l} \ \Pi = \sum_{c=1}^{C} \left\{ l_c \left[p_c Q_c(x_c, l_c, \varepsilon) \ + \tau_c - \sum_{j=1}^{n} r_j x_{cj}, \right] \right\}, \ \sum_{c=1}^{C} l_c = L,$$

où Π est le profit du producteur, p_c, Q_c et τ_c représentent respectivement le prix de production, le rendement et le taux de subvention à l'hectare pour la culture c ; l_c, x_{cj} et r_j dénotent la surface allouée à la culture *c*, le niveau de l'intrant *j* utilisé pour obtenir le rendement Q_c et le prix unitaire de l'intrant *j*. La surface totale est notée *L*. Comme précédemment, ε est la variable aléatoire associée au risque de production. Les composantes x_{cj} sont regroupées, pour la culture *c*, dans le vecteur d'intrants x_c. La résolution du système ci-dessous fournit les solutions en termes d'allocation des surfaces et de combinaison d'intrants :

$$\begin{cases} l_c p_c E \dfrac{\partial Q_c(x_c, l_c, \varepsilon)}{\partial l_c} + \left[p_c E Q_c(x_c, l_c, \varepsilon) + \tau_c - \sum_{j=1}^{n} r_j x_{cj} \right] - \lambda = 0, \quad c = 1, 2, \ldots, C, \\ l_c \left[p_c E \dfrac{\partial Q_c(x_c, l_c, \varepsilon)}{\partial x_{cj}} - r_{cj} \right], \quad j = 1, 2, \ldots, n, \quad c = 1, 2, \ldots, C, \end{cases}$$

où λ est le multiplicateur associé à la contrainte sur la surface totale.

Une version simplifiée du modèle ci-dessus revient à considérer des fonctions de rendement Q_c constantes par culture, et à remplacer le coût associé aux facteurs de production variables par un agrégat dépendant de façon non linéaire de la surface l_c. C'est l'approche de la PMP (Programmation Mathématique Positive), utilisée par Gohin et Chantreuil (1999), et Buisson (2005), avec l'hypothèse de coût quadratique : $\sum_{j=1}^{n} r_j x_{cj} = b_c l_c^2$, où b_c est un paramètre dépendant de la culture. Le problème ci-dessus devient alors :

$$\max_{\{l_c\}} \ \Pi = \sum_{c=1}^{C} \left[l_c \left(p_c Q_c + \tau_c - b_c l_c \right) \right], \ \sum_{c=1}^{C} l_c = L.$$

Notons qu'une version étendue du modèle de PMP permet d'incorporer un facteur prenant en compte l'aversion du producteur vis-à-vis du risque. Un critère minimisant le risque de production total tout en maximisant le profit est envisageable, sous des hypothèses parfois peu réalistes mais aisément transposables sur les préférences des exploitants face au risque.

2.3.1.2. De l'importance du timing de l'irrigation

Le problème est différent selon que l'on considère un irrigant éventuel ou un irrigant systématique. Dans le premier cas, l'irrigation de complément est déclenchée en cas de sécheresse si les ressources sont disponibles sans coût excessif ni restriction (peu probable, vue la définition de la sécheresse). On peut penser qu'un irrigant éventuel, étant moins tributaire de l'irrigation, sera doté de possibilités de substitution supérieures avec d'autres intrants (mais pas avec l'eau provenant des précipitations), mais rien ne permet de l'affirmer. Dans le second cas, celui de l'irrigant systématique, une restriction d'usage ou la hausse du coût de l'eau d'irrigation pénalise *a priori* le système de production plus fortement si la viabilité de ce dernier repose sur un apport d'eau régulier et significatif. Le problème dans tous les cas, pour un exploitant donné, est de ne pas toujours disposer d'une flexibilité suffisante dans la gestion de son plan de production. Si la sécheresse est "ponctuelle" et non chronique (ou tendancielle), considérée comme un événement purement aléatoire sur lequel le producteur n'a pas de contrôle, il n'y a pas de raison de modifier les assolements initialement prévus, ni les actions antérieures en début de saison agricole (fertilisation, travail du sol, etc.). Par contre, la réaction à la sécheresse passera par un ajustement des facteurs de production influençant le rendement, consécutivement à l'observation concrète de l'épisode de sécheresse. En fonction de la technologie (fonction de production) caractérisant les possibilités de substitution, cet ajustement pourra être très limité. Si maintenant la sécheresse est perçue comme un événement récurrent (la distribution de la probabilité d'occurrence n'étant pas stationnaire par exemple), alors l'ensemble des décisions (choix des systèmes de culture, proportion des cultures sur les différentes parcelles, choix de la combinaison d'intrants) sera affecté. C'est bien entendu le cas le plus intéressant.

La relation avec la notion de durabilité des exploitations agricoles (ou des systèmes de culture) est immédiate. Un système défini par un ensemble de cultures et de pratiques sera durable (ou une exploitation le pratiquant le sera…) s'il est robuste à une modification plus ou moins persistante des conditions climatiques, économiques, etc. Si par exemple l'exploitation peut résister à un épisode de sécheresse même grave (emprunts, indemnisations), elle peut être fragilisée par une série d'épisodes rapprochés, par un effet de cumul.

Considérons tout d'abord le cas d'une sécheresse ponctuelle. Si cette dernière est annoncée ou anticipée avant la décision de production des cultures de printemps (maïs, sorgho, pois de printemps), alors le producteur aura la possibilité de modifier son système de culture en adoptant une production plus économe en eau. Si par contre la sécheresse n'est anticipée ou annoncée qu'après les décisions d'assolement (ou la date de semis), les seules possibilités d'adaptation porteront sur les modifications d'usage des autres intrants variables, dont on a vu que les possibilités de substitution avec l'eau comme facteur limité sont *a priori* très limitées. Dans ce cas, une gestion plus efficace de l'eau d'irrigation est encore envisageable, en jouant sur le nombre de tours d'eau (fractionnement intra-saisonnier des irrigations), le fonctionnement des équipements, etc. Cette politique nécessite vraisemblablement un fort degré de substitution avec un facteur comme le travail (temps passé pour inspecter les parcelles) ou l'énergie (méthodes d'irrigation plus sophistiquées) par exemple. Une gestion plus efficace de l'irrigation est d'autant plus envisageable que l'élasticité de la demande d'eau d'irrigation à son prix est élevée, et que les perspectives de restrictions sont limitées.

En conséquence, l'identification de stratégies de contrôle viables requiert de l'information sur les éléments suivants :

- les élasticités de substitution entre l'eau d'irrigation, les précipitations et les autres intrants ;
- l'élasticité-prix de l'eau d'irrigation ;
- la possibilité d'anticiper correctement un épisode de sécheresse avant les décisions d'assolement ou de semis.

Etant donné les différents types d'irrigants (occasionnels ou systématiques) rencontrés en pratique, il importe d'obtenir une classification des exploitants selon le critère de substitution ou de complémentarité avec les précipitations. De façon relativement naturelle, l'eau d'irrigation pourra être considérée comme un facteur de production complémentaire aux précipitations si l'irrigation est utilisée de façon générale pour des apports occasionnels, au sein d'un système de culture viable sous

de fortes amplitudes climatiques. Au contraire, les précipitations apparaîtront comme un substitut à l'eau d'irrigation dans des systèmes reposant sur une irrigation systématique. On peut ranger dans le second cas des exploitations avec des équipements permanents d'irrigation, alors que des installations mobiles seront associées à la première catégorie. Dans une telle perspective, le facteur de production important est donc le capital d'irrigation, dont le coût d'amortissement est d'autant plus important que l'équipement est fixe (permanent).

En résumé, les possibilités d'action pour un producteur sont :
- modifier les assolements si la sécheresse est anticipée / annoncée à temps, en fonction d'un calcul de rentabilité inter-productions ;
- à assolement fixé, modifier les inputs variables et/ou le mode de fonctionnement des équipements d'irrigation, etc.

L'intérêt de cette partie introductive est de montrer que le contexte économique intégrant notamment les évolutions attendues des politiques agricoles va jouer un rôle important dans les décisions des producteurs en matière d'irrigation. Que ce soit via les indemnités compensatoires (primes à l'hectare) ou par des systèmes de taxation / subvention modifiant les rapports des prix des intrants, les réformes entreprises ou annoncées impactant le secteur agricole vont se traduire par une modification du système de prix auxquels les irrigants font face. En conséquence, une modélisation permettant d'intégrer la représentation de la technologie de production est indispensable au niveau du producteur, pour appréhender les variations attendues de la demande en eau d'irrigation, dans un contexte de pénurie aggravée.

L'analyse micro-économique au niveau de l'exploitation présentée ci-dessus s'attachait à décrire les mécanismes sous-jacents aux décisions de production, en situation d'aléas climatiques. La description des comportements était réalisée sous l'hypothèse que le producteur étant neutre envers le risque, il maximisait son profit espéré. Lorsque l'exploitant agricole est supposé être averse au risque, une conséquence importante est que les choix de production sont distordus en fonction de l'intensité du risque et de l'aversion du producteur par rapport à ce risque. A la différence avec le cadre d'analyse précédent, le producteur cherchera maintenant à se prémunir contre les conséquences du risque dans son activité de production : soit en adoptant des stratégies de limitation du risque, soit en ayant recours à une assurance spécifique si elle existe. Nous présentons tout d'abord une analyse économique du risque, avant de discuter des systèmes d'assurance sécheresse.

2.3.1.3. Evaluation économique du risque

L'activité agricole se caractérise par une forte exposition au risque. Deux principales catégories de risques affectent la production agricole. La première est constituée par les **risques de production**, souvent relatifs au climat (précipitations excessives ou insuffisantes, grêle, températures extrêmes[1]) et mesurés par la variabilité des rendements (qui diffère pour une culture donnée d'une région à l'autre en fonction du climat, du type de sol et des méthodes de production). Ces risques de production peuvent ainsi être mesurés au niveau d'une exploitation, d'une région ou d'un état, et regroupent également les risques sanitaires (maladies végétales, ravageurs, micro-organismes, résidus…) qui, à la différence des aléas climatiques, sont en grande partie maîtrisables par l'agriculteur.

La seconde catégorie concerne les **risques de prix** (chute des prix de l'output et forte augmentation des prix des facteurs de production), mesurés par la variabilité des prix (contrairement aux rendements, les prix sont généralement fortement corrélés entre différentes régions). D'autres types de risques secondaires sont aussi répertoriés : les risques personnels (relatifs aux décès, aux maladies ou incapacités éventuelles des exploitants agricoles) ; les risques de l'actif (risque de vol, d'incendie touchant l'équipement, le matériel et les bâtiments agricoles utilisés pour la production) ; les risques institutionnels (changement de politique agricole ou de politique environnementale, ces politiques

1 La grêle et le gel sont, sans conteste, les deux aléas les plus redoutés dans les filières végétales.

affectant la production et de ce fait le résultat financier de l'exploitation agricole ; le risque de rupture d'un contrat...) qui regroupent les risques environnementaux et émergents liés à l'évolution des techniques et systèmes de production, les risques juridiques comme l'instauration d'une responsabilité du fait des produits défectueux, et les risques liés à l'application du principe de précaution (mises sous séquestre d'exploitations qui ne sont pas à l'origine du risque…) ; et enfin les risques financiers (accroissement du coût du capital, liquidité insuffisante).

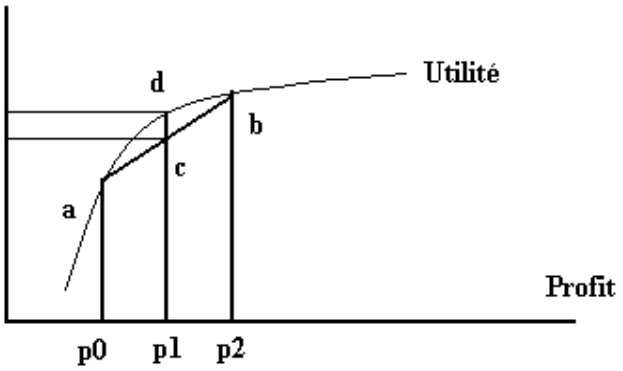
Ces différents risques sont souvent corrélés les uns aux autres [2] et ont tous un effet, à des degrés divers, sur la situation financière de l'exploitation agricole.

Les exploitants agricoles ne connaissent pas parfaitement la situation dans laquelle ils effectuent leurs choix. Cette connaissance imparfaite du futur confère à leurs revenus un caractère incertain résultant en des pertes qui affectent négativement leur bien-être. Tous les producteurs agricoles n'ont pas le même comportement face au risque et cette différence correspond à des degrés différents d'aversion pour le risque. Les progrès récents de la théorie de la décision en univers risqué (Eeckhoudt et Gollier, 1992) ont montré l'importance des préférences vis-à-vis du risque et ont prouvé que le comportement riscophobe d'un exploitant agricole peut le conduire à une allocation de ses ressources inefficace, par conséquent à un niveau de bien-être sous-optimal (Brink et McCarl, 1978 ; Binswanger, 1980 ; Hazell, 1982 ; Babcock, 1992 ; Feinerman et Finkelshtain, 1996).

Comment caractériser cette aversion ? Les goûts des agriculteurs sont en général représentés par leurs préférences et donc par leur fonction d'utilité. La fonction d'utilité reflète les préférences de l'agent et ses attitudes face à une situation risquée. Elle permet d'introduire la diversité des comportements des agents face au risque. Elle ramène les études des décisions individuelles rationnelles à des programmes de maximisation sous contraintes (voir l'Annexe pour une présentation plus détaillée du critère d'espérance d'utilité).

Il y a équivalence entre aversion au risque et concavité de la fonction d'utilité. Plus un exploitant est averse au risque, plus sa fonction d'utilité sera concave ; au contraire, plus la fonction d'utilité sera proche d'une droite (cas linéaire), plus le producteur sera neutre au risque. Dans la figure ci-dessous, P0 est le profit dans la situation la plus défavorable, P2 celui dans la situation la plus favorable. A ces deux valeurs correspondent les points *a* et *b* de l'utilité. La moyenne des deux niveaux de profit P0 et P2 vaut P1, le profit intermédiaire, avec comme niveaux d'utilité associés *c* et *d*. Le point *c* correspond à la moyenne des niveaux d'utilités associés aux profits P0 et P2, alors que le point *d* correspond à l'utilité associée au profit moyen (P1). On voit bien qu'avec une fonction d'utilité concave, l'utilité de l'espérance du profit (point *d*) est supérieure à la moyenne des utilités des profits individuels (point *c*).

Figure 1. Utilité et aversion au risque



Les préférences au risque sont définies par les propriétés de la fonction d'utilité caractéristiques de son comportement face au risque. La fonction d'utilité correspond à un comportement d'aversion au risque, neutre au risque, preneur de risque si la prime de risque, si elle existe, est strictement positive, nulle,

2 Par exemple, imposer des restrictions environnementales a un impact sur le risque de production ou le risque institutionnel d'un changement de soutien au prix a une influence sur le risque de prix.

strictement négative respectivement. Il existe une équivalence parfaite entre le signe de la prime de risque et la caractérisation des préférences. Cette parité fait l'intérêt du concept de prime de risque que nous présentons dans l'encadré 1.

Encadré 1. La prime de risque

La notion de prime de risque peut être formalisée à l'aide de l'exemple suivant : supposons un exploitant agricole ayant une richesse initiale W_0 qui décide de récolter une culture risquée de rendement aléatoire $\tilde{x}$ ayant une fonction de répartition *F(x)*.
Un exploitant agricole rationnel, avec une fonction d'utilité strictement croissante *U(.)* décidera de récolter cette culture si $U(W_0) < EU(W_0 + \tilde{x})$ où E est l'indicateur de l'espérance mathématique de l'aléa. Si l'exploitant agricole est confronté à ce choix, quel est alors son équivalent certain ? On s'interroge alors sur le niveau certain de richesse, $\overline{W}$, qui est capable de lui fournir la même satisfaction : $U(\overline{W}) = EU(W_0 + \tilde{x})$. L'agriculteur apparaît alors indifférent entre une richesse de $\overline{W}$ obtenue avec certitude et la situation risquée composée de W_0 accompagnée de $\tilde{x}$.

La prime de risque découle très naturellement de l'équivalent certain. La prime de risque est définie comme le montant monétaire maximum, *P*, que l'agriculteur serait prêt à sacrifier pour éviter la culture risquée, ou, en d'autres termes, c'est le montant monétaire que l'agriculteur est prêt à payer pour recevoir le profit espéré maximum de la culture risquée au lieu de supporter le risque de récolter cette culture directement, ce qui se traduit techniquement par la relation suivante :

$$U(W_0 + E(\tilde{x}) - P) = EU(W_0 + \tilde{x})$$

Par conséquent, le lien entre la prime de risque et l'équivalent certain est immédiat : $P = W_0 + E(\tilde{x}) - \overline{W}$. $E(\tilde{x})$ est l'espérance mathématique du rendement de la culture. $W_0 - \overline{W}$ s'interprète comme le prix de vente du risque qui correspond à l'idée d'assurance puisque l'agriculteur se débarrasse d'un risque initialement détenu contre une somme d'argent. Lorsqu'il y a neutralité au risque, le prix de vente du risque est égal à son espérance mathématique $W_0 - \overline{W} = E(\tilde{x})$; la prime de risque est nulle. Il y a aversion au risque si $P > 0$. En effet, dans ce cas, le prix de vente du risque est inférieur à son espérance mathématique $W_0 - \overline{W} < E(\tilde{x})$ et donc inférieur au prix de vente du risque résultant de la neutralité au risque. L'agriculteur n'apprécie pas alors le risque puisqu'il se contente d'un prix inférieur pour s'en défaire.

Par l'approximation d'Arrow-Pratt, il est facile de montrer que la prime de risque est constituée par le produit de deux éléments facilement interprétables : un indicateur du risque et une mesure d'aversion au risque. Depuis très longtemps, le risque a été souvent représenté par la notion de variance (variance des rendements de la culture par exemple). Il est montré que considérer seulement la moyenne ou la variance du rendement de la culture pour étudier les plans de décision optimaux des producteurs n'est pas suffisant, car des moments (de la distribution statistique) plus élevés peuvent affecter leurs décisions. C'est pourquoi la théorie préconise le critère de l'espérance d'utilité de la richesse finale ; il apparaît alors que la variance n'est plus suffisante pour mesurer le risque.

L'aversion au risque peut être mesurée par l'indice local d'aversion absolue au risque, $A_R(W)$ fonction de la richesse de l'agriculteur et défini comme $A_R(W) = -\dfrac{U''(W)}{U'(W)}$. Cet indice traduit l'allure de la fonction d'utilité. Plus cet indice est élevé, plus l'exploitant agricole est riscophobe. Lorsque la richesse de l'agriculteur augmente, il est admis que ce dernier redoute moins le risque considéré. En termes techniques, cette hypothèse nous indique que $A_R(W)$ et donc, la prime de risque, est une fonction non croissante de la richesse.

Plusieurs études théoriques et empiriques (Binswanger, 1980 ; Bar-Shira, Just et Zilberman, 1996) mettent en évidence que les agriculteurs présentent de l'aversion au risque. L'omission des préférences vis-à-vis du risque des producteurs agricoles, dans l'analyse de leurs décisions, peut conduire à des résultats biaisés (Hennessy et Rosen, 2003 ; Babcock et Hennessy, 1996 ; Ramaswani, 1992 ; Babcock, 1992 ; Leathers et Quiggin, 1991). Certaines études supposent une neutralité au risque de l'agriculteur ou spécifient une fonction d'utilité à aversion au risque absolue constante, ce qui implique qu'il n'y a pas d'effet richesse[3]. Cette forme est vivement critiquée car il est admis que des niveaux de richesse plus élevés compensent les besoins de sécurité de revenu de l'exploitant agricole. Ainsi il est montré que, si un facteur de production augmente (diminue) la variabilité des rendements, alors un exploitant agricole riscophobe utilisera moins (plus) de ce facteur (Pope et Kramer, 1979). Nous faisons ici référence à des producteurs agricoles individuels qui n'ont pas accès au marché boursier pour financer leurs activités. Pour eux, le risque est un paramètre important et le critère d'espérance d'utilité s'impose dans ce contexte.

2.3.1.4. Irrigation et risque de production : analyse empirique des stratégies

Irrigation et technologie de production

Il est naturel de considérer l'eau d'irrigation comme un intrant utilisé de façon combinée avec d'autres facteurs de production (engrais, travail, capital, énergie, semences) pour parvenir à un rendement donné. En ce sens, ce dernier sera une fonction *a priori* concave du volume d'eau utilisé, croissante jusqu'à un certain point et éventuellement décroissante au-delà (pour une irrigation excessive)[4]. Par contre, on oublie souvent que des facteurs de production peuvent être combinés pour répondre, en parallèle, au problème de limitation du risque encouru par l'exploitant. La notion pertinente de risque porte sur l'incertitude liée au profit total, cette dernière pouvant être confondue avec le risque de production si les prix de production et des facteurs sont connus avec certitude. En tout état de cause, si le risque de production n'est pas relié à celui du (ou des) prix (non corrélation des sources de risque), une stratégie unique de contrôle du premier pourra être menée.

Considérons le couple de variables climatiques (température, précipitations) comme un processus aléatoire influençant à la fois le niveau du rendement agronomique et sa distribution (au sens statistique du terme). Dans les modèles les plus simples par exemple, ce processus jouera en même temps sur la moyenne et la variance du rendement, *étant donnés* les facteurs de production utilisés. Une spécification usuelle en économie de la production agricole en présence d'incertitude est par exemple celle de Just et Pope (1978, 1979), qui permet de décrire les choix d'intrants en fonction de leur impact différencié sur le rendement espéré et la variance de ce dernier. Les intrants peuvent être identifiés individuellement comme réducteurs de risque ou à augmentation de risque. Un exploitant averse envers le risque effectuera donc un arbitrage, dans le choix de sa combinaison d'intrants, entre la réduction du risque et la recherche d'un rendement supérieur.

Par exemple, pour la production de maïs et d'avoine aux États-Unis, Just et Pope (1979) concluent que les engrais accroissent la variabilité des rendements. Donc, même si l'utilisation intensive d'engrais accroît l'espérance de production, elle aurait aussi un effet positif sur la variance, ce qui correspond à une augmentation du risque pour les exploitants et donc une diminution de bien-être. Par extension, l'étude des moments d'ordre supérieur permet de caractériser, de manière plus détaillée, les conséquences des pratiques culturales sur la distribution de probabilité des rendements et donc sur le bien-être des agriculteurs. Se pose alors le problème de la justification de la sur-utilisation de certains intrants, et de la rationalité des choix de production.

---

3 La modification de la richesse de l'agriculteur peut influer sur son comportement vis-à-vis du risque. Cette influence de la richesse sur les décisions de production varie en fonction des préférences individuelles face au risque. On suppose généralement une aversion absolue décroissante pour le risque (hypothèse DARA), approche couramment utilisée pour modéliser le risque, selon laquelle les individus sont davantage disposés à prendre des risques lorsque leur richesse s'accroît.

4 Si le rendement est toujours non-décroissant pour tout niveau de l'intrant, on a affaire à une technologie "à plateau" (Liebig, Mitscherlich-Baule, etc.)

Une des spécifications les plus couramment utilisées est la Cobb-Douglas (1928). Sa forme log-linéaire est à résidu multiplicatif, le terme d'erreur représentant la composante du rendement non expliquée par les intrants (les chocs climatiques, en particulier). Plus rigoureusement, ce terme d'erreur doit être non-corrélé avec le niveau des facteurs de production (fonction de régression) ; il n'est donc pas pertinent d'inclure dans ce terme d'erreur des éléments aléatoires conditionnant directement le choix des intrants (réalisations observées du climat *ex ante* ou niveau d'azote dans le sol par exemple).

La formulation Cobb-Douglas impose que l'effet marginal des intrants sur la variabilité de la production soit toujours positif. Donc, si on envisage une politique ou une stratégie privée visant à réduire l'utilisation d'eau d'irrigation, une étude basée sur la fonction Cobb-Douglas peut conduire à des conclusions erronées du fait des restrictions découlant de la forme fonctionnelle et notamment de la prise en compte du terme aléatoire. D'après la forme Cobb-Douglas, une réduction de l'utilisation de l'eau d'irrigation entraînerait une réduction de la variabilité de l'output. Cependant, en réalité, on constate le phénomène inverse, l'aspect de sécurité apporté par l'irrigation étant précisément invoqué comme facteur majeur du choix des producteurs. Donc, si on considère que les producteurs sont averses au risque, la perte réelle de bien-être provenant d'une plus grande variabilité de la production, c'est-à-dire d'un plus fort risque sur le rendement, serait plus importante que celle estimée à partir de la spécification Cobb-Douglas de la fonction de production.

Just et Pope (1979) proposent une formulation de la technologie qui relâche certaines des restrictions imposées par les spécifications traditionnelles : l'effet des intrants sur le niveau de production est déconnecté de celui sur la variance du niveau de production. Ils proposent donc une fonction de production qui comporte deux fonctions, une qui spécifie les effets des inputs sur l'espérance de l'output et l'autre sur la variance de l'output. L'effet sur la variance de l'output ou de celle sur sa productivité marginale est bien déconnecté de l'effet sur l'espérance de production. Cette forme, à erreur additive, bien que plus flexible que les formes à erreur multiplicative, contraint tout de même la forme de la distribution des rendements. Si une étude empirique est destinée à évaluer les performances d'une politique visant à réduire l'utilisation de l'irrigation, il est important de connaître l'effet de cet intrant sur la distribution des rendements. En effet, la connaissance de l'impact de cet intrant sur la variance de la production, mais aussi sur les moments d'ordre supérieur, permet d'accroître l'efficacité d'une telle politique ; l'utilisation de cet intrant peut permettre non seulement d'accroître les rendements en moyenne mais aussi de réduire le risque sur le niveau de production.

Comme réponse à ce problème, Antle (1987) propose une approche économétrique qui vise à expliquer les moments de la distribution de la production par les intrants. Cette méthode nécessite relativement peu de spécifications et donc impose relativement peu de restrictions sur la distribution de la production. Elle permettra ensuite de discuter de la rationalité des comportements des producteurs vis-à-vis du risque. Les croyances des agriculteurs quant aux profits à venir sont décrites par la distribution des profits conditionnelle aux inputs ; la distribution des profits est alors équivalente à une distribution des rendements si les prix de l'output et des facteurs ne sont pas stochastiques. L'idée de Antle est d'approcher la condition de premier ordre du problème de maximisation de l'utilité espérée des producteurs pour faire apparaître des paramètres à estimer interprétables en terme d'aversion au risque.

Les paramètres estimés représentent l'attitude face au risque de l'agriculteur en termes des dérivées de l'utilité espérée, et de manière plus intuitive, les effets de la variation marginale des différents moments sur l'espérance d'utilité. Ainsi, certains mesurent l'effet marginal de la variance, c'est-à-dire de la dispersion des rendements, sur l'espérance de profit, alors que d'autres captent l'effet marginal du moment d'ordre 3, c'est-à-dire de la dissymétrie des rendements sur cette espérance.
Un paramètre associé au moment de 2e ordre (variance) négatif traduira le désir d'accroître l'espérance d'utilité par la diminution de la variance des rendements. Cette mesure est à rapprocher du coefficient d'aversion pour le risque de Arrow-Pratt (voir Encadré 1).
De même, un paramètre associé au moment de 3e ordre (asymétrie) positif traduira le désir d'accroître l'espérance d'utilité par l'accroissement du moment d'ordre 3, en se plaçant dans une situation moins

vulnérable vis-à-vis des événements extrêmes défavorables[5]. Cette mesure est à rapprocher du coefficient Downside-risk.

Il n'existe pas à notre connaissance de travaux publiés sur l'estimation de l'aversion au risque des producteurs faisant intervenir l'eau d'irrigation, en France. Les travaux les plus proches sont soit sur le cas français mais n'incluent pas l'eau d'irrigation dans la liste de leurs intrants (Bontems et Thomas, 2000 ; Chavas et Holt 1990, 1997), soit sur des pays étrangers (Belhaj Hassine et Thomas, 2001 ; Groom et al., 2006). Par exemple, Belhaj Hassine et Thomas (2001) trouvent des estimations de 0.314 et 0.228 pour les coefficients d'Arrow-Pratt et de Downside Risk respectivement, et une prime de risque relativement modérée, dans le cas d'irrigants tunisiens. Groom et al. (2006) estiment le modèle d'Antle sur des données chypriotes et des intrants incluant l'eau et les engrais. Ces auteurs trouvent des estimations du coefficient d'Arrow-Pratt de 0,3401 et 0,0726 pour les céréaliers et les horticulteurs respectivement, et un coefficient de Downside Risk de 0,2930 pour les horticulteurs (le paramètre n'est pas significatif pour les céréaliers). Avec ces estimations, les primes de risque relatives (exprimées par rapport au profit moyen) sont estimées à 0,1708 et 0,2216 pour les céréaliers et les horticulteurs respectivement. Bontems et Thomas (2000) estiment le coefficient d'aversion au risque d'une fonction d'utilité DARA (Decreasing Absolute Risk Aversion) et calculent la prime de risque relative à 7,55% du profit moyen, pour les producteurs de maïs américains.

Simulation de la conduite d'irrigation optimale : choix des cultures et impact des politiques publiques

On a développé (Reynaud, 2006) un modèle basé sur le couplage du modèle de cultures STICS avec un simulateur d'optimisation micro-économique. L'outil permet de simuler un calendrier optimal d'irrigation conditionnel à un choix d'assolement optimal, en situation d'incertitude sur le climat se réalisant au cours de la campagne culturale. On a introduit dans ce modèle un scénario de restrictions d'arrosage en cours de campagne d'irrigation intervenant de manière aléatoire. L'anticipation par l'agriculteur de cette possibilité d'interdiction d'arrosage le conduit à adopter des assolements et des calendriers d'irrigation moins vulnérables à ce type de risque. Les simulations effectuées montrent que des restrictions d'arrosage anticipées en amont, avant choix des cultures d'été par l'exploitant, ne se traduiraient que par des baisses de revenus espérés de l'ordre de 5% par rapport à une situation sans interdiction d'arrosage. Ces résultats sont obtenus en supposant que l'exploitant peut combiner substitution par des cultures plus économes en eau des cultures les plus consommatrices et adaptation tactique des arrosages en cours de campagne d'irrigation à matériel donné.

Même s'il ne s'agit là que de simulations qui demandent à être confirmées par des exemples pris en situation réelle, le travail montre l'importance d'une alerte suffisamment précoce si l'on souhaite limiter au maximum les pertes de revenu agricole. Cette alerte devrait s'opérer à deux niveaux. D'une part, les agriculteurs doivent disposer, avant de décider leur assolement en cultures d'été, d'informations les plus fiables possibles en matière de remplissage des nappes et de risques de sécheresse en été. Cet effort d'alerte est maintenant conduit de manière systématique par les pouvoirs publics depuis la sécheresse (malheureusement mal anticipée) de 2003.

Mais l'effort devrait aussi porter sur les calendriers de restriction d'arrosage dès lors que la sécheresse apparaît comme très probable. C'est ici qu'intervient le retour de connaissance concernant les choix d'assolements en cultures d'été des irrigants en réaction à l'alerte sur les réserves disponibles. Sur la base de cette information, les pouvoirs publics peuvent simuler les besoins en eau des agriculteurs et anticiper sur la sévérité des restrictions qu'ils vont devoir mettre en place. Le potentiel d'adaptation stratégique des cultures ayant été d'ores et déjà mobilisé lors de l'alerte avancée, c'est le potentiel d'adaptation tactique qui doit maintenant être favorisé par une annonce précoce du calendrier des restrictions et de leur répartition locale.

5 Événements de l'extrémité gauche de la distribution, c'est-à-dire défavorables car caractérisant les niveaux de rendements (ou profits) faibles.

L'annonce précoce des risques de sécheresse et de restrictions à l'irrigation ainsi qu'une systématisation de la collecte d'informations en amont sur les choix de cultures d'été peuvent donc permettre de réduire les pertes de revenus agricoles à des niveaux nettement inférieurs à ceux qui auraient résulté d'interdictions impromptues. Rappelons que néanmoins, là encore, la nature du risque, et donc l'attitude de l'irrigant face au risque, compte. La survenue de la sécheresse restant incertaine (cas de 2006 où un printemps pluvieux a pallié en partie le déficit de recharge hivernale des réserves du sol), l'agriculteur peut aussi opter pour des stratégies volontairement risquées, mettant en place des cultures fortement consommatrices d'eau mais plus rentables selon une logique de loterie, une perte une année donnée pouvant être compensée par des gains plus importants l'année suivante.

2.3.1.5. La valeur de l'information

Dès lors que les décisions de l'agriculteur sont répétées dans le temps (par exemple le choix des différentes quantités d'eau à apporter à chaque période définissant la conduite d'irrigation au cours d'une saison sous des conditions climatiques aléatoires), un facteur supplémentaire affecte sa prise de décision : il s'agit de la valeur de l'information. Avant chaque décision, l'exploitant agricole réalise des anticipations sur les états futurs de la nature (ou par exemple sur la quantité d'eau disponible dans le sol). Le problème de l'agriculteur étant dynamique, au fur et à mesure du déroulement du processus de décision, l'observation de l'état passé fournit à l'agriculteur de l'information sur l'état futur. Cette information peut être intégrée ou pas, du fait du coût de son obtention, dans le programme de décision du producteur agricole. Ainsi sa valeur peut être quantifiée en comparant le programme incorporant l'information[6] avec celui sans prise en compte de l'information[7]. La valeur de l'information est définie alors comme le montant monétaire certain à ajouter au profit obtenu pour la stratégie en boucle ouverte pour compenser la perte de l'accès à l'information au cours de la période considérée. Elle traduit la valeur monétaire tirée de l'usage de cette information.

Certains auteurs (Zavaleta, Lacewell et Taylor, 1980) ont analysé les effets de l'information relative à la réserve utile du sol ou au climat sur les profits espérés. D'autres comme Bosch et Eidman (1987), Botes, Bosch et Oosthuizen (1995, 1996) se sont intéressés au problème d'évaluation de la valeur de l'information dans le cas de la conduite de l'irrigation en intégrant les préférences de l'exploitant agricole. Ces auteurs cherchent à déterminer le montant que serait prêt à payer l'agriculteur pour obtenir une information plus précise sur la réserve utile du sol, la croissance de la plante et le climat. Ils considèrent pour cela six niveaux d'informations résultant de la combinaison de la connaissance plus ou moins précise de l'état des ces trois variables. Ils quantifient alors, en fonction de l'attitude vis-à-vis du risque de l'agriculteur, la valeur de l'information, au sens où nous l'avons définie précédemment.

Ils montrent que la valeur de l'information est d'autant plus élevée que l'eau pour l'irrigation est limitée et que la capacité de rétention de l'eau par le sol est faible. Ils montrent aussi que le montant que l'agriculteur est prêt à payer pour obtenir une meilleure information dépend de son attitude face au risque et augmente substantiellement si la ressource en eau est limitée. La valeur de l'information varie entre 136 R/ha et 330 R/ha (R étant un revenu de référence) selon le degré d'aversion pour le risque de l'agent, dans un contexte de ressource en eau non limitée. Cette valeur augmente d'environ 49% quand l'offre d'eau est limitée (les auteurs introduisent, dans ce cas, une restriction de 50% du montant de l'eau utilisée par l'agriculteur lorsqu'il n'y a pas de restriction sur l'offre). Les principales limites de leur analyse reposent d'une part, dans l'espace des décisions possibles (qui est très limité) et d'autre part, dans la spécification de la fonction d'utilité (de type exponentiel avec un coefficient d'aversion absolue pour le risque constant avec la richesse).

---

6 Ce programme aboutit à une stratégie dite par induction pour laquelle chaque décision, à un instant donné, est prise en considérant d'une part l'information passée et d'autre part l'observation du système. L'exploitant agricole, supposé décideur bayésien, peut alors, en considérant ces deux éléments, réviser la distribution de probabilités des différents états du système et utiliser cette nouvelle distribution pour définir la séquence de décision optimale pour la période considérée. Cette stratégie est optimale.

7 Ce programme donne une stratégie, sous-optimale, dite en boucle ouverte, qui ne tient pas compte de l'information arrivant au cours du temps. L'agriculteur ne modifie pas son plan de décision initialement prévu.

Cette dernière critique a été levée par Bontems et Thomas (2000), en spécifiant une fonction d'utilité à aversion relative au risque constant, mais pour le problème d'application de l'azote par un agriculteur évoluant dans un environnement incertain. Ils cherchent alors à quantifier la valeur de l'information sur l'environnement futur, correspondant à la capacité de l'agriculteur pour utiliser une telle information. Ils montrent l'importance de l'aversion pour le risque ainsi que de la valeur de l'information dans la prise de décision de l'agriculteur. La valeur moyenne de l'information est de 14 dollars par acre, soit environ 12,5% du profit par acre tandis que la prime de risque est évaluée à 2,5 dollars par acre, soit approximativement 7,5% du profit par acre.

Risques, préférences vis-à-vis du risque et information sont les composantes fondamentales déterminant les prises de décisions des exploitants agricoles face à un risque de sécheresse. Ces derniers peuvent soit adopter des stratégies privées de contrôle des risques de production (plus précisément, de contrôle de l'impact de ces risques), soit avoir recours à un système d'assurance (ou fonds de garantie).

2.3.2. Assurances contre la sécheresse

2.3.2.1. Les mesures de couverture privées contre le risque de sécheresse

Les différentes décisions prises par les agriculteurs riscophobes en situation risquée reposent généralement sur un arbitrage entre la recherche d'un revenu supérieur et la réduction du risque subi ou un partage du risque plus élevé. Plusieurs choix de mesures de couverture contre le risque de sécheresse s'imposent alors au producteur agricole. On distingue habituellement les décisions portant sur la gestion de la production, de celles axées sur la gestion des pertes éventuelles subies en cas de sécheresse.

Les décisions relatives à la production conditionnent les revenus tirés de l'activité agricole qui sont affectés par le risque de sécheresse. Elles intègrent les choix concernant la structure culturale de l'exploitation agricole se résumant au choix d'un mode de polyculture qui permet la diversification des productions et, de ce fait, la minimisation du risque, ou d'un mode monocultural avec un revenu et un risque plus élevés. La sélection de la ou des culture(s) se fera selon leur exposition au risque ou selon leur soutien public ou selon leur rythme de croissance ou selon la structure culturale choisie. Une fois la structure définie, l'agriculteur doit établir une combinaison de facteurs de production afin d'atteindre son objectif de revenu fixé. Les principaux facteurs de production sont l'eau d'irrigation, les engrais, le travail, le capital, l'énergie et les semences.

La relation entre le rendement et les facteurs de production est décrite par la fonction de production. Cette dernière peut être résumée en une relation entre la variable de décision, l'eau d'irrigation, notée, *e*, un vecteur de variables climatiques (température, précipitations) reflétant l'incertitude, $\tilde{c}$, et une variable regroupant tous les autres facteurs de production que l'on suppose fixés efficacement, $\bar{i}$; elle décrit ainsi une fonction de rendement de la culture : $y = f\left(e, \tilde{c}; \bar{i}\right)$. Cette fonction est croissante jusqu'à un certain point et éventuellement décroissante au-delà (pour une irrigation abusive).

Une spécification usuelle en économie de la production agricole en présence de risque est celle de Just et Pope (1978). Elle permet de modéliser le fait que certains facteurs de production puissent être utilisés non pas seulement pour augmenter la production mais aussi pour réduire le risque[8]. Les facteurs de production peuvent être identifiés individuellement comme réducteurs de risque ou à augmentation de risque, le rendement marginal du facteur *(* f_e *)* variant alors directement ou inversement avec la sévérité du sinistre respectivement. Ainsi plus la sécheresse sera forte plus le rendement marginal de l'eau d'irrigation sera élevé ou faible selon que l'on considère que ce facteur est un intrant réducteur de risque ou à augmentation de risque. Il est clairement admis que l'eau d'irrigation est un substitut aux précipitations. Ainsi plus un exploitant agricole sera averse envers le risque plus il appliquera de l'eau d'irrigation sur sa culture.

Les décisions concernant les pertes dues aux risques regroupent toutes les mesures de couverture et de prévention contre le risque de sécheresse. Distinguons les mesures d'assurance et d'auto-assurance[9]

---

8 L'approche de Just et Pope (1978) est d'utiliser une fonction de production de la forme suivante : $y = h(e) + g(e)\tilde{c}$ où e est le facteur de production (l'eau apportée à l'irrigation) et $\tilde{c}$ la variable aléatoire (les précipitations) affectant la production (le rendement de la culture). Pour des facteurs augmentant le risque (les pesticides par exemple), $\frac{dg(e)}{de} < 0$ tandis que $\frac{dg(e)}{de} > 0$ pour des facteurs réducteurs de risque (l'eau d'irrigation). Cette spécification a été généralisée par ces auteurs à la forme suivante : $y = y(e, \tilde{c})$.

9 Ehrlich et Becker (1972) sont les premiers à utiliser les termes d'auto-assurance et d'auto-protection. Le premier est associé à une mesure de couverture contre des risques potentiels alors que le second est associé à une mesure de prévention contre des risques éventuels. L'auto-assurance permet la réduction de l'ampleur des pertes dues à un événement aléatoire tandis que l'auto-protection est un moyen permettant de réduire la probabilité d'occurrence d'un événement aléatoire. Ces auteurs montrent que l'assurance et l'auto-assurance sont des substituts ; ainsi lorsque le coût de l'assurance s'accroît, la demande d'auto-assurance augmente tandis que la demande d'assurance baisse. Ils montrent aussi que l'assurance privée et l'auto-

visant à diminuer le niveau des pertes lors d'un sinistre, des mesures d'auto-protection cherchant à diminuer la probabilité d'occurrence d'une sécheresse. Ces différentes notions seront développées ultérieurement.

2.3.2.2. Expériences d'assurances sécheresse

Le contexte français actuel

Depuis la loi du 10 juillet 1964 instituant le régime des calamités agricoles[10], les dommages aux récoltes non assurables[11] (autres que ceux causés par la grêle ou la tempête) reconnus calamités agricoles par arrêté ministériel sont pris en charge par le Fonds National de Garantie contre les Calamités Agricoles (FNGCA). Les conditions de mise en application de cette garantie sont des dommages non assurables (inondations, ouragans, avalanches, épizooties, sécheresses), imprévisibles, d'importance exceptionnelle et dus à une action anormale des forces de la nature, et spécifiquement agricoles. Le constat de calamité agricole est défini par arrêté conjoint du ministre de l'Agriculture et du ministre de l'Economie et des Finances, pris sur proposition du préfet après consultation de la Commission nationale des calamités agricoles.

Ce fonds fonctionne comme une assurance obligatoire avec un seuil d'intervention à deux niveaux (perte par nature de la récolte, perte sur la totalité de l'exploitation) et l'application d'une franchise dégressive applicable sur le montant des dommages[12]. "En cas de calamité agricole, les dommages sont évalués, pour les récoltes ou cultures, d'après les frais nécessaires pour la remise en culture si celles-ci peuvent de nouveau être réalisées dans des conditions normales de production et de commercialisation et, dans le cas contraire, d'après la valeur marchande qu'auraient eu les produits détruits parvenus à maturité en tenant compte du nombre de récoltes qui ne pourront avoir lieu, l'expertise se faisant au niveau de l'exploitation" (Loi du 10 juillet 1964, art. 7). Le FNGCA est doté par une subvention du ministère chargé de l'agriculture et des contributions additionnelles aux primes d'assurances couvrant les biens et les véhicules des exploitants agricoles.

En février 2005, suite au rapport de Christian Ménard[13] sur la gestion des risques climatiques en agriculture, né d'une volonté politique de trouver une solution aux risques climatiques sur récolte, et reposant sur des exemples de développement du marché des risques climatiques dans d'autres pays[14] (Espagne, USA), le ministre chargé de l'Agriculture a annoncé le lancement d'une assurance multirisques climatiques pour les cultures, destinée à terme à se substituer à l'indemnisation par le FNGCA. Les contrats d'assurance dommages aux cultures proposés dans ce cadre selon deux types : l'un par culture (totalité de la sole de la culture) et l'autre par exploitation, peuvent bénéficier de subventions de l'Etat. Il s'agit des contrats qui couvrent les cultures de vente (cultures viticoles,

---

protection sont des compléments. Une augmentation de la productivité de l'auto-protection ou une réduction dans les coûts réels de l'assurance devraient accroître la demande de ces deux mesures.

10 Cette loi définit le dispositif de protection des exploitations agricoles françaises contre les risques climatiques non assurables.

11 La loi vise les dommages matériels causés aux exploitants agricoles par les calamités considérés comme "des dommages non assurables d'importance exceptionnelle dus à des variations anormales d'intensité d'un agent naturel, lorsque les moyens techniques de lutte préventive ou curative employés habituellement dans l'agriculture n'ont pu être utilisés ou se sont révélés insuffisants ou inopérants" (L. no 64-706, 10 juillet 1964, art.2, JO 12 juillet).

12 La procédure d'indemnisation est décrite comme suit. La victime doit adresser une lettre recommandée au maire de la commune, dans les dix jours qui suivent la publication de l'arrêté interministériel au Journal Officiel, et constituer un dossier dans le mois qui suit. Dans les deux mois de la réception des demandes par la direction départementale de l'Agriculture, le préfet adresse un rapport à la Commission nationale des calamités agricoles qui donne son avis sur le pourcentage d'indemnité à accorder en fonction de la nature des dégâts, de leur gravité, sans pouvoir dépasser 75% des dommages.

13 Les principales propositions du rapport Ménard sont de transférer aux assureurs la plus grande partie de la couverture des risques climatiques pour l'ensemble des productions agricoles, en remplacement du FNGCA qui devrait s'effacer progressivement ; trouver un produit d'assurance accessible à l'ensemble des exploitations françaises dans un cadre pérenne pour les agriculteurs et les assureurs ; et couvrir a minima les charges incompressibles de production de l'exploitation.

14 Les systèmes américain et espagnol reposent sur un compromis entre public et privé : les exploitants agricoles sont couverts par des systèmes d'assurance privés pour lesquels l'Etat fixe les conditions d'assurance, verse des subventions aux primes, fournit, partiellement (pour les Etats-Unis) ou en totalité (pour l'Espagne), la réassurance et couvre les frais des compagnies d'assurance (pour les Etats-Unis uniquement).

fruitières arboricoles, céréalières, oléo-protéagineuses, industrielles et maraîchères) contre les risques de grêle, gel, inondation, sécheresse et tempête. Les franchises ne doivent pas dépasser 20% du montant des dommages pour les contrats à l'exploitation et 25% pour les contrats à la culture. Les aides de l'Etat pour ces contrats sont en pourcentage des cotisations pour 2005-2006 (les taux d'aide sont de 30% et 40% pour les contrats à la culture et ceux à l'exploitation respectivement ; une bonification de 5% est accordée aux jeunes agriculteurs) puis sur la base d'un forfait par hectare plafonné en %.

Actuellement, deux compagnies d'assurance, Groupama et Pacifica, proposent des contrats d'assurance multirisques agricoles incluant le risque de sécheresse. L'assurance multirisques couvre les dommages causés à l'ensemble de l'exploitation, c'est-à-dire aux bâtiments désignés dans le contrat y compris ceux à usage d'habitation, à leur contenu (mobilier, matériel agricole…), aux marchandises, aux animaux et aux récoltes.

Les expériences étrangères

Les expériences passées de pays étrangers comme les Etats-Unis et l'Espagne prouvent les limites du système français actuel. Proposé depuis 1938, le dispositif d'assurances agricoles américain comprend aujourd'hui des assurances récoltes (rendement des cultures) et des assurances sur le chiffre d'affaires des producteurs (couple rendement et prix de vente des produits). 75% des agriculteurs américains ont actuellement recours aux assurances récoltes, couvrant près de 80% des superficies assurables[15]. Les contrats d'assurance proposés par les compagnies privées sont normalisés et leurs prix fixés selon les productions, les localisations et les niveaux de couverture[16]. L'Etat intervient aussi afin de subventionner le montant des primes d'assurances, de couvrir certains frais administratifs des compagnies d'assurance privées et de contribuer à la réassurance. Parallèlement à ce dispositif se greffent des aides exceptionnelles, votées par le Congrès, destinées à couvrir les dommages de grande ampleur ("*disaster payments*") ou compenser des pertes de revenu liées à la baisse des cours de certains marchés ("*market loss programs*"). Ces mesures exceptionnelles ont pour effet de limiter l'intérêt du système actuel d'assurance qui offre les mêmes garanties et de créer une incitation à ne pas s'assurer.

Le système d'assurance espagnol, créé en 1978, repose sur une coordination entre les Pouvoirs publics, les compagnies d'assurance et les agriculteurs. Il est fondé sur l'idée que les risques climatiques se répercutant sur l'activité agricole peuvent être assurés par l'initiative privée, avec l'aide de l'Etat, à condition d'établir préalablement la viabilité technique et actuarielle de leur couverture. Il touche les productions agricoles végétales, animales et forestières. Définis par l'Organisme d'Etat des assurances agricoles ("*Entidad Estatal de Seguros Agrarios*"), les conditions d'assurance et les tarifs, qui sont fixés en fonction des caractéristiques spécifiques de la production et des différentes zones de cultures, sont utilisés de manière générale par toutes les compagnies d'assurance qui opèrent dans le système. Les agriculteurs peuvent souscrire à ces contrats de manière individuelle ou collective. Le coût de l'assurance à payer par l'exploitant agricole est subventionné par les Pouvoirs publics ainsi que par les administrations régionales. En 2004, près de la moitié des agriculteurs avaient souscrit une assurance agricole. L'un des éléments fondamentaux du système est celui de la compensation des risques. Il est obtenu par le fonctionnement des compagnies d'assurance privées en régime de coassurance, à travers la constitution d'un pool appelé "*AGROSEGURO*" ("*Agrupacion Espanola de Entidades Aseguradoras de los Seguros Agrarios Combinados*"). Ce pool élabore les modalités du modèle unique de contrat qui sera utilisé et verse à chaque compagnie d'assurance une commission fonction du nombre de contrats qu'elle a souscrits. Il est réassuré auprès du Consortium de Compensation d'Assurances ("*Consorcio de Compensacion de Seguros*"), société étatique ayant sa propre personnalité juridique et sujette à la réglementation juridique privée.

15 Seules les productions végétales sont assurables, à l'exception des cultures fourragères.

16 Les termes de l'assurance sont basés sur les références historiques des souscripteurs concernant les rendements et les prix en plus pour les contrats sur le chiffre d'affaires. Les producteurs sont supposés mettre en œuvre de bonnes pratiques culturales sur les parcelles assurées.

2.3.2.3. Les limites des modèles d'assurance classiques

La définition des contrats d'assurance privée couvrant le risque de sécheresse soulève les difficultés suivantes.

! Les risques de sécheresse sont souvent corrélés entre les exploitants agricoles d'une même région. Ils sont caractérisés par de faibles probabilités et des dommages importants. Ils touchent un grand nombre d'exploitations agricoles en même temps qui font alors simultanément une demande d'indemnisation des dommages subis. Ainsi les primes versées ne sont pas toujours suffisantes pour couvrir les pertes réalisées, menaçant ainsi la solvabilité de la compagnie d'assurance émettrice du contrat. La nature systémique de ce risque fait que, s'il n'existe pas de réassurance ou de garantie de l'Etat, les compagnies d'assurance privées proposent alors des contrats d'assurance avec des primes très élevées. Le problème de réassurance, afin de réassurer le risque sur les marchés financiers, ou de diversification s'avère fondamental.

! Afin de définir un contrat d'assurance, la compagnie a besoin d'identifier l'exposition de l'assuré à la sécheresse et de quantifier son impact sur le revenu de l'exploitant agricole. Afin de déterminer le montant des primes, l'assureur doit être capable d'estimer la fréquence de la perte ainsi que sa sévérité. La fréquence des pertes repose sur le calcul de la distribution de probabilités des pertes éventuelles qui est réalisé à partir des données historiques sur les événements climatiques passés. De telles bases de données ne sont généralement pas disponibles. De plus, il existe actuellement une incertitude sur la probabilité d'occurrence d'une sécheresse (l'occurrence d'un sinistre est une double catastrophe pour le producteur agricole : il doit supporter le sinistre d'une part et il va réviser à la hausse la fréquence des sinistres futures d'autre part ; globalement ceci a pour effet d'accroître le risque perçu et d'augmenter la demande d'assurance).

L'estimation des pertes subies lors d'une sécheresse éventuelle est basée sur la connaissance de rendements individuels ou sur des rendements de référence. Pour les risques à faibles probabilités et aux dommages élevés que sont les sécheresses, cette tâche est relativement difficile et nécessite de hauts niveaux d'expertise dans l'ajustement des pertes. Les primes sont de ce fait aussi souvent très élevées et ne sont pas toujours pécuniairement supportables pour les exploitants agricoles.

! Il est aussi admis que, lors de l'occurrence d'une sécheresse, le gouvernement met en place un programme de soutien public et financier aux victimes de ce sinistre afin de couvrir leurs dommages subis. Le versement de telles compensations ad hoc après un désastre limite le développement des produits d'assurance privée.

! Les acheteurs potentiels de contrat d'assurance sont myopes et mal ou non informés (sur les probabilités de réalisation d'un sinistre naturel, les pertes éventuelles ainsi que sur les types de mesures de couverture) lors de leur prise de décision d'assurance ou de mesures de protection. Ces effets ont pour conséquence que les exploitants agricoles ne font rien avant l'occurrence d'une sécheresse et plaident pour l'assistance de l'Etat après un tel événement.

! Le modèle d'assurance contre le risque de sécheresse repose sur les conditions météorologiques et non sur des pertes attendues comme il est courant en économie de l'assurance. La sécheresse est un événement relativement rare en comparaison à des risques assurables classiques.

! Sont présents, comme dans les modèles d'assurance classiques, les problèmes de sélection adverse et de risque moral.

Le système privé d'assurances devrait, si le risque peut être quantifié, apporter des garanties contre les aléas naturels. De même, la concentration des compagnies de réassurance devrait aussi faciliter la couverture contre de tels risques. Or ce n'est pas le cas actuellement car d'une part, les assureurs ne sont pas prêts à proposer des contrats d'assurance privée contre le risque de sécheresse et d'autre part les récents épisodes climatiques ont pu renforcer une attitude prudente des assureurs vis-à-vis de tels risques. Cependant différents moyens existent pour les assureurs leur permettant de gérer et de diversifier leur risque :

- Réduire la concentration géographique des zones où les exploitations agricoles sont fortement exposées au risque de sécheresse ;
- Modifier les termes des contrats proposés ;
- Encourager toutes les mesures susceptibles de contribuer à la gestion des risques reposant sur une plus forte responsabilisation des acteurs, sinistrés et assureurs, dans la prévention. Citons toutes les mesures incitatives aux actions d'auto-assurance, actions d'auto-protection et actions d'épargne ;
- Souscrire une réassurance ;
- Utiliser les instruments financiers liés à l'occurrence de catastrophes naturelles : l'exemple des "Cat-bonds" aux Etats-Unis où les investisseurs achètent les titres de dette obligataire d'une compagnie et en échange celle-ci verse un rendement qui compensera l'immobilisation des fonds ainsi qu'une prime de risque correspondant au fait qu'un événement peut se produire ;
- Accroître son capital ;
- Prévoir des réserves catastrophes afin de faire face aux problèmes de liquidité lors de la survenue d'un sinistre.

2.3.2.4. Les autres mesures de couverture contre le risque de sécheresse

Parallèlement aux dispositions traditionnelles entre compagnies d'assurance et de réassurance, se développent de nouveaux produits ou d'autres instruments susceptibles de contribuer à la gestion privée des risques reposant sur une plus forte responsabilisation des acteurs, sinistrés et assureurs, dans la prévention. Citons toutes les mesures incitatives aux actions d'auto-assurance, actions d'auto-protection et actions d'épargne. Les caractéristiques du marché de l'assurance contre ce type de risque peuvent inciter les propriétaires agricoles à se protéger eux-mêmes par des actions d'auto-protection ou d'auto-assurance ou par la création d'épargne de précaution.

Les actions d'**auto-protection** peuvent se traduire en des mesures de diversification qui peuvent porter, soit sur le revenu agricole par le choix d'un panier de cultures plus ou moins risquées, soit sur les sources du revenu total de l'exploitation agricole en multipliant les sources de revenus possibles autres qu'agricoles afin de réduire la variabilité des revenus liés aux risques climatiques.

Les actions d'**auto-assurance** regroupent les activités visant à réduire les pertes en cas de sinistre moyennant un coût. Concrètement il peut s'agir de la construction de petits aménagements (retenues collinaires) afin de pallier une pénurie de la ressource en eau à des moments fondamentaux pour la croissance de la culture et ce afin de réduire les baisses de rendement occasionnées par cette limitation. De même, les exploitants agricoles peuvent se constituer une épargne de précaution afin de faire face aux pertes de revenus éventuelles dues aux événements climatiques de nature exceptionnelle.

2.3.2.5. Commentaires et esquisses de conclusions sur les assurances sécheresse

Il importe tout d'abord d'expliquer pourquoi le risque sécheresse n'est généralement pas assurable (ou alors grâce à de fortes subventions). En effet, on a d'abord affaire à un risque corrélé qui expose les assureurs à des pertes très importantes (contrairement à la grêle qui est un phénomène beaucoup plus localisé). Ensuite, la sécheresse est un phénomène lent et difficilement mesurable (contrairement à la grêle, encore une fois). Il est très difficile d'évaluer les pertes dues à la sécheresse et celles dues à une mauvaise gestion de la part de l'assuré, et les coûts d'expertise sont très élevés. Enfin, pour les cultures irriguées, le manque d'eau pour l'irrigation peut être le résultat d'une décision politique (interdiction d'irriguer), et les assureurs ne peuvent pas couvrir ces aléas.

L'approximation d'Arrow Pratt, telle qu'elle est décrite dans l'encadré 1, semble peu adaptée pour le concept de sécheresse. En effet, cette approximation est valide pour des petits risques, alors que le risque sécheresse est généralement un risque catastrophique.

L’expérience pilote de l'assurance multi risque en France est intéressante, et Groupama et/ou Pacifica assurent aussi les cultures irriguées contre le manque d'eau (dû à l'interdiction d'irriguer par exemple). Cette couverture, qui est à la limite de l'assurabilité, s'inscrit dans un contexte de très forte concurrence entre les deux assureurs.

Les auteurs sont plus réservés sur les expériences en Espagne et aux USA. Dans les deux cas, les subventions aux primes sont largement supérieures à 50%, et de tels modèles ne sont peut-être pas viables , ils créent essentiellement des rentes pour les assureurs et les grands exploitants.

Rappelons que le concept de sécheresse est d’abord complexe, il en existe plusieurs définitions (agronomique, météorologique, hydrologique). Ensuite, le concept de sécheresse est relatif. Certaines régions font face à des sécheresses toutes les 2 ou 3 années ; ce risque n'est donc pas assurable. L'idée serait d'ajuster la franchise pour ne couvrir que des événements se produisant tous les 7-10 ans.

L'assurance indicielle (telle que l'assurance climatique) offre de nouvelles opportunités. L'indemnité dépend alors d'un indice climatique (e.g., coefficient pluviométrique) et n'est donc pas exposée au risque moral. Elle est cependant exposée à un "basis risk" (risque de base), et est disponible au Canada, USA, Inde, Mexique.

Enfin, concernant les autres mesures de protection contre les risques sécheresse, il est important de préciser que l'assurance et l'auto-assurance/épargne sont complémentaires et non substituts. L'assurance ne peut couvrir que les risques extrêmes de sécheresse alors que l'auto-assurance/épargne permet de couvrir les risques fréquents mais peu intenses.

2.3.3. Adaptation collective à la sécheresse

Dans cette section, on s'intéresse à ce qui peut être fait à une échelle sociale plus globale, celle d'un territoire où d'autres usages de l'eau sont présents. Il s'agit alors de repartager l'eau, soit temporairement en cas de sécheresse exceptionnelle, soit plus définitivement en cas de pénurie prononcée. Les autres usages peuvent inclure l'approvisionnement en eau potable, ainsi que la dilution des eaux usées des villes, l'hydroélectricité, l'industrie de process, et bien sûr le premier d'entre eux, l'écosystème lui-même.

En Europe, divers pays (Pays-Bas, Allemagne, Danemark et France) ont mis au point des dispositifs permettant de compenser les agriculteurs réduisant ou supprimant leur recours aux intrants agricoles, pour pouvoir ainsi élargir les périmètres de captage de l'eau potable à l'échelle des problèmes de la pollution diffuse (et non plus seulement de la pollution accidentelle). Si l'achat aux agriculteurs d'un 'service de non-pollution de l'eau d'alimentation' est pratiqué assez couramment, en revanche nous n'avons pas connaissance de systèmes équivalents pour des transferts de volumes d'eau, à deux exceptions près. En France, l'Etat oblige EDF à lâcher de l'eau de ses barrages-réservoirs en fin d'été, principalement en Adour-Garonne, afin de soutenir les débits d'étiage mis à mal par l'irrigation dans les années de sécheresse ; et EDF obtient en contrepartie une indemnité pour perte de revenus liée à la perte de capacité de turbiner, qui est partagée entre l'Agence Adour-Garonne et les Conseils généraux concernés (ces derniers 'couvrant' les irrigants). Un projet similaire est à l'étude au sud de l'Italie, depuis que la loi autorise les régions donneuses d'eau à percevoir une redevance sur les régions acheteuses, redevance liée à la perte du potentiel de production d'hydroélectricité. Le cas précis concerne les régions Basilicate (donneuse) et Pouilles (preneuse depuis la création de l'Acquedotto Pugliese). Une loi espagnole de 1999 a ouvert la possibilité de créer des 'marchés de l'eau' entre irrigants et villes, soit en fait de transférer les droits de concession contre paiement. Mais son application rencontre une résistance certaine, notamment de la part des ingénieurs de l'eau de l'administration, dont la culture historique est de régler tous les problèmes par la réalisation de travaux hydrauliques visant à accroître l'offre en eau. Il est assez évident que la flexibilisation de l'affectation des ressources en eau rendrait ces ouvrages moins nécessaires.

Or il existe un pays où ces politiques, et les réflexions qui les ont précédées, sont conduites avec une certaine antériorité par rapport à l'Europe. Et ce pays est celui de la première agriculture du monde, les Etats-Unis, c'est pourquoi on doit d'abord informer le lecteur de ce qui se passe outre-Atlantique, et en particulier dans l'ouest américain, là où la sécheresse est devenue une affaire de pénuries d'eau à traiter de façon structurelle, mais dans un contexte où l'on souhaite que la société rurale prenne le relais des politiques administratives classiques. La Californie sera donc longuement évoquée ici. Cet Etat américain ressemble en surface, en population et en climat à l'Espagne, mais un changement de politique complet y a eu lieu depuis 20 ans ; nous devons nous documenter directement sur ces changements. Nous évoquerons également un autre pays où la politique de l'eau recourt à des outils économiques, l'Australie, dans une perspective de réinscription de la question de la sécheresse et surtout de la pénurie d'eau, dans une problématique plus générale d'aménagement du territoire, et de *landscape stewardship*.

Nous allons utiliser le travail très complet de James Salzman (2005)[17], qui traite de nombreux cas où les propriétaires ruraux sont invités à 'rendre des services écologiques' à la société, contre indemnisation ; après avoir présenté la problématique et l'avoir illustrée par des études de cas aux Etats-Unis, au Costa Rica et en Australie, il discute des problèmes divers, et notamment éthiques, que posent ces pratiques. Puis nous compléterons cette présentation par celle des échanges d'eau entre catégories d'usagers en Californie, cet Etat américain qui fait face à une réduction de ses droits sur l'eau alors que sa population continue à croître, le tout sous un climat méditerranéen à aride.

17 James Salzman, 'Creating Markets for Ecosystem Services : Notes from the Field', publié dans la *New York University Law Review*, vol. 80, 2005, pp 870-962.

2.3.3.1. Problématique américaine des marchés pour services écosystémiques

L'article de J. Salzman (2005) est particulièrement intéressant pour notre propos relatif à la flexibilisation de l'affectation des ressources en eau, parce qu'il aborde ce sujet assez complètement, dans une problématique classique aux Etats-Unis appelée *Law & Economics*, et sans oublier de rapporter des éléments de discussion des avantages et des inconvénients des approches étudiées, et des points de vue de leurs partisans et adversaires. Bien que le droit américain de l'environnement et des ressources naturelles soit bien différent du nôtre, le texte est utile dans la mesure où précisément, c'est la difficulté à régler les problèmes par la voie du droit qui a conduit à tenter la voie économique. Notons à ce stade que le terme de marché pour des services environnementaux renvoie à une littérature abondante aux Etats-Unis, et désigne une variété d'arrangements contractuels que la tradition française ne range certainement pas tous sous le terme général de marché. Voir à ce propos Montginoul et Strosser (2001)[18] et la réponse de B. Barraqué (2002), où l'on voit que les économistes de la Banque Mondiale autour de Ariel Dinar parlent de "marchés informels" pour qualifier des arrangements de flexibilisation de la répartition des ressources en eau dans des sociétés organisées en communautés locales dans des pays pré-capitalistes, ce qui est un abus de langage.

On s'intéresse ici à la contractualisation pour la protection de la nature en tant qu'elle fournit des services, les prestataires étant en fait souvent des agriculteurs ou des forestiers, et les contrats comprenant un volet financier. On leur demande de maintenir une partie de leurs terres en état naturel, pour conserver des écosystèmes en bonne santé, capables de traiter naturellement certaines pollutions, d'accroître la résilience vis-à-vis des sécheresses et des inondations, ou de défendre la biodiversité (le rôle des zones humides et des forêts tropicales est explicitement évoqué).

La protection de la nature en général n'avait pas fait l'objet d'approches juridiques ou économiques particulières ; or depuis quelques années (9 ans dit l'auteur) cette idée s'est développée et s'est institutionnalisée, au moins dans les trois pays où il puise ses principales études de cas : aux Etats-Unis, l'EPA[19] a créé en 2003 un Comité consultatif scientifique sur la valorisation de la protection des écosystèmes et de leurs services ; l'Australie s'est dotée d'un comité similaire de haut niveau appelé le Wentworth Group ; au Costa Rica, le gouvernement a adopté un dispositif national de paiement contre services écologiques. Et au niveau international, on a le cas des instruments économiques pour la séquestration du carbone. L'article fait le point à la fois sur ces expériences, et sur la littérature scientifique qu'elles ont suscitée dans diverses disciplines liées à l'action publique.

2.3.3.2. Les principes

Il convient tout d'abord de replacer les marchés pour ces services dans l'éventail des outils disponibles pour protéger la nature, afin d'en évaluer les intérêts et les limitations *a priori*. On part du principe qu'une intervention publique est nécessaire, car on se trouve en situation fréquente de manque de connaissance, et de dysfonctionnement des marchés (*market failure*). L'auteur distingue 5 catégories d'outils, appelées les "5 P" :

- **la prescription** : si la réglementation et le *command-and-control*, outils les plus connus, ont été utilisés avec succès pour réduire la pollution ponctuelle industrielle, il n'en a pas été de même pour la pollution diffuse.
- **la pénalité** : il ne s'agit plus d'interdire ou de réglementer les activités, mais de les soumettre à des redevances. Nous connaissons cette approche en France.

---

18 Strosser Pierre, Montginoul Marielle (2001), "Vers des marchés de l'eau en France ? Quelques éléments de réflexion", in *Annales des Mines, série Responsabilité et Environnement*, n°23, Juillet. Et ma réponse : B. Barraqué (2002), "Les marchés de l'eau en Californie, modèle pour le monde ou spécificité de l'Ouest aride américain ? Première partie: la crise du partage du Colorado", in *Responsabilité et Environnement*, n°28, Octobre

19 Environmental Protection Agency, ministère de l'Environnement américain.

- **la persuasion** : on donne une information aux propriétaires fonciers ou aux exploitants à propos des effets de leurs pratiques sur le paysage[20], et des pratiques alternatives ; on vise ainsi une auto-régulation.
- **la propriété** : on répartit la ressource et on la privatise, et on encourage ensuite la vente des droits de propriété ; l'auteur indique que le plus souvent cet outil n'est pas utilisé seul et qu'une réglementation doit d'abord créer la rareté.
- **et le paiement** : il s'agit de subventionner, directement ou par des dégrèvements fiscaux, des pratiques bénéfiques pour la société mais qui ne sont pas intégrées au marché. C'est une approche critiquée pour son impact sur les finances publiques, mais *a contrario* appréciée par les propriétaires ruraux (*landholders*). Le caractère grossier de bien des expériences (du genre 'la même taille pour tous') a conduit à les mettre en doute, mais certaines tentatives plus récentes ont en partie répondu à cet argument d'inefficacité, en introduisant de fait une compétition entre les partenaires potentiels.

2.3.3.3. Trois études de cas

La seconde partie du texte est consacrée à la présentation de trois études de cas différenciées : le cas de l'eau potable des *Catskill reservoirs* (New York), celui du programme *Bush Tender* en Australie, et les *Pagos por Servicios Ambientales* du Costa Rica.

Dans le cas de New York, la ville s'est retrouvée forcée par l'administration régionale de l'U.S. EPA à filtrer son eau, qui provenait à 90% d'une zone peu densément peuplée située à 200 km au nord ouest, où elle avait pourtant déjà acquis pas mal de terrains. Le coût de l'usine de filtration se situait entre 6 et 8 milliards de $. La ville a pu se dégager de cette obligation en lançant un programme de reconquête de la qualité de l'eau brute, basé sur des acquisitions et sur d'autres mesures, pour seulement 1,5 milliards de $. Et dès 1996, EPA avait identifié 140 autres municipalités qui utilisaient la protection des milieux aquatiques comme moyen d'améliorer la qualité de l'eau destinée à l'alimentation humaine. Mais si le cas de New York est très connu, c'est qu'il a eu lieu dans un contexte politique agité : pression forte de l'administration fédérale de l'environnement en termes de risques sanitaires, et en face, opposition politique locale forte à l'idée que 'les riches des villes' allaient réglementer les pratiques agricoles à 200 km sans consultation préalable. Il a fallu 2 ans et 150 réunions pour arriver à un compromis signé avec 60 villes, 10 villages, 7 comtés et divers groupes de défense de l'environnement. Une Corporation du Bassin des Catskills, à but non lucratif, a été créée pour gérer l'affaire.

En réalité, l'essentiel des investissements est allé à des projets de réseaux d'égouts et de stations d'épuration dans la région visée, ainsi qu'à des projets de développement local ; l'acquisition de terrains et de servitudes n'a représenté que 250 million de $, et des 'programmes en partenariat' ont représenté 270 millions[21]. Avec les agriculteurs, les résultats ont été plus limités, puisque seulement 160 ha ont fait l'objet d'une plantation d'espèces indigènes au bord des cours d'eau, alors que la ville offrait 250 $/ha par an pour un contrat de 15 ans. C'était semble-t-il moins que ne rapporte le maïs. Peu de terrains ont été acquis, car l'annonce d'un important programme d'acquisition lors de la signature du contrat a fait monter les prix… Mais les fermiers ont su tirer parti des services de conseil gratuits pour les bonnes pratiques agricoles ; et en définitive, l'objectif a été atteint, puisque EPA a accordé 5 ans de grâce (jusqu'en 2007) à New York avant de décider ou non d'imposer la filtration.

En Australie, le programme BushTender a été lancé par l'administration des ressources naturelles et de l'environnement de l'Etat de Victoria (NRE), dans le but de protéger les restes de la végétation d'origine dans les propriétés privées. En échange de financements de l'Etat, les propriétaires s'engagent à clôturer et à gérer une quantité donnée de la végétation d'origine pour une période

20 Le terme de paysage utilisé ici renvoie au *Landscape* anglo-saxon, qui comporte une dimension plus écosystémique et scientifique que dans son sens courant en français.
21 Notons ici que c'est également ce qui s'est passé pour la ville de Paris avec les collectivités des zones où elle prend son eau.

donnée. Le modèle en a été fourni par le CRP des Etats-Unis (*Conservation Reserve Program*), qui constitue l'un des systèmes de paiement pour services les plus importants du monde : créé dans les années 1980 pour réduire l'érosion et aider des agriculteurs à l'occasion d'une crise des produits, il conduit à dépenser en 2004 1,6 milliards de $ pour des actions couvrant 13,6 millions d'ha. On estime que sur ces terrains (soumis à des contrats de 10 à 15 ans), la réduction de perte de sols superficiels est de 21% et que le lessivage des nitrates et des pesticides a également diminué. Mais le CRP a aussi ses détracteurs, qui relèvent 4 points : on risque de déplacer le problème (des fermiers labourent de nouvelles terres à la place) ; on a été laxiste dans le choix des terrains à protéger, et on a des contrats qui n'apportent pas grand'chose ; et puis le programme envoie 'le mauvais message', dans la mesure où les fermiers qui protégeaient déjà leurs terrains de l'érosion ont subi des moins-values, et maintenant ils ne sont pas éligibles au CRP ; enfin, on soupçonne les paysans de collusion dans les procédures d'appel d'offres, si bien que leurs offres sont toutes juste en dessous du prix plafond proposé par l'administration mais au dessus des niveaux de prix pour la location sur les marchés locaux…

Le BushTender fait mieux que le CRP en s'appuyant sur une méthodologie robuste d'évaluation, et sur une approche d'enchères inversées pour fixer le prix dans les contrats. C'est-à-dire qu'on a d'abord rendu public le projet de payer pour conserver la végétation native, et demandé aux fermiers intéressés de contacter le NRE. On a alors envoyé aux candidats des agents d'inspection, qui ont évalué la diversité et la valeur biologique des terrains, et la valeur des projets proposés par les fermiers, avec deux indicateurs de synthèse. Seul le second indicateur, celui sur les services proposés, était communiqué aux fermiers, pas le premier sur la diversité réelle. Les propriétaires pouvaient alors soumettre des offres, comprenant un plan de gestion de la végétation native conservée et un prix annuel. Alors, le NRE a pu confronter les offres des divers propriétaires à l'indice tenu secret de biodiversité de leurs terrains, et choisir les meilleurs rapports qualité prix. Dans la mesure où le programme a attiré plus d'offres qu'il n'y avait d'argent, le NRE a pu être sélectif et protéger des zones de très grande valeur pour un prix inférieur à ce qu'ils étaient prêts à payer au départ. Et le programme est poursuivi par un BushTender II, et a été adopté par un autre état australien.

Le cas des *Pagos por Servicios Ambientales* (PSA) du Costa Rica est présenté pour montrer que l'approche ne concerne pas que les pays riches. Certes le Costa Rica a l'image du pays le plus avancé sur le plan de l'environnement de l'Amérique centrale, et il offre des réductions de taxes aux compagnies d'exploitation forestière pour les surfaces protégées depuis les années 1970. En 1997 cependant un programme national de paiements pour services a été lancé, qui autorise l'administration à agir comme courtier entre les offreurs et les acheteurs, dans quatre types de services : séquestration du carbone, eau en quantité et/ou en qualité, biodiversité, et qualité du paysage pour l'écotourisme. Une institution spéciale a été créée qui travaille avec les forestiers professionnels, les ONG, les services de protection de la nature et les propriétaires, pour établir des contrats sur des durées de 5 ans, et jusqu'à 20 ans, qui sont inscrits aux hypothèques et donc seront suivis même en cas de vente de la propriété. Grâce à un prêt de la Banque Mondiale de 32 millions de $, et une subvention de 8 millions de la Facilité pour l'Environnement Mondial, on a pu protéger 200.000 ha contre des paiements au nom de la biodiversité ; en revanche, les services pour l'eau ont attiré bien moins de contrats, et ne concernent que 2.400 ha, essentiellement de la part de compagnies hydroélectriques soucieuses de la sédimentation des réservoirs provoquée par l'exploitation forestière. C'est d'ailleurs un problème sérieux du fait des pluies tropicales tombant sur des sols fragiles et érodables dès que le couvert végétal est retiré.

2.3.3.4. Les enjeux du choix des instruments

A partir des principes et des études de cas, J. Salzman revient sur la problématique commune du choix des outils appropriés selon les situations : quel que soit l'outil préféré parmi les 5 P, il faut déterminer quels services doivent être fournis, comment ils doivent l'être, qui doit les fournir et jusqu'à quel niveau.

Quel service : dans les cas étudiés, on a eu tour à tour la prévention de la pollution de l'eau à potabiliser, la biodiversité, l'érosion, et la sédimentation des barrages.

Comment : c'est une affaire purement technique, qui exige une élaboration de connaissances particulières notamment en science du paysage. L'auteur donne l'exemple d'un projet pilote visant à combattre la remontée d'une eau souterraine naturellement salée en Australie, où une administration d'Etat a passé contrat avec MRFF, une association d'agriculteurs, pour leur faire planter une centaine d'ha de forêt originelle en amont du bassin, afin d'accroître l'évapotranspiration et donc d'éviter la mise en contact de l'eau d'irrigation et de la nappe en aval. Mais il a évidemment été difficile de vérifier sur le terrain en quoi les plantations réduisaient la salinisation en aval et de combien, et les organisateurs vont préférer attendre d'en savoir plus avant d'étendre la mesure.

Qui fournit le service : il s'agit en effet de bien identifier la cible, pour éviter de devoir faire face à des coûts de transaction élevés. Les marchés de services, dit l'auteur, se développent en particulier en situation de monopsone (un seul acheteur, plusieurs vendeurs) mais avec malgré tout un nombre limité de fournisseurs : la protection de la biodiversité dans un paysage, ce n'est pas comme une assurance médicale contre les risques dus à la biodiversité, où l'intérêt est de faire adhérer le plus grand nombre. Mais il faut insister sur le caractère monopsonique de la plupart des situations étudiées, que ce soit par le biais d'une administration agissant au nom des citoyens, ou parce qu'il existe un acheteur de services puissant comme les compagnies d'électricité au Costa Rica, ou comme dans le cas de Vittel évoqué à cet endroit[22], et qui correspond tout à fait à la problématique des marchés de services.

Combien : un des problèmes fréquemment rencontrés est que, faute d'une évaluation simple et robuste des bénéfices apportés par les services proposés par divers acteurs au sein d'un territoire, on va leur en donner une compensation générale, qui reviendra à apporter une subvention sans distinction, comme c'est le cas au Costa Rica avec l'argent de la Banque Mondiale. Réciproquement, l'emploi des fonds publics sera sous-optimisé, et le projet perdra en crédibilité aux yeux du public. La véritable clé du succès du projet australien NRE n'est pas le système d'enchères inversées, mais bien la méthode simple de calcul de la valeur de la biodiversité à protéger, alors qu'inversement le projet de lutte contre la salinisation de la nappe du cas MRFF, malgré des avantages importants en termes de relations publiques et de participation, n'a pas permis de dire si on obtenait de la valeur pour l'argent investi. Il en résulte que tous les services écosystémiques ne peuvent pas faire l'objet de marchés aussi intéressants. En revanche, une monétarisation totale n'est pas nécessaire en pratique ; si les calculs de la valeur totale des services rendus par la nature, comme dans l'article de Costanza et al.[23], ont un intérêt théorique par rapport aux théories du 'coût complet', en pratique il suffit souvent de pouvoir comparer le coût des paiements pour services écosystémiques à celui d'une solution technologique.

L'auteur conclut cette partie par une réflexion sur l'effectivité de la fourniture du service, et il donne l'exemple de la banque de compensation pour destruction de zones humides. Depuis la campagne électorale de 1988, la politique nationale américaine est de ne plus accepter de perte nette de ces zones. Mais une possibilité de remblaiement existe avec le système dit des permis 404 administré par le Corps of Engineers : le promoteur doit démontrer qu'il n'a pas d'alternatives, minimiser l'impact de son projet sur la zone humide, et de surcroît il doit restaurer une surface équivalente de marais pour compenser la perte induite par son projet. Au début, le Corps exigeait une compensation sur place et de même nature que ce que l'espace perdu comprenait, mais au fil du temps le Corps et EPA ont accepté que cela puisse se faire à distance, et un système de crédits et une banque des zones humides se sont mises en place. Mais en définitive, alors que ce *banking* concernait entre 370 et 400 opérations en 2000, une évaluation de l'Académie des Sciences Nationale a estimé que le système ne marchait pas bien, parce que les zones humides de remplacement ne valaient pas celles perdues ; la seule surface ne pouvait pas constituer un bon indicateur. En définitive la question est de savoir quel est le bon indicateur et si le fournisseur du service a intérêt à fournir un service de bonne qualité ou pas.

22 Ceci étant dit, il semble avoir très peu d'informations sur ce qui se passe en Europe, et ne connaît ce cas français dit de 'Perrier-Vittel' que par le biais d'une présentation faite par mes amis et collègues allemands d'Ecologic à un colloque sur la gestion durable en montagne tenu… au Kirghizstan.

23 Costanza, R. & al. 'The value of the world's ecosystems services and natural capital', 387 *Nature* 253, 1997.

2.3.3.5. Application à un nouveau cas australien

Dans la section suivante, J. Salzman montre comment on a essayé de tenir compte de tous ces problèmes dans un cas australien auquel il a participé, à Robertson dans le territoire de *Sydney Catchment Authority* (SCA, bassin d'alimentation en eau de Sydney). Fallait-il adopter le paiement pour services écosystémiques, ou bien un autre des 5 P ? Et notamment, réglementer, ou encore acheter ? Il cite son collègue John D. Etcheverria : "Le choix entre réglementation et acquisition représente une des questions les plus fondamentales de la stratégie juridique américaine. Mais cette question a reçu extrêmement peu d'attention, en théorie comme en pratique. Les participants au débat scientifique sont fréquemment rangés dans l'un ou l'autre camp, mais leur attention s'est très peu concentrée sur le pourquoi de la préférence d'une des deux options sur l'autre […] les 'dealers de terrains' et les 'faucons de la réglementation' poursuivent leurs agendas séparément et communiquent rarement sur l'interaction qui pourrait se produire entre les deux"[24].

L'institution de bassin SCA a été créée en 1998 à la suite de la découverte de cryptosporidium dans l'eau potable de Sydney. Une commission d'enquête a jugé que c'était la gestion du bassin versant dans son ensemble qui était inadéquate. Créé par le parlement de l'état, le SCA avait pour fonction explicite de faire en sorte que le paysage du bassin d'alimentation de captage fournisse le service de la purification de l'eau. Le pouvoir du SCA était considérable en ce qui concerne les nouvelles utilisations des sols, avec contrôle des permis donnés dans 16 collectivités locales concernées par le bassin. En revanche, le SCA avait bien moins d'autorité sur les usages des sols existants, et ne pouvait guère faire autre chose que d'identifier les pratiques compromettant la qualité de l'eau. Or le SCA s'intéressait à la commune de Robertson, d'où semblait venir une pollution organique issue d'élevages laitiers qui transitait par un cours d'eau pour provoquer une eutrophisation d'un réservoir naturel d'eau utilisé par la ville. La mise en place de haies sur les berges (*riparian fencing*) pourrait réduire le ruissellement des nitrates et des phosphates et aussi l'érosion responsable d'une turbidité de l'eau en aval. Mais pour l'obtenir, quel pouvait être le meilleur instrument ? L'auteur a choisi d'appliquer plusieurs cadres d'analyse différenciés pour démontrer que l'option des paiements pour services paysagers était la meilleure.

D'abord on partait d'une situation où il était difficile voire impossible de réglementer ou d'imposer des pénalités ; selon une perspective de '**négociation Coaséenne**'[25], une initiative de persuasion des fermiers conduirait de toutes façons à leur offrir une compensation, et donc la politique des paiements pour services fut adoptée.

Mais que se passerait-il dans le cas où le SCA aurait le droit de réglementer ou de taxer les usages des sols ? On tombe sur la question de **l'asymétrie d'information**. L'auteur indique ici qu'on considère à tort cette asymétrie comme ayant seulement des conséquences négatives, comme dans le cas où des propriétaires de terrains riches en espèces protégées ont intérêt à les faire disparaître avant que l'administration ne les découvre ('tue, enterre et tais-toi'). Pourtant cette asymétrie est un problème surtout quand l'administration veut imposer sa politique sans discussion, au lieu de laisser les partenaires décider quels changements d'usages des sols sont les moins coûteux pour eux. Une approche de paiements pour services a davantage de chances d'aboutir à un échange d'information entre le régulateur et le régulé, comme c'est le cas très généralement pour toute transaction de marché. Le cas de BushTender montre même que l'administration peut déplacer le poids de la fourniture de l'information sur les propriétaires des terrains. Plus généralement, dans une société libérale, la

24 Echeverria J. D. *Buying vs regulating to achieve conservation purposes*, manuscript non encore publié. NdT: je me permets de reproduire cette citation, dans la mesure où j'ai aussi essayé de démontrer que l'incitation économique et la réglementation n'étaient pas des outils opposés, comme le fantasment certains économistes, mais au contraire les deux bras d'une même politique. Si aujourd'hui on se complait à critiquer l'inefficacité des Agences de l'eau, c'est avant tout parce que les jacobins qui les attaquent ne sont pas capables de faire en sorte que la réglementation et la police de l'eau soient appliquées. Sans quoi les redevances et leurs aides trouveraient bien plus de clients…

25 Ronald Coase a eu le prix Nobel d'économie pour avoir démontré que lorsqu'une ressource naturelle est partagée par deux utilisateurs, quels que soient les droits initiaux de chacun sur la ressource, s'ils se rencontrent et négocient, le partage effectif sera proportionnel à la valeur de la ressource dans l'activité de chacun.

monétarisation des enjeux génère d'abord des moyens financiers nouveaux qui permettent de bien mieux mesurer les phénomènes. Ceci avantage aussi bien les systèmes de redevance que ceux d'aides[26].

Ceci étant dit, on peut identifier 4 types de paiements, qui ont des coûts différents en termes d'information. Le plus simple est de fixer une *subvention générale et uniforme*, ce qui coûte le moins cher à organiser, mais qui en revanche ne permet pas de distinguer les receveurs qui peuvent fournir les services les plus intéressants pour ce prix. Pour résoudre ce problème, on peut alors recourir à la *négociation directe* avec les fermiers pour trouver un compromis adapté à chaque cas. Mais cette approche est forcément coûteuse en temps passé, et elle ne permet pas de mettre les agriculteurs en concurrence entre eux, tout en ne facilitant pas une approche coordonnée et intégrée. Ce problème peut être résolu à son tour en organisant des *enchères inversées*, comme dans le cas de BushTender, où une dynamique compétitive s'est développée entre les fermiers. Salzman estime que cette approche est particulièrement adaptée aux situations de monopsone (un seul acheteur) sauf si de leur côté les vendeurs sont peu nombreux et peuvent faire acte de collusion entre eux. Enfin, comme pour les Catskills et New York, on peut *payer une tierce partie* représentative des producteurs de services, c'est-à-dire soit une collectivité locale, soit une ONG, ou encore une institution créée à cet effet. Cette approche peut aider à créer un climat de confiance, mais elle ne résout pas la question du montant à payer pour chaque action spécifique.

Si on se tourne maintenant vers une **analyse en termes d'efficacité**, rien ne dit que la réduction des coûts de transaction liée aux paiements pour services en fait l'instrument optimal. En fait, si ces coûts d'information sont faibles, les gains obtenus par l'auto-désignation des producteurs le sont souvent aussi, et les problèmes moraux potentiels qu'ils soulèvent (cf. infra) pourraient bien favoriser la réglementation et les taxations. Cependant, plus les coûts d'obtention de l'information sont élevés, et plus le paiement devient avantageux. Mais ce n'est pas tout.

Dans le cas étudié en détail, le but de SCA est simple : réduire le ruissellement de nutriments des terrains situés en amont vers le réservoir, au moindre coût social. Il a affaire à un groupe diversifié d'agriculteurs et de propriétaires, dont certains refuseront de faire le moindre effort sauf s'ils y sont forcés, et dont d'autres, à l'autre bout de l'éventail, se conduisent déjà d'une manière respectueuse vis-à-vis de l'environnement sans besoin d'une intervention publique. La plupart se trouvent entre les deux, et sont prêts à changer de pratiques, mais se font du souci quant aux coûts induits. On pourrait donc penser qu'il faut changer le comportement du groupe des fermiers du milieu, les plus nombreux. Mais ce n'est pas ça qui est efficace, car cela ne tient pas compte du fait que les potentialités de fourniture des services ne sont pas homogènes entre les terrains, donc entre les offreurs. Ainsi, il ne s'agit pas forcément de changer l'attitude de la plupart des fermiers, mais, comme souvent dans le commerce, d'obtenir une résolution d'un problème de 20/80 (20% des offreurs portent 80% de l'affaire). Le problème est que probablement, les 20% qui sont responsables de 80% des ruissellements nocifs seront les moins sensibilisés à la maîtrise de leurs terrains. Et dans ce cas, la réglementation sera inefficace, parce qu'elle ne peut pas discriminer les 20% les plus intéressants, ou bien alors il faudrait qu'elle soit très précise[27]. De même, pour un système de taxation, il faut disposer d'une information finalement souvent plus coûteuse à obtenir qu'elle ne peut rapporter (à cause de l'asymétrie d'information). D'où l'idée de déplacer sur les producteurs de services le coût de l'information à obtenir, d'autant que le fait de recevoir de l'argent plutôt que des menaces peut engendrer davantage de comportements vertueux. L'auteur remarque que cette conclusion contrevient à la sagesse traditionnelle des économistes, qui tendent à considérer les redevances et les aides financières comme équivalentes du point de vue du coût social net. En pratique ce n'est pas le cas.

26 Et, en France, la première réussite des redevances aura été de donner les moyens de connaître l'étendue de la pollution des diverses sources, du moins en ce qui concerne la pollution ponctuelle.

27 Du genre : là où le ruissellement dépasse 110 kg/ha et où le temps de concentration pour atteindre le réservoir est inférieur à 6 h ; ou encore (NdT), comme dans le PMPOA en France où on ne réglemente et n'aide que les plus gros élevages, ce qui crée un sentiment d'injustice, d'autant que ce n'est pas un critère suffisant.

Puis, l'auteur applique une **analyse politique** au cas où les droits des acteurs en jeu sont soit non spécifiés, soir conflictuels. Il se pourrait par exemple que l'administration ait le droit de réduire le ruissellement de fertilisants organiques des élevages, mais qu'elle n'ait jamais exercé ce droit, et que les éleveurs aient donc pris l'habitude de laisser divaguer leurs animaux sur les berges des cours d'eau. Pourquoi l'administration va-t-elle payer plutôt que de réglementer ou de taxer ? On peut raisonner par référence à ce qui se passe dans la négociation planétaire du changement climatique, où il n'existe aucune autorité supérieure mondiale, ce qui conduit à n'adopter de décisions que par 'assentiment volontaire' et quasi-unanimité. Il en résulte qu'on ne peut pas appliquer le principe pollueur-payeur, mais plutôt le principe bénéficiaire-payeur. Le pollueur-payeur nécessite en effet une autorité capable de contraindre les pollueurs, sinon ceux-ci s'en iraient dès qu'on les mettrait en cause. Salzman estime que vis-à-vis de la pollution diffuse due à l'agriculture, on est plus proche d'une situation d'assentiment volontaire que d'imposition arbitraire, pour des raisons politiques historiques et aussi pour des raisons de coût de mise en œuvre. Il rappelle d'ailleurs que dans le cas des Catskills, le maire de New York avait commencé à imposer une réglementation sans contrepartie aux propriétaires fonciers, mais que l'opposition locale avait été telle qu'il avait fallu plutôt offrir des paiements. La même chose s'est passée à Vittel.

Enfin, si on prend la question en termes de droits **de propriété et d'usage**, il faut régler le conflit entre souveraineté de la propriété et servitude de bon usage (en anglais *duty of care*). Pourquoi les éleveurs seraient-ils rémunérés pour réduire leur charge polluante, si, au nom de ce *duty of care*, ils n'ont pas le droit de laisser la bouse de vache et les sols s'écouler dans les rivières ? Pour R. Coase, ceci n'est pas un problème de pollution, mais de coût : il ne s'agit pas simplement d'internaliser les coûts externes ou de stopper la pollution, mais plutôt de minimiser le coût social total. Et si les coûts d'information sont élevés et que les offres potentielles d'amélioration sont hétérogènes, les paiements seront avantageux par la réduction de ces coûts de transaction. De plus, il semble nécessaire de s'éloigner d'une conception morale de la question : certains pensent que l'éleveur fait le bien quand il réduit sa pollution, et d'autres au contraire estiment qu'il ne fait que réduire le mal qu'il faisait. Tout dépend alors de ce qui est considéré comme normal dans la conscience collective locale. Si pendant des décennies on a considéré comme normal de laisser les animaux divaguer dans les cours d'eau, parce qu'on ne s'intéressait pas à la qualité de l'eau, ce sera évidemment à l'unité de gestion de l'eau potable d'indemniser le changement de pratiques jusqu'à ce qu'une nouvelle norme morale prévale.

2.3.3.6. Critiques contre ces compensations et leurs conséquences gênantes

L'un des intérêts de l'article est qu'il n'esquive pas la question de la légitimité des paiements, et que *a contrario* il présente les diverses critiques qui y ont été adressées. La question essentielle pour Salzman n'est pas tant la prévention de beaucoup d'économistes contre toute forme d'aide[28], que de savoir s'il faut encourager le changement des utilisations du sol par des compensations plutôt que par la coercition, et ce que cela signifie pour notre représentation de ce que sont les droits et les devoirs de la propriété. En fait cette question est discutée depuis fort longtemps aux Etats-Unis, et l'auteur renvoie à un article pionnier de Ellickson[29] qui date de plus de 30 ans.

La première critique est qu'on met en œuvre un **principe pollué payeur**. Avec les paiements, on en vient à privilégier l'aide à ceux qui sont les plus polluants, au lieu de les contraindre ou de les taxer. Pourquoi aussi bien ne pas payer les gens pour qu'ils ne volent pas leurs concitoyens ? Mais c'est un exemple absurde, car la société ne nous donne aucun droit en cette matière, alors que dans le cas de la pollution diffuse il n'y a pas eu de contraintes clairement exprimées dans un passé récent. Passant en revue à nouveau les différents cas abordés (zones humides, protection de la ressource en eau, biodiversité), il montre que les paiements sont adaptés à des situations particulières et bien identifiées,

28 "Il y a après tout bien des raisons pour lesquelles tout ce qui est paiement et subventions est un mot à cinq lettres pour bien des économistes", écrit-il.
29 Robert C. Ellickson, *Alternative to Zoning : Covenants, Nuisance rules, and fines as land use controls*, 40 Univ. Chicago Law Review, 681, 1973.

et moins à des programmes généraux comme le CRP américain. "L'administration ne pourrait pratiquement pas fonctionner s'il fallait indemniser toutes les réductions de valeur des propriétés dues à des réglementations" a écrit le juge Holmes.

La deuxième critique porte sur les **tares des subventions**, qu'on peut détailler en trois points : les paiements sont inefficaces à cause de la spéculation et des 'passagers clandestins' ; ils donnent lieu à la constitution de rentes et au détournement de l'argent public par rapport à des causes socialement plus valables ; ils entraînent des risques moraux qui poussent à des comportements indésirables. D'abord, lorsque la qualité d'une zone de protection dépend de parcelles contiguës, un propriétaire sachant que sans sa parcelle la protection est compromise, peut essayer d'extorquer plus d'argent que la valeur de la biodiversité sur le marché (*holdout & free riding*). On connaît aussi le cas inverse des agriculteurs bio dont les parcelles sont en fait protégées pas les traitements de leurs voisins. Salzman montre que cette possibilité de spéculation est plus grande pour les politiques de biodiversité que pour la protection de l'eau, dans la mesure où pour le deuxième cas, le payeur a moins besoin de la solidarité des producteurs de services que dans le premier. Ensuite, on ne peut éviter que la politique se mêle à la mise en œuvre de programmes de servitudes compensées, et que l'on *crée ainsi sans le vouloir des rentes* difficiles à réduire[30]. Le CRP devait ainsi n'être qu'un programme provisoire de protection des terres érodables, et il est devenu une subvention annuelle stable d'1,6 milliards de $ à l'agriculture… Et puis, payer les fermiers pollueurs alors que ceux qui ont fait des efforts sans qu'on les y pousse ne seront pas aidés, crée un *risque moral* qui risque d'envoyer un mauvais message à la société. "Une critique courante des économistes envers les subventions est qu'elles peuvent bêtement récompenser ces attitudes mêmes qu'elles veulent supprimer". On en arrive à parler d'un *risque éthique*. Alors que les pères fondateurs du mouvement de l'environnement, comme Aldo Leopold, pensaient que la seule façon d'arriver à une utilisation durable des ressources était de développer une nouvelle norme intérieure, une éthique foncière, l'administration peut saper cette éthique en contribuant à marchandiser la bonne gestion de l'environnement par ses paiements.

Cependant, face à ces critiques, on peut répondre qu'il n'est pas facile de comprendre comment le changement de normes influence les attitudes, et d'ailleurs, tous les outils peuvent être remis en question sur ce point du changement des valeurs : par exemple la réglementation ou les pénalités suscitent une résistance des propriétaires. L'expropriation publique ne pourrait couvrir qu'une part de ce qui serait nécessaire, et donc il faudrait bien des mesures incitatives.

Ceci conduit l'auteur à proposer une **utilisation combinée des outils**, les paiements étant utilisés *de façon transitoire*, le temps de faire accepter les nouvelles normes. Dans l'exemple des bandes enherbées, on pourrait payer 100 $/km de rive la première année, puis 90 la deuxième, etc. ; et au bout de 10 ans, on interdirait de ne pas en avoir ou on taxerait les récalcitrants. Il paraît que la ville de Malmö a utilisé cette approche pour obtenir la modernisation des fosses septiques de son territoire. Ceci permet de corréler les compensations à la transition vers le nouveau code de pratiques. Mais une question clé se pose alors : l'institution responsable a-t-elle l'autorité formelle, la légitimité politique, et la volonté politique d'élever le niveau des normes à respecter dans un délai fixé ?[31] Pour Salzman, il est clair que l'histoire des tentatives de réglementation de la pollution diffuse due à l'agriculture n'incite pas à l'optimisme… Pourtant, tout dépend de la conscience collective : le droit de propriété et d'usage des ressources est-il privé ou plutôt public ? Cela renvoie aux questions morales soulevées plus haut : est-ce le rejet polluant qui est un mal, ou l'effort de le réduire qui est un bienfait ? C'est un jugement de valeur, note-t-il, mais il remarque que les économistes sont souvent peu ennuyés par les paiements, contrairement aux écologistes, qui sont parfois horriblement choqués… En définitive, l'idée de compensations provisoires permet avant tout de mieux cerner quels sont les droits clairement légitimes des propriétaires privés, et quels sont ceux qui devraient passer dans le domaine public. L'auteur mentionne le passage en Europe des politiques *command-and-control* aux politiques

30 les Français pourraient ici penser à des programmes comme le PMPOA, qu'on est obligé d'étendre au-delà de ce qui était prévu, alors que sa performance est notoirement discutable.

31 NdT : c'est exactement le problème qui se pose en France, d'autant plus que les agences de l'eau n'ont pas de pouvoir de police. Plus celui-ci est faible et plus le système de redevances glisse vers des formes de subventions des plus vertueux vers les retardataires.

command-and-covenant, dans lesquelles l'administration fixe une norme à respecter, mais laisse la possibilité aux assujettis de négocier entre eux une certaine flexibilisation de l'application du moment que le résultat final est atteint.

Enfin J. Salzman passe en revue les discussions à propos de cette **dynamique entre paiements et prescription**. D'abord, pour les politiciens, les paiements constituent une ponction dans un budget qui doit faire face à de très nombreuses demandes légitimes, et de ce point de vue, ils doivent préférer la réglementation ou les taxations. Une opposition vient également de la crainte que les paiements ne servent justement à préparer un renforcement de la réglementation sans plus de contreparties[32]. Ou encore, le succès et la généralisation des systèmes de compensation finirait par se retourner en boomerang contre lui-même, les acheteurs démontrant qu'il vaut mieux changer les règles[33]. Mais inversement, les paiements peuvent conduire à renforcer les droits des propriétaires privés. On peut donner des exemples de tous ces cas, mais l'auteur insiste qu'ils servent souvent à retarder le développement d'expériences pilotes qui seraient pourtant bien nécessaires.

En conclusion, l'auteur récapitule les acquis de son travail : ces paiements pour services peuvent être préférés à d'autres instruments dans de nombreuses situations :

- lorsque les droits sont de fait du côté des offreurs et que les moyens réglementaires sont limités ;
- lorsque l'asymétrie d'information entre offreurs et acheteurs est importante, et/ou que les coûts d'obtention des connaissances sont élevés ;
- quand le territoire visé est hétérogène et qu'on recherche des changements ponctuels de pratiques, par rapport à une norme sociale moins stricte que ce qui est désiré ;
- lorsque le contexte politique est équivalent à la négociation du changement climatique, c'est-à-dire que les mesures coercitives sont infaisables, faute d'une autorité commune.

De nombreuses situations sont concernées, et l'auteur se demande si ces politiques incitatives sont généralisables, ou à quels problèmes elles correspondent le mieux. En particulier, y a-t-il une différence entre pays riches et pays en développement ? Et ne faut-il pas par ailleurs corriger l'approche purement économique par une démarche de psychologie sociale permettant de jouer sur des phénomènes de leadership au sein des communautés paysannes ? Enfin, il faudrait consacrer du temps à légitimer la fourniture de services écologiques comme un revenu parmi d'autres pour les agriculteurs ou les forestiers : stocker du carbone, protéger la biodiversité, ralentir les crues, ou protéger la qualité de l'eau etc., en plus de la vente classique des produits de la ferme. Sans oublier la contribution à l'amélioration des débits réservés. L'auteur ne mentionne aucun cas de ce genre, mais nous allons présenter le cas de la Californie ci-dessous.

Qu'on nous permette simplement de dire que malgré la diversité des situations analysées, cet article nous concerne, nous Français, parce qu'il va dans le sens d'un regain de confiance dans les approches négociées à des niveaux décentralisés, et avec des aides. L'auteur cite encore Ellickson à propos de Pigou, et nous rappelle utilement la position du grand économiste de l'environnement :

"*Les chercheurs d'aujourd'hui seront surpris d'apprendre que A. Pigou pensait que la bonne manière de réduire la pollution de l'air est de donner des récompenses aux usines qui réduisent leurs émissions, plutôt que de taxer les pollueurs. A une époque où il était normal d'utiliser des poêles à charbon très polluants, Pigou avait sans doute raison d'admettre que les récompenses constituaient la méthode d'internalisation la plus efficace, et de considérer les rares non-pollueurs comme des producteurs d'externalités positives*" (R. Ellickson, 1973).

---

32 En France, un projet de loi comportant des servitudes compensées pour protéger les sites naturels, en 1905, fut modifié par une majorité conservatrice au nom de ce que cela constituait déjà une attaque contre la propriété privée, et que les socialistes en profiteraient lorsqu'ils seraient au pouvoir pour réduire encore davantage le droit de propriété. On a préféré classer des sites sans contrepartie, mais avec l'accord des propriétaires… On imagine que la loi ne fut guère appliquée.

33 Aux Pays-Bas, les sociétés privées de distribution d'eau, appartenant aux collectivités publiques, avaient décidé de passer des contrats avec les agriculteurs pour leur indemniser la perte de revenus produite par l'abandon des intrants agricoles. Mais dès que la totalité du pays a été placée en zone vulnérable, et que les règles de la PAC ont changé, ils ont arrêté les paiements, demandant plutôt à l'administration de sévériser la réglementation.

2.3.3.7. Des échanges de volumes d'eau en Californie

La majeure partie des cas étudiés par J. Salzman concerne la biodiversité, la qualité de l'environnement, ou la protection des ressources en eau destinées à la potabilisation. Il évoque les services rendus par les zones humides en termes de réduction des risques d'inondations, mais guère d'échanges de volumes d'eau en période de sécheresse ou en situation de pénurie avérée. Or malgré de nombreuses difficultés technico-juridiques, au moins un cas de ce genre s'est développé en Californie : un des plus anciens syndicats d'irrigation, l'Imperial Irrigation District (IID) a décidé de vendre une partie de ses droits de prélèvements d'eau à l'autorité de l'eau du comté de San Diego et à l'Etat, en profitant le l'existence du canal d'adduction géré par le Metropolitan Water District qui les relie, mais aussi en apportant une compensation en eau aux tierces parties qui seraient lésées par ce transfert. C'est une opération très compliquée du fait de la situation géographique particulière, mais elle est utile pour montrer l'ensemble des questions à se poser lorsqu'on veut rendre la répartition de l'eau plus durable, c'est-à-dire pas seulement plus favorable à l'environnement, mais aussi, acceptable économiquement et socialement.

Dans un deuxième article sur les marchés de l'eau en Californie, écrit en réponse à un article discutant la possibilité de marchés de l'eau en France[34], on avait tenté d'expliquer pourquoi une loi californienne relative au *Wheeling*, c'est-à-dire à la réaffectation de l'eau en faveur des usages où l'eau a la plus grande valeur, et à son transfert dans des conditions équitables, n'était finalement guère appliquée : l'appropriation de fait de l'eau par des ayants-droits historiques leur permettait de spéculer sur l'eau, et donc finalement peu d'eau pouvait être échangé, ce qui ne permettait pas d'avoir un fonctionnement de marché ; et par ailleurs, bien que l'essentiel de la loi y soit consacré, la question des impacts des transferts sur des tierces parties restait largement une inconnue. Faute d'études, voire de la possibilité même de connaître et de chiffrer ces impacts, on pouvait craindre une multiplication d'actions en justice. Ce fait avait conduit les grands distributeurs d'eau de la Californie du sud à découvrir que tout simplement, l'eau la moins chère dont ils pouvaient disposer pour la population supplémentaire prévue viendrait des économies faites par la population actuelle. Et, compte tenu des consommations environ trois fois plus élevées par habitant qu'en Europe, le potentiel d'économies était considérable.

Mais il y a eu un phénomène accélérateur, qui a poussé l'autorité des services d'eau de San Diego a racheter de l'eau à des irrigants pour se prémunir contre une pénurie. C'est l'obligation faite par le gouvernement fédéral à la Californie de réduire ses prélèvements du Colorado à sa part réglementaire. Revenons en arrière pour comprendre. La partie sud de la Californie est déficitaire en eau, et elle compense historiquement ces déficits par des transferts d'eau depuis le nord de l'Etat, et depuis le Colorado au sud-est. Un ensemble de projets de certaines villes (San Francisco et Los Angeles notamment), de l'Etat et du gouvernement fédéral a permis d'interconnecter tous les fleuves de cette partie sud-ouest des Etats-Unis, pour former 'le plus grand bassin artificiel du monde'. Cependant, la politique de toujours plus d'offre a fini par être bloquée : au nord, les défenseurs de l'environnement ont empêché un projet de passage en siphon d'eau venant du nord de l'Etat (et éventuellement plus au nord encore), sous le célèbre delta intérieur de l'embouchure commune des fleuves Sacramento et San Joaquin dans la baie de San Francisco. Au sud la situation est devenue inextricable.

En effet, l'eau du Colorado était détournée pour irriguer la zone d'Imperial dès la fin du 19e siècle, et elle arrosait près de 50.000 ha en 1901, lorsqu'une violente crue détruisit les ouvrages hydrauliques. L'eau s'écoula alors sans qu'on puisse l'arrêter vers une dépression qui était une ancienne mer asséchée, et qui est devenue la Salton Sea. Elle est régulièrement approvisionnée depuis par les surplus de l'irrigation, et elle est ainsi devenue un refuge essentiel à la faune sauvage, notamment aux oiseaux migrateurs. Et cela d'autant plus qu'au fil des décennies, la surexploitation de l'eau du Colorado a conduit à une réduction dramatique des quantités et des qualités d'eau du delta de ce fleuve, à son embouchure au Mexique, au nord de la mer de Cortez.

---

34 Cf. supra, note 18. Et B. Barraqué, 'Les marchés de l'eau en Californie : modèle pour le monde ou spécificité de l'ouest aride américain ? Deuxième partie : marchés de l'eau ou économies d'eau ?' in *Responsabilité et Environnement, Annales de Mines*, n°33, Eska, Janvier 2004, pp 60-68.

Le partage de l'eau du Colorado est difficile, et il a nécessité l'intervention du gouvernement fédéral en 1922. Sur la base d'une estimation du volume annuel moyen disponible de 21,7 km^3, il a décidé de laisser 1,9 km^3 aux Mexicains et 1,2 km^3 pour l'écoulement naturel, et de partager le reste par moitié entre les 4 Etats du bassin amont et les 3 Etats du bassin aval, soit 9,3 km^3 à chaque sous-bassin. Le partage au nord-ouest n'a pas posé de problème, mais au sud-est, la Californie a pris la part du lion, avec 5,4 km^3, soit plus de 60%. De surcroît, elle a profité de ce que les projets hydrauliques des deux autres Etats, le Nevada et surtout l'Arizona, n'étaient pas réalisés, pour pousser ses prélèvements du Colorado jusqu'à 6,5 km^3, dont 60% pour IID, et 40% pour le fournisseur d'eau en gros des villes, le Metropolitan Water District of southern California (MWD). Or, on s'est progressivement aperçu que les volumes répartis en 1922 étaient basés sur des séries statistiques limitées qui correspondaient à des années humides, et que le volume disponible était en fait plutôt de l'ordre de 16,5 km^3, et c'est la raison pour laquelle l'eau n'arrive plus au Mexique, ou à des taux de salure naturelle très élevés, et aggravés par les pratiques agricoles (remontée de l'eau salée des nappes souterraines). Dans ces conditions, la moindre des choses était que la Californie revienne à ne prendre que son quota de 5,4 km^3, soit la politique dite 4.4 (*four point four*), correspondant au même volume calculé en 'acres-pieds'[35]. L'un des utilisateurs d'eau devait réduire ses droits, et vite, puisque finalement le ministère fédéral de l'Intérieur a obligé les Californiens à parvenir à un accord sur la re-répartition entre eux avant décembre 2002, faute de quoi il refuserait de prolonger le droit de sur-prélèvement actuel dans le Colorado jusqu'en 2016, comme convenu lors de la proposition 4.4 en 1996.

Or, le problème de salinité des sols avait conduit IID à combiner drainage et irrigation pour évacuer le sel, mais aussi les résidus de pesticides et d'engrais, vers la Salton Sea. A tel point que l'eau devenait toxique pour les poissons et les oiseaux, et que les terrains d'un propriétaire riverain étaient inondés. En revanche, la qualité des sols et le climat font que grâce à l'eau importée, on peut arriver à faire trois récoltes par an ! Imperial valley représente 200.000 ha irrigués et plus d'un milliard de $ de production agricole chaque année. Les fermes sont grandes (toutes plus de 70 ha, 20% à 200 ha et plus) ; un tiers de la surface est en luzerne (suivent d'autres fourrages, du blé et de la betterave), les légumes font plus d'un tiers de la production, et l'élevage bovin est important. Mais l'agriculteur inondé, Elmore, ayant accusé IID de gaspiller de l'eau, les instances de contrôle et de gestion de l'eau de l'Etat ont trouvé que IID pouvait économiser plus de 540 millions de m^3/an en réduisant les fuites de ses réseaux et en augmentant l'efficacité de l'irrigation, voire en adaptant les cultures afin de nécessiter moins d'eau et de provoquer moins d'évaporation. Notons ici pour le lecteur européen que sur l'ensemble de la Californie, l'irrigation représente plus de 11.000 m^3/ha/an (certes avec souvent deux ou trois récoltes).

C'est ainsi qu'on est rentré dans cette nouvelle problématique de la possibilité d'une revente de l'eau de IID aux villes via le MWD. En effet, IID ayant déclaré qu'il n'avait pas les moyens d'investir dans les économies d'eau, MWD proposa de financer certains de ces projets en échange d'eau. L'accord était prêt en 1988, mais il fut dénoncé par l'une des tierces parties : un autre district d'irrigation, Coachella, avait rang de priorité numéro 2 après IID et avant MWD, et il réclamait sa part de l'eau…[36] Les menaces du gouvernement fédéral permirent finalement d'aboutir à une vente annuelle de 250 millions de m^3 du quota de IID à l'autorité de l'eau du comté de San Diego, le prix demandé par MWD pour transférer l'eau étant partiellement payé par l'Etat de Californie, avec une subvention de 200 millions de $.

Mais ce n'était pas fini, car le détournement de l'eau conduirait inévitablement à l'assèchement de la Salton Sea, sans compter que la réduction des fuites des réseaux priverait indirectement les Mexicains de l'autre côté de la frontière d'eau souterraine… Les écologistes rejoignaient les irrigants de Coachella pour bloquer l'accord. De nouvelles menaces fédérales permirent d'arriver au *Quantification Settlement Agreement* (QSA) à la fin de 2003. De l'eau serait bien revendue à San Diego et à Coachella, mais l'acheteur à IID serait le Département des Ressources en Eau de l'Etat, qui utiliserait le produit de sa propre revente de l'eau à MWD pour créer un fonds de restauration de la Salton Sea ; le QSA prévoit également un transfert allant jusqu'à 190 millions de m^3 d'eau en cas de

35 Un acre-pied est une hauteur d'eau d'un pied sur un acre, et cela correspond à 1234 m^3. Pour calculer rapidement de tête, diviser par 8 et multiplier par 10.000 pour obtenir des m^3.
36 Voir mon article sur le difficile partage de l'eau du Colorado, cité supra note 18.

sécheresse pour garantir le niveau de cette mer intérieure, qui reçoit actuellement 1,7 km^3 par an dont 85% vient du drainage agricole et des pertes d'eau. En définitive, la mise en jachère de terrains de IID, plus immédiate qu'une politique de lutte contre les fuites, permet à MWD de récupérer 96 millions de m^3. San Diego obtient une moyenne de 240 millions de m^3/an pendant 110 ans. En contrepartie, ce comté doit réserver une somme de 20 millions de $ à débourser sur 50 ans pour compenser les impacts négatifs du transfert sur des tierces parties de l'Imperial Valley.

Là-dessus, des économistes se sont livrés à des calculs pour savoir si la vallée en question y gagnait ou y perdait. L'économiste attitré de IID a estimé qu'en remplaçant les économies d'eau par de la mise en jachère, on perdrait 20 millions de $/an, au lieu de gagner la même somme. Donc la protection de la Salton Sea représentait un manque à gagner de 40 millions annuels. Selon une autre estimation, la mise en jachère de près de 5.000 ha de terre agricole aurait un impact négatif de 6 à 9 millions de $ pour la saison 2004-05 sur l'économie locale, ou encore de 1850 $/ha de jachère. Une des raisons avancées est qu'au lieu de laisser les agriculteurs choisir volontairement les parcelles à mettre en jachère, IID avait acheté les terrains pour les geler lui-même.

Une autre critique à la solution choisie est que l'affaiblissement de l'agriculture peut conduire à des processus irréversibles, notamment du fait de la pression foncière à l'urbanisation qui reste très forte dans le sud californien. C'est pourquoi les tenants de cette position regrettent que la solution ait été imposée si vite : à peine est-elle mise en œuvre que l'on découvre des possibilités d'économies d'eau et de réduction de la lixiviation du sel vers la mer intérieure, sans oublier la protection des intérêts des Mexicains en aval, notamment par une augmentation des surfaces consacrées aux fruits et aux légumes, ce qui permettrait de mieux alimenter une population dont on concentrerait la croissance sur la côte au lieu de la laisser s'étaler dans les déserts intérieurs. De plus, le QSA ne contient aucune disposition relative aux économies d'eau à faire en ville. Pourtant la consommation par habitant est actuellement de près de 800 litres/personne/jour, chiffre qui pourrait être divisé par trois ! Certes, il faut tenir compte du fait que des économies urbaines trop rapides mettraient en péril l'équilibre financier des services publics, mais l'eau transférée va coûter à terme 0,34 $/$m^3$, et certaines politiques d'économies d'eau coûteraient moins cher.

En définitive, ce qui aura le plus manqué à cet arrangement complexe, c'est sans doute la mise en place d'une institution interrégionale appropriée pour davantage prendre en compte les effets secondaires induits par les différentes stratégies envisageables, afin d'atteindre dans de meilleures conditions l'objectif de réduire les prélèvements totaux du sud californien malgré la croissance économique dont il bénéficie. Mais personne ne remet en cause le principe du transfert de l'eau de la campagne vers la ville si le besoin est réel et si une éthique du développement durable et équilibré prévaut, compte tenu des gains économiques globaux de ces transferts : il faut que l'écosystème aquatique conserve sa priorité, et que les impacts sociaux ne soient pas ruineux, au sens propre, pour les agriculteurs.

2.3.3.8. Le Plan pour l'Eau de la Californie

En décembre 2005, l'Etat de Californie, et plus précisément son département des ressources en eau, a publié une mise à jour du plan de gestion de l'eau d'ici à 2030. Le Directeur de ce département introduit le document publié en 5 volumes de façon intéressante pour nous : "ceci n'est pas simplement une mise à jour du plan pour l'eau… mais constitue une transition fondamentale dans la façon dont l'administration de l'Etat doit interagir avec les collectivités locales et les groupes d'intérêt pour s'occuper des ressources en eau… Nous devons prendre en compte un éventail plus large de questions liées à cette gestion, les demandes en eau concurrentes, de nouvelles approches de la fiabilité des approvisionnements en eau, et de nouvelles méthodes de financement… Le stockage et l'adduction traditionnels seront adaptés pour inclure davantage d'économies d'eau, de recyclage, de dessalement, et bien d'autres stratégies. Et aujourd'hui, les services locaux et les collectivités commencent à travailler ensemble à la réalisation de plans régionaux de l'eau plus intégrés et plus efficaces pour leur coût…"

On ne peut pas résumer ici l'ensemble du document, car il dépasse largement la question de la sécheresse et de la pénurie[37]. Nous avons simplement tiré les 'bonnes feuilles' qui nous concernent. Pour l'essentiel cependant, le plan encourage les partenariats régionaux pour la répartition plus efficace de l'eau, et l'aide financière à des approches nouvelles comme les économies, le recyclage et les techniques dites non conventionnelles (dessalement en particulier), sans oublier la reconquête des champs d'expansion de crues et la restauration des écosystèmes. Le plan introduit la dimension du changement climatique au moins en ce qui concerne le risque d'inondation (océan et fleuves), et l'entretien du réseau des digues du *Bay Delta*, qui a laissé à désirer ces dernières années. Le gouverneur A. Schwartzenegger a annoncé en Janvier 2006 qu'il voulait consacrer 35 milliards de $ en 10 ans à la mise en œuvre du plan. Les chambres de l'Etat sont prêtes à demander aux électeurs de voter un emprunt obligataire de 3 milliards en 2006 et de 6 milliards en 2010, ainsi que de créer un Water Resource Investment Fund, pour offrir une source de financement stable et à long terme pour les projets pour l'eau.

Cependant, les défenseurs de l'environnement, en particulier Peter Gleick du Pacific Institute, estiment que le plan ne fait pas assez de place aux économies d'eau dans les services publics des villes, dans l'industrie et dans l'agriculture : "les usages de l'eau dans l'Etat pourraient être réduits de 30% dans les deux décennies à venir malgré l'augmentation de la population" et ils ajoutent que ces économies sont moins onéreuses que l'investissement dans de nouvelles ressources. C'est assez évident, surtout d'un point de vue européen, où on a aussi un champ d'économies avantageuses, bien qu'on parte de niveaux de consommation bien plus modestes.

Le plan pour l'eau comprend un volume 2 destiné à présenter 26 éléments de stratégie pour améliorer la gestion de la ressource. L'agriculture est concernée par plusieurs d'entre eux, mais plus particulièrement par les quatre suivants : la gestion maîtrisée des terres agricoles, la gestion plus efficace de l'eau par l'agriculture, les transferts d'eau entre ayants-droits, et le renoncement à l'eau importée de la part des agriculteurs.

La gestion maîtrisée (*stewardship*) des terres agricoles recouvre un ensemble de pratiques qui permettraient de protéger l'environnement ordinaire sur des étendues bien supérieures à celles que l'administration acquerrait au nom de la protection. Il s'agit donc en fait d'éviter de devoir recourir à la 'sanctuarisation'. Les éléments comprennent la réduction de l'érosion et du ruissellement, la protection des berges des cours d'eau, la fourniture de zones ombragées pour les poissons, les haies brise-vent, les cultures intermédiaires couvre-sols, la ré-extensification… une partie d'entre elles ont été évoquées au début de ce chapitre. L'agriculture et l'élevage californiens sont désavantagés par rapport au reste du pays, parce que les programmes agri-environnementaux nationaux privilégient les grandes cultures, alors que la Californie fait davantage de cultures spécialisées. Ainsi ne reçoit-elle que 3% des fonds d'aide à ce ménagement du territoire, alors qu'elle fournit 13% de la nourriture et des fibres végétales du pays. Le principal problème est alors de créer une agence de coordination entre les diverses administrations d'Etat et fédérales, afin de mieux répartir et suivre les divers sous-programmes d'éducation et de recherche, de mise en œuvre, d'aide, etc.

L'efficacité de l'irrigation constitue un enjeu majeur en Californie : on utilise 42 km^3 d'eau en moyenne annuelle pour irriguer plus de 3,8 millions d'ha, (soit 11.000 m^3/ha/an)[38], et on dispose d'un potentiel d'économies, soit pour irriguer davantage de terrains (notamment des vergers au goutte-à-goutte), soit pour rendre une partie de l'eau à d'autres usages ou à l'écosystème. Pour mieux mettre en œuvre les politiques d'efficacité hydrique décidées au début des années 1990 par des lois fédérales (concernant le Central Valley Project) et de l'Etat, 74 fournisseurs d'eau d'irrigation (desservant plus de la moitié des surfaces irriguées) et 3 organisations environnementales ont créé ensemble un Conseil de gestion de l'Eau Agricole en septembre 2005, qui a défini un ensemble de mesures d'efficience classées en 3 groupes : celles qui s'appliquent partout (réaliser un plan de gestion, désigner un coordinateur des économies d'eau, offrir des services de conseil en économies aux usagers, évaluer les besoins de changements institutionnels et inter-institutionnels), d'autres qui sont soumises à une évaluation préalable obligatoire des bénéfices nets escomptés (comptage et rapportage des utilisations

37 Le rapport complet du plan est téléchargeable depuis le site : http://www.waterplan.water.ca.gov/cwpu2005/
38 à comparer à l'Espagne, qui utilise environ 24 km^3 pour irriguer 3,4 millions d'ha.

d'eau, tarifications spécifiques) et enfin des pratiques liées à des conditions locales particulières. Les surfaces en micro-irrigation ont plus que doublé en 10 ans, passant de 300.000 ha à 760.000 ha, et on considère qu'on peut encore convertir 1,5 millions ha avec profit. Une étude des coûts et des avantages liés à une amélioration de 85% de l'efficacité de l'irrigation dans une région hydrologique donnée, estime possible de réduire l'utilisation nette d'eau de 150 millions à 700 millions de m^3 en 2030, pour un coût très variable selon les cas, allant de 0,028 à 0,73 $/m^3. De plus, l'étanchéification de deux grands canaux d'adduction de Californie du Sud (All American Canal et Coachella Branch Canal) pourrait fournir 120 millions de m^3 d'eau par an pour un investissement de 220 millions de $. Au total, cette politique d'efficacité hydrique pourrait économiser 880 millions de m^3 par an pour un investissement de 4 milliards de $. Le principal problème est que les administrations fédérales et de l'Etat ne tiennent pas leur promesse de financer chacune un quart du programme prévu de 2000 à 2007, soit 1,5 à 2 milliards. Et en définitive, le manque sera en partie compensé par la vente d'eau aux villes.

Les transferts d'eau entre ayants-droits ont déjà été évoqués ici avec le cas de IID – San Diego, qui constitue le plus important d'entre eux. Pourtant il n'est pas le seul, et le volume total transféré est passé de 100 millions de m3 à 1,5 km^3 de 1985 à 2001, dont 80% sur une basse annuelle, et 20% plus permanents c'est-à-dire pour des durées pouvant atteindre 35 ans. En quinze ans, la structure de cette politique a changé : si au début les transferts se sont développés en années de sécheresse et au profit des villes (les 250 millions de m^3 de la Californie du Sud), plus récemment ils se sont accrus, alors qu'on était en années humides, au profit des milieux aquatiques (protégés par les défenseurs de l'environnement) et davantage encore au profit d'agriculteurs, à tel point qu'aujourd'hui, cette catégorie d'usage reçoit plus de la moitié du total. Les controverses initiales semblent donc s'estomper, notamment parce que tous les Californiens doivent faire face à la réduction fédérale de leurs prélèvements. On est bien passé de la sécheresse à la pénurie. En plus des volumes actuels, respectivement 370 et 500 millions de m^3 pourraient être libérés dans les vallées de Sacramento et de San Joaquin par l'abandon de 20% des surfaces en riz de la première et à 20% des surfaces en coton de la seconde, pour un impact de moins de 1% sur l'économie locale. Une autre étude a montré qu'en réduisant les effets du manque d'eau à 80% à l'avenir, les transferts et les banques d'eau en sous-sol pourraient fournir jusqu'à 1,3 milliards de $ par an de bénéfices. L'éventail des prix payés pour l'eau transférée va de 0,06 à 0,15 $/$m^3$, mais comme nous l'avons vu, il faut y ajouter le coût du transport, et celui lié à la compensation des effets indirects sur des tiers.

Enfin, les renoncements à l'eau des agriculteurs, sont évoqués dans le dernier chapitre du volume 2 des stratégies de gestion, qui couvre diverses autres mesures comme le recueil de l'eau du brouillard. Pour les agriculteurs, il s'agit principalement des jachères partielles ou temporaires, du renoncement à l'irrigation et du choix de cultures ne nécessitant que la pluie naturelle, et enfin des pratiques de non-labourage ou de labourage léger qui offrent l'avantage de mieux retenir l'eau dans le sous-sol tout en réduisant l'érosion. Le problème est que ces politiques doivent prendre en compte leurs effets induits sur le plan social, et donc le plan recommande que des systèmes d'aide au moins technique soient mis en place pour inciter les agriculteurs à innover.

2.3.3.9. Quelques questions relatives à la gestion collective dans le cas français

Les éléments ci-dessus concernant les expériences étrangères (Californie, Australie) permettent d'évaluer les avantages et inconvénients de systèmes de gestion collective de la ressource, en mettant notamment l'accent sur les procédures de mise en œuvre. Nous introduisons à présent une liste de questions relatives à l'adaptation collective à la sécheresse dans le cas de la France, auxquelles l'on répondra de manière brève.

a) Une gestion de crise est-elle suffisante ?

La gestion de crise doit pouvoir s'appuyer sur une politique structurelle permettant de rétablir durablement l'équilibre entre offre et demande en eau. L'évolution de la législation va justement dans

le sens d'une meilleure protection de la ressource en eau, mais aussi de la nécessité d'assurer avant tout l'Alimentation en Eau Potable, dans une optique de gestion intégrée de la ressource.

b) Les systèmes de "gestion volumétrique" sont-ils une voie à développer ?

Il est nécessaire de faire évoluer les systèmes de gestion volumétrique afin de favoriser un meilleur ajustement entre offre et demande en eau (définition d'un volume global à partager entre les irrigants en fonction de la disponibilité en eau totale et des autres usages de l'eau). Ces systèmes sont bien plus performants que ceux basés sur les tarifications à la surface ou au forfait (voir Johansson et al., 2002), mais impliquent des coûts de mise en place (pose de compteur) et surtout de contrôle très importants. De plus, la littérature économique sur le sujet (voir Johansson et al., 2002) concluent plutôt à des recommandations mitigées, le rôle des conditions locales pouvant conduire à privilégier des systèmes de gestion plus simple si ces coûts de contrôle dépassent les avantages d'une tarification proportionnelle aux volumes consommés. De plus, analyser plus finement la fiabilité des systèmes de gestion volumétrique nécessiterait d'évaluer leur efficacité réelle en cas de crise, ainsi que leur acceptabilité par les irrigants. La possibilité de *free-riding* (phénomène de passagers clandestins, profitant d'un bien commun auquel ils ne contribuent pas ou trop peu) doit également être envisagée.

c) Faut-il favoriser la mise en place d'organisations collectives d'irrigants ?

L'avantage des organisations collectives d'irrigants réside notamment dans le fait que les pouvoirs publics disposent d'acteurs constitués concernés. La mise en place de telles organisations permet en outre la mise en place de mesures du type tours d'eau. Une comparaison avec des systèmes plus centralisés fait encore défaut, sur la base d'une analyse coût-bénéfices.

d) Les PGE (Plans de Gestion d'Etiage) peuvent-ils constituer un instrument de régulation territoriale satisfaisant de la gestion quantitative de l'eau ?

Les PGE n'ont pas de valeur légale. La maîtrise d'ouvrage est assurée par les EPTB (Etablissements Publics Territoriaux de Bassin) ou les SAR qui sont aussi maîtres d'ouvrage de grands projets d'aménagements hydrauliques, alors que les PGE doivent avoir un rôle de justification de tels projets (voir à ce sujet le problème du projet de barrage-réservoir de la Trézence, voir Allain, 2005).

e) Les SAGE (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux) peuvent-ils être des instruments de régulation territoriale satisfaisants de la gestion quantitative de l'eau ?

La réponse à cette question fait intervenir plusieurs conditions préalables. Tout d'abord, cela dépend de la possibilité de définir de manière adaptée le périmètre au départ (problèmes des zones littorales, des grands bassins…). Il est également nécessaire de procéder à une réelle mise en débat des questions de gestion quantitative de l'eau au sein de la CLE et à viser la mise en place de règles effectives de gestion quantitative de l'eau (voir le problème du SAGE Boutonne : Allain, 2002, 2005). Une autre condition est que la mise en œuvre du SAGE permette d'appliquer les règles et recommandations émises et que le caractère collégial de la délibération demeure. Le premier point soulève la question de l'articulation entre SAGE et instruments financiers du type contrat de rivière, ainsi que la question de la pérennité des moyens attribués. Il convient enfin de traiter le problème des transferts entre bassins hydrographiques.

f) Les SAGE peuvent-ils être des instruments de régulation territoriale suffisants de la gestion quantitative de l'eau ?

A priori non, dans la mesure où certaines questions de gestion quantitative ne peuvent être traitées à l'échelle d'un bassin versant, ne relevant pas seulement de la gestion de l'eau mais aussi de choix d'aménagement du territoire. Voir à ce sujet par exemple la question de l'alimentation en eau de la Gascogne par la Garonne (projet de Charlas, voir Allain, 2005).

g) Les SAR et EPTB peuvent-ils jouer un rôle prépondérant dans la gestion quantitative de l'eau au plan territorial ?

Une condition nécessaire pour ce faire est que leurs politiques en la matière soient définies par un instrument de type SAGE. Une réflexion est nécessaire sur l'évolution des EPTB par rapport aux SAR.

h) Une régulation territoriale de la gestion quantitative de l'eau est-elle suffisante ?

Certaines questions de gestion quantitative soulèvent des questions de politique nationale. Par exemple, dans le cas du barrage de Charlas, la question de l'offre en eau disponible à l'échelle de la Garonne met en jeu la politique énergétique (place de l'hydro-électricité, voir Allain, 2005).

2.3.3.10. Conclusion

Il faut conclure ici que si ces pratiques deviennent courantes au pays de la première agriculture du monde, elles devraient pour le moins être expérimentées dans celui de la deuxième. Rappelons qu'en Californie, il y plusieurs centaines d'expériences de *Watershed Partnerships*[39], qui permettent d'organiser la flexibilisation des répartitions de la ressource notamment pour traiter la pénurie de façon plus durable. Or en France, nous avons aussi de très nombreux contrats de rivière, ou de bassins d'alimentation de captage, contrats de pays et d'agglomération, dans lesquels les Agences de l'eau donnent des aides renforcées pour subventionner les efforts de coordination. Si, au lieu de considérer ces programmes comme autant de lieux d'opacité de la politique de l'eau, on voulait bien comprendre qu'ils coûtent moins cher qu'ils ne rapportent, et si, au lieu de dénoncer le 'vol de redevances' dont feraient l'objet les citoyens de la part des agriculteurs, on comprenait que c'est l'intérêt de ces derniers d'aider les agriculteurs à changer de pratiques lorsque cela coûte moins cher que de chercher des solutions techniques, on pourrait faire de grands progrès dans l'application de la Directive Cadre sur l'Eau. L'idée est de chercher un recouvrement des coûts global au niveau d'un partenariat territorialisé d'usagers de l'eau, plutôt que secteur par secteur au niveau national ; car dans cette seconde stratégie, on sait d'avance qu'on ne l'appliquera pas aux agriculteurs.

39 Voir les travaux de notre collègue Paul Sabatier à l'université Davis.

2.3.4. Les outils économiques dans le cadre de la politique de l'eau

Cette partie concerne les différentes options d'action économique envisageables par les pouvoirs publics, dans le cadre de la gestion des ressources en eau, et applicables aux situations de sécheresse. Nous ne présentons ici que les outils économiques sur lesquels les politiques publiques peuvent s'appuyer.

On peut sommairement porter deux regards sur l'occurrence récente de sécheresses rapprochées dans notre pays. Selon le premier, ces sécheresses sont autant de signaux avancés d'une évolution lente des conditions climatiques, et l'on doit considérer ces épisodes comme des conditions relativement récurrentes de l'activité agricole dans un futur proche. Selon le second, l'occurrence rapprochée de sécheresses n'est qu'un événement aléatoire, rien ne permettant d'en conclure quoi que ce soit sur leur fréquence future. On a montré dans la première partie du rapport, qu'en l'état actuel de nos connaissances sur le climat, rien ne permettait de trancher entre l'une ou l'autre vision de l'avenir des sécheresses en France. Mais cette incertitude n'est pas sans conséquences sur les voies possibles d'intervention des pouvoirs publics. Si l'on adopte la première vision, il s'agit de donner les moyens à l'agriculture de s'adapter progressivement à de nouvelles conditions climatiques par des politiques conçues sur la durée, visant tant à sécuriser les approvisionnements en eau qu'à optimiser l'usage du facteur dans les systèmes de production. Si l'on adopte la seconde, les sécheresses sont un risque collectif dont les remèdes peuvent être trouvés par des réformes du système d'indemnisation des calamités agricoles, l'ouverture à l'assurance privée en constituant une option à explorer sérieusement. Comme dans le reste de l'expertise, on explorera principalement le premier scénario de sécheresses récurrentes. Les voies assurantielles ont été décrites plus haut et l'on n'y reviendra pas.

Face à une perspective de tensions récurrentes sur la ressource du fait de sécheresses répétées, on peut envisager trois grandes voies d'action de la puissance publique. Elle peut chercher à accroître durablement les disponibilités (politique de création de ressources), elle peut accompagner des adaptations de l'agriculture à la sécheresse se traduisant par des diminutions des prélèvements agricoles (politique de réduction des demandes), elle peut soutenir la mise en place de systèmes de gestion collective visant à une meilleure adéquation des disponibilités aux besoins (politique de gestion équilibrée). La première voie d'action possible par création de nouvelles ressources n'est pas du ressort de l'expertise et ne sera évoquée que pour mémoire. Les enjeux de la gestion concertée ont été évoqués précédemment. On se concentrera donc essentiellement ici sur la voie de la régulation de la demande, en particulier à partir d'outils économiques comme la tarification.

2.3.4.1. Accroître les disponibilités

Les systèmes agricoles de production français n'ont pas été conçus pour être sécurisés au plan des orientations de production vis-à-vis de sécheresses répétées. Le progrès agronomique a surtout visé l'accroissement des rendements et les risques agricoles identifiés et combattus concernaient surtout le gel, la grêle ou la santé des plantes et des animaux de rente. La sécheresse était jusqu'à présent considérée comme un événement exceptionnel, sauf dans le domaine méditerranéen bien entendu, protégé contre ce risque par une politique volontariste d'aménagements hydrauliques à partir du massif alpin. Le massif pyrénéen étant déjà largement mobilisé, une telle option peut difficilement être étendue à la sécurisation des approvisionnements dans le Sud-Ouest. Il est néanmoins clair que dans un scénario de sécheresses récurrentes, l'option d'un développement de l'hydraulique agricole dans cette région doit être sérieusement considérée. Le recours à la micro-irrigation à partir de retenues collinaires est également une option possible, mais de portée limitée, cette politique de constitution de réserves ayant déjà été largement développée à partir des années 90 et le nombre de sites favorables n'étant pas indéfiniment extensible.

L'accroissement des disponibilités hydrauliques à partir de barrages réservoirs doit faire l'objet d'une analyse économique de type coûts-bénéfices approfondie. Les sites les plus favorables, c'est-à-dire les ouvrages de retenue les moins coûteux à réaliser et à maintenir, ont d'ores et déjà été équipés. Ne

subsistent dans le Sud-Ouest qu'un nombre très limité de sites assortis de contraintes diverses, au plan environnemental, de la qualité de l'eau dans les retenues ainsi que d'infrastructure d'acheminement de la ressource aux utilisateurs ou de prise d'eau pour leur réalimentation.

Deux autres options sont à considérer pour augmenter la ressource disponible : un déstockage accru à partir des ouvrages hydroélectriques ou une plus grande mobilisation des ressources en eaux souterraines. La première option a déjà été largement exercée dans le Sud-Ouest au travers des conventions de soutien d'étiage. Une augmentation des volumes distribués en été par ce biais se heurte à deux difficultés : le renchérissement du prix de l'énergie qui ne peut qu'entraîner une augmentation du préjudice énergétique subi par EDF et les engagements de la France en matière de recours aux énergies renouvelables pour réduire les émissions de carbone, politique qui suppose une mobilisation accrue du potentiel hydroélectrique. La seconde option peut être limitée par les potentialités du milieu (cas de la Charente) ou sujette à des contraintes résultant de la directive européenne "eaux souterraines", directive "fille" de la DCE. On notera que l'opportunité des différentes options peut difficilement s'envisager à un niveau global et requiert une analyse quasiment au cas par cas. Un certain nombre d'études d'impacts préliminaires sont donc requises avant de pouvoir construire un diagnostic global.

2.3.4.2. Régulation de la demande en eau agricole : restrictions ou tarification ?

La régulation de la demande agricole en eau a fait l'objet de multiples études internationales. La logique économique voudrait que les pays où l'eau est la plus rare adoptent des systèmes de tarification d'accès à l'eau fixés à des niveaux élevés, mais les études montrent que c'est loin d'être le cas. Dans des pays comme l'Egypte ou l'Albanie, l'eau est gratuite pour les agriculteurs (Chohin-Kuper et al., 2002). D'autres pays, comme la Turquie ou l'Italie pratiquent des tarifications forfaitaires à l'hectare, systèmes non fondés sur la consommation effective de ressource, et, à ce titre, peu incitatifs aux économies d'eau. On trouve également ce type de tarification dans certaines régions en France, en Espagne ou en Grèce. La tarification de l'eau proportionnellement au volume consommé n'est présente que dans certaines régions françaises (sur les périmètres gérés par des ASA ou des SAR en fait) ainsi que dans certaines parties du Maroc, de la Tunisie et de l'Espagne. Les tarifications sophistiquées par paliers de consommation, qui constituent le système de tarification le plus incitatif aux économies d'eau, ne s'observent qu'en Jordanie et en Israël. Bien entendu, non seulement le mode tarifaire importe mais aussi son niveau. Un tarification volumétrique simple peut être fixée à un niveau élevé incitant ainsi fortement à des économies d'eau alors que des systèmes complexes par tranches mais avec des niveaux de prix faibles ne créeront pas de telles incitations : c'est le cas de la France par rapport à la Jordanie par exemple (Chohin-Kuper, 2002).

2.3.4.2.1. Allocation des ressources par système de quotas

La mise en place de tarifs suppose en contrepartie que les utilisateurs acquittant un prix obtiennent les volumes qu'ils demandent. Selon la nature du système d'approvisionnement, cela peut ne pas être garanti. C'est pourquoi on observe également beaucoup de systèmes d'allocation par quotas de l'eau en agriculture. Le gestionnaire évalue les quotas mis à disposition de manière à minimiser les risques de défaillance d'approvisionnement (usuellement un seuil de défaillance d'une année sur dix est visé). Dans le contexte d'une gestion par quota, la tarification peut ne plus avoir de rôle incitatif mais simplement permettre au gestionnaire de récupérer le coût de fonctionnement du service auprès des bénéficiaires. Les problèmes posés par les systèmes de quotas sont bien connus et peuvent être résumés ainsi.

1. Le quota devient généralement un "droit acquis". C'est-à-dire que de nouveaux irrigants potentiels n'obtiendront pas de redistribution des quotas et devront attendre que des quotas existants se libèrent. Il se crée ainsi des files d'attente où ceux qui bénéficient de quotas ne sont pas nécessairement ceux qui rentabilisent le mieux l'eau. On trouve ce problème de liste d'attente dans le système Neste par exemple.

2. Le quota peut être accordé pour une durée limitée (une année typiquement). Donc faute de possibilité de report d'une année sur l'autre, l'irriguant qui ne mobilise pas tout son quota une année donnée perd ce qu'il ne consomme pas. Il est ainsi incité, quoi qu'il arrive, à consommer tout son quota, ce qui ne pousse pas aux économies d'eau. Là encore, cet effet dépend de la taille du quota attribué. Les systèmes souples avec possibilité de report sont donc préférables pour économiser la ressource. On peut observer de tels systèmes en Charente et en Beauce, dans le cadre de la gestion volumétrique.
3. Les quotas peuvent être transférables ou non transférables à des tiers. Dans le premier cas, se forme une sorte de marchés de droits d'eau. En l'absence de coûts de transaction, un système de quotas transférables a les mêmes performances qu'un système de tarification incitative. Les effets pervers du "grand fathering", c'est-à-dire d'une allocation initiale des quotas à partir des irrigants existants lorsque le système est mis en place sont corrigés. Ce système de quotas transférables a été mis en place en Californie (projet Central Valley) pour corriger l'inefficacité de la distribution initiale de ressource entre les agriculteurs, ainsi qu'entre les agriculteurs et les municipalités (Dinar et al., 2004). En pratique, son intérêt est limité par les coûts de transaction entre acheteurs et vendeurs potentiels de droits, surtout s'ils sont éloignés géographiquement dans un bassin versant. Les quotas non transférables prennent assez rapidement la forme de droits assis sur la propriété foncière (Anderson, 1983), transmis par héritage. Il peut aussi se faire que la répartition initiale de la ressource l'ait été au travers d'une concession foncière comme dans certains Etats du Sud-Ouest des Etats-Unis. Cette pratique est à la base du "water farming" observé au Nouveau-Mexique, au Colorado, au Texas et en Arizona. La seule manière d'accéder à l'eau pour les municipalités est d'acheter des terres et donc les droits d'eau associés. Ce système très coûteux pour la collectivité a beaucoup profité aux spéculateurs immobiliers (Colby, 1989), la raison sociale de l'exploitation agricole se trouvant complètement détournée au profit de la vente d'eau ou de terres aux collectivités locales pour l'alimentation en eau potable des populations. Un tel système présente donc de multiples effets pervers, effets qui ne peuvent être réduits que par une remise en question périodique de l'ensemble des droits d'eau distribués, au travers d'un système de concession temporaire, par exemple.

2.3.4.2.2. Les outils tarifaires

Les problèmes posés par les systèmes de quotas ont suscité un intérêt croissant pour les outils tarifaires dans de nombreux pays (Savedoff, 1999). Mais ces outils sont encore très inégalement développés, la tarification, lorsqu'elle existe, étant généralement basée sur des surfaces équipées pour l'irrigation. Dans une enquête mondiale portant sur 12,2 millions d'ha (d'exploitations) irriguées, Bos et Walters (1990) ont montré que la tarification forfaitaire à l'hectare concerne 60% de ces surfaces et que la tarification au volume consommé ne concerne que 25% des cas (les 15% restants ne faisant l'objet d'aucune tarification). Les outils tarifaires les plus courants sont les suivants :

1. **Tarification à la surface.** Système le plus courant dans le monde, il s'applique généralement aux superficies équipées pour l'irrigation, plus rarement à l'ensemble de la surface agricole (Tsur, 2005). Ils ont généralement pour fonction de récupérer le coût de fonctionnement du service. C'est pourquoi l'on observe des tarifs à l'hectare plus élevés en irrigation sous pression qu'en irrigation gravitaire ou lorsqu'il existe des infrastructures spécifiques (canaux, réservoirs) gérés collectivement.
2. **Tarification au produit.** Le tarif acquitté est assis sur le volume de récolte. Rarement observé, ce système peut être proche d'une tarification volumétrique en zone aride où le seul apport en eau aux cultures provient de l'irrigation, si du moins l'on admet l'existence d'une relation quasi-linéaire entre rendement et consommation d'eau. Des performances analogues à celle de ce système peuvent être obtenues en taxant l'usage d'inputs fortement complémentaires à l'irrigation, par exemple une taxe sur l'électricité ou sur le fuel nécessaire aux fonctionnements des équipements d'irrigation. Bien que concevable en principe, ce système tarifaire par taxation des inputs complémentaires n'est pas utilisé aujourd'hui.

3. **Tarification au volume.** Le tarif est assis sur le volume consommé. Une alternative est une tarification au temps (lorsque le débit d'arrosage est connu par ailleurs) ou en proportion du volume résiduel dans le réseau d'acheminement (rivière ou canal) lorsque la consommation individuelle n'est pas mesurée directement. Ce type de tarif simple, dit monôme ("flat-rate" en anglais) admet de nombreuses variantes plus ou moins sophistiquées.

4. **Tarifs par tranches ("Block rate tariff").** La tarification par tranches ou "multinôme" est un système où le prix par mètre cube consommé varie par saut avec le niveau de consommation. Ce système est rarement observé en pratique. En principe, le taux doit augmenter avec la tranche, mettant ainsi en place un prix plus dissuasif pour les gros consommateurs que pour les petits. Mais il arrive qu'on observe des systèmes à tranches descendantes, avantageant les gros consommateurs. Ces pratiques sont heureusement très rares et résultent en général d'un sur-dimensionnement préalable des infrastructures qui oblige le gestionnaire à essayer de fournir davantage d'eau que ce que les utilisateurs en demandent pour équilibrer ses comptes et supporter les coûts de maintenance.

5. **Tarifs binômes ("Two-part tariff").** Le tarif se compose d'une partie fixe, ou "abonnement" au service d'eau, et d'une part variable, proportionnelle au volume requis par l'usager. La partie fixe permet la récupération des coûts fixes du service (annuités de remboursement des emprunts contractés pour les investissements par exemple). Elle correspond également à un principe d'équité en présence de rendements localement croissants des infrastructures comme les barrages réservoirs par exemple. En effet les coûts de construction et de maintenance de ces derniers augmentent moins que proportionnellement au volume retenu, du moins jusqu'à une certaine limite. Il est dans ce contexte plus rentable pour la collectivité d'avoir un nombre réduit d'ouvrages de grande taille qu'une multitude de petits ouvrages. Ceci entraîne que la présence sur un site donnée de gros consommateurs justifie la construction de l'ouvrage, bénéficiant ainsi indirectement aux petits consommateurs dont les seuls volumes prélevés additionnés n'auraient pas justifié l'investissement. Le fait que la partie fixe soit la même pour tous les consommateurs, petits ou gros, se justifie alors par cet argument que les petits bénéficient de la présence des gros et doivent supporter à parité avec eux le coût fixe de l'investissement. La partie variable doit en principe s'identifier à la valeur marginale de la ressource, soit vis-à-vis de ses autres usages possibles, soit selon des critères de rareté définis de manière physique. Mais en pratique, les niveaux de prix résultent de négociations ou de procédures de tâtonnement : on met en place un tarif, on observe la réaction de la demande, puis on le modifie pour se rapprocher d'un objectif préalable d'économie d'eau (Dinar, 1997).

6. **Prix de bonification ("Betterment fees").** Lorsque les volumes consommés ne peuvent pas être observés directement, mais que les prix des terres sont connus, on peut asseoir le tarif sur le différentiel de prix des terres entre superficies irriguées et superficies non irriguées. Ce différentiel mesure en principe le gain de rentabilité permis par l'accès à l'eau. On trouve ces pratiques dans certains pays asiatiques. Il s'agit en fait d'une variante affinée de la tarification à la surface.

7. **Marchés de droits d'eau.** On trouve de tels marchés un peu partout dans le monde. Ils ont rarement un statut clair, l'idée de "marché" étant ici étendue à des procédures d'échanges d'eau formelles ou informelles, organisées ou spontanées (Tsur, 2005). Ces procédures d'échange peuvent porter sur des droits permanents ou sur des droits échangés pour une durée de temps limitée (en cas de fortes contraintes sur la ressource disponible par exemple). On parle de marchés "spots" ("au comptant" par opposition à "à terme") dans ce dernier cas. Le peu de marchés de droits existants peut s'expliquer par des résistances des ayants droits (surtout si le système initial fonctionne par quotas non transférables ou avec des prix quasi nuls pour l'eau d'irrigation) (Easter et al., 1998). Les autorités administratives traditionnelles peuvent également s'opposer aux marchés de droits (Wilson, 1997), système qui restreint leur pouvoir d'intervention, ainsi que leur capacité à capter et à fidéliser des clientèles (cas de nombreux pays en développement). De tels systèmes ont été instaurés formellement au Chili (Central Valley) et en Australie (état de Victoria). On observe aussi des marchés spots spontanés (donc informels) dans d'autres pays comme le Brésil (Kemper et Olson, 2000), le Mexique (Thobani, 1998), l'Asie du Sud (Shah et Zilberman, 1991). L'émergence de structures informelles résulte soit de traditions antérieures soit

de l'inefficacité constatée par les usagers de l'administration de la ressource. Structures formelles et informelles peuvent d'ailleurs se chevaucher comme au Pakistan (Rinaudo, 1997).

Alors que l'analyse économique prédit qu'un tarif volumétrique simple ou en partie double permet d'assurer une régulation collectivement efficace de l'accès à l'eau des irrigants, force est de constater que l'on n'observe nulle part un tel système qui soit basé sur la valeur marginale sociale de l'eau pour les usagers. En pratique, les systèmes de tarification en place sont peu efficaces et extrêmement variés d'un pays à l'autre, voire d'une région à l'autre d'un même pays. Que les niveaux de prix pratiqués diffèrent se conçoit aisément en raison de disponibilités et de besoins variés pour la ressource. Que les systèmes pratiqués soient aussi différents ne peut s'expliquer que par des difficultés pratiques de mise en œuvre d'une tarification sur le terrain. Les économistes appellent "problème d'implémentation" cette question et l'analysent comme la recherche d'un optimum de "second rang", la moins mauvaise solution possible au problème du partage de la ressource bien qu'en deçà de la solution efficace, solution dite de "premier rang".

Tableau 1. Les différents modes de tarification de l'eau (Johansson 2002)

Type de tarification	Mise en place	Efficience potentielle (horizon de l'efficience)	Contrôle de la demande
Proportionnel à la surface irriguée	facile	aucune	Via des restrictions sur cultures (zonage) ou sur extension des périmètres irrigués
Tarif proportionnel à la production (ou à un intrant)	moins compliquée que les options suivantes	second rang (court terme)	Suppose une efficience technique élevée dans l'usage de l'eau. L'action sur le prix des produits (taxes) doit entraîner une diminution de la demande. en eau. A des effets ambigus à moyen terme (sous investissement).
Volumétrique : taux uniforme ou par tranche (taux croissants)	compliquée (pose et relevé des compteurs)	premier rang (court terme)	Permet d'adapter le tarif aux effets de seuils sur les prélèvements (impacts négatifs sur l'environnement plus que proportionnels aux prélèvements). Le système par tranche taxe davantage les gros utilisateurs que les petits.
Tarif binôme (charge fixe + au volume consommé)	assez compliquée	premier rang (long terme)	Type de tarif volumétrique avec charge fixe couvrant les coûts fixes de fonctionnement des infrastructures. La modulation des charges fixes permet d'améliorer l'équité sans détériorer l'efficacité du dispositif.
Marchés de l'eau : quotas concédés échangeables, "banques" de l'eau	difficile (coûts de transaction élevés, distorsions de concurrence)	premier rang (court et long terme)	Suppose un système de droits prédéfinis. Suppose aussi des instances juridiques, soit ad hoc : "Tribunal de l'eau", soit appuyées par un droit de l'eau opérationnel. Les banques de l'eau permettent de gérer les fluctuations des demandes d'une année à l'autre en retirant du marché les droits non utilisés une année humide. Les banques peuvent aussi faire de l'assurance sécheresse (encore à l'étude).

2.3.4.3. Solutions de second rang

La mise en œuvre effective de systèmes tarifaires se heurte à de nombreuses difficultés. La première et la principale de ces difficultés réside dans la quantité très importante d'information requise pour la mise en place d'une tarification socialement efficace. Il faut tout d'abord disposer de compteurs individuels pour mesurer la consommation. De nombreux pays, en particulier du tiers-monde, n'en disposent pas. Ensuite ces compteurs doivent être relevés régulièrement et correctement entretenus, l'eau circulant dans les systèmes irrigués n'étant généralement pas de même nature que l'eau potable relevée au compteur des ménages. Des systèmes de coercition sont à prévoir pour éviter les fraudes et le système tarifaire doit être administré. Tout ceci se traduit par des coûts de mise en œuvre qui peuvent être élevés. Tsur et Dinar (1997) ont comparé les performances d'un système de tarifs à la surface et au volume lorsque les coûts de mise en œuvre sont pris en compte. Dans le cas israélien, ils

concluent que bien qu'en principe moins efficace, le tarif à l'hectare domine le tarif volumétrique dès lors que les coûts de gestion du tarif dépassent 7,5% des revenus de la taxation. Ce niveau est bien en dessous de celui des frais d'administration des Agences de l'Eau françaises par exemple (de l'ordre de 20% d'après le rapport du CGP, 1997).
Des frais de gestion élevés ne doivent pas conduire à préférer systématiquement des systèmes inefficaces car ils sont peu coûteux à administrer. Il existe en France des impôts dont on sait qu'ils sont plus coûteux à percevoir que le produit fiscal qu'ils génèrent. Néanmoins, l'importance des coûts d'administration doit être prise en compte dans le bilan coûts-avantages collectif de la tarification.

La seconde difficulté résulte du caractère de bien public de la ressource en eau. La mise en place d'un tarif pour l'eau d'irrigation ne vise pas à simplement "économiser" de l'eau *per se*. Son but est en fait d'allouer la ressource à d'autres usages, en particuliers écologiques et patrimoniaux. Mais les bénéfices économiques liés à ces usages sont souvent mal connus et mal mesurés. Il s'ensuit des difficultés particulières pour fixer le tarif à un niveau permettant une bonne conservation des milieux et surtout pour justifier économiquement la mise en place du tarif vis-à-vis du monde agricole.

L'eau est un vecteur d'externalités multiples. Ces externalités concernent le plus souvent la qualité de l'eau. En principe avant de fixer un tarif pour l'eau, il convient de s'assurer que les externalités ont été au préalable correctement internalisées par des taxes ou des redevances, selon le principe pollueur-payeur. Si le tarif est justifié par des considérations de maintien d'un débit de dilution suffisant pour des polluants en rivière, il faut donc être sûr que les niveaux de pollution correspondants soient eux-mêmes économiquement optimaux. Dans le cas contraire, les irrigants seraient en fait contraints par le tarif à restreindre leurs prélèvements pour permettre aux autres usagers de ne pas avoir à réduire leurs propres émissions polluantes. Mais l'irrigation peut aussi être source d'externalités, en particulier lorsqu'elle s'opère à partir de ressources souterraines. Le cas le plus classique est celui de l'exploitation en accès libre d'une nappe souterraine. Chaque exploitant ne considérant que ses propres besoins sans tenir compte des autres, le prélèvement cumulé peut être tel qu'il conduit à la surexploitation et à l'épuisement de la nappe.

Un autre exemple célèbre est celui de la salinisation produite par l'irrigation en Israël et en Jordanie. Le pompage excessif en nappe provoque des intrusions salines en provenance de la Mer Morte et de la Mer Rouge. Pour combattre les effets néfastes de la salinité de l'eau employée pour irriguer, les irrigants augmentent les doses d'arrosage pour provoquer le lessivage du sel en surface, ce qui ne fait qu'accélérer l'intrusion du biseau salé dans la nappe (Xépapadeas, 1995). Dans ce cas le tarif doit être double : un première partie a pour fonction de réguler les prélèvements, la seconde partie, assise sur l'importance de la salinité a pour but de contrôler la dégradation de la masse d'eau. En pratique ces tarifications, lorsqu'elles existent, sont confondues. Cette confusion ne permet pas de dimensionner correctement les instruments de régulation.

La disponibilité de la ressource, comme les besoins en eau des plantes sont aléatoires et fluctuants. Un tarif optimal devrait prendre en compte ces phénomènes de fluctuations et d'incertitude. Ce n'est pas le cas en pratique. Le tarif devrait être périodiquement révisé et son niveau calculé en tenant compte des risques de rupture d'approvisionnement en cas de sécheresse. Il existe une littérature théorique importante sur ces questions (Easter et al., 1997 ; Tsur et Graham-Tomasi, 1991). Mais les problèmes d'implémentation posés par ces tarifs optimaux théoriques limitent très sérieusement leur faisabilité pratique.

Enfin, diverses considérations d'équité peuvent conduire à des systèmes de tarification qui bien qu'inefficaces paraissent plus justes socialement. Le principe de la tarification est de satisfaire en priorité les demandes des usagers les plus à même de payer pour la ressource, c'est-à-dire, bien souvent, des agriculteurs les plus riches. Gill et Sampath (1992) préconisent ainsi d'utiliser des distributions lexicographiques de prix avantageant les petits agriculteurs au détriment des plus importants. Toutefois, Tsur et Dinar (1995) font remarquer que l'essentiel des inégalités entre exploitants résulte de l'inégale répartition des terres. Ils concluent que chercher à réduire cette inégalité par des tarifs d'accès à l'eau plus faibles pour les petits agriculteurs n'aurait en fait que peu d'effets redistributifs comparativement à une politique de taxation foncière, beaucoup plus redistributive potentiellement.

2.3.4.4. Les marchés de droits

La mise en place de marchés de droits d'eau, en théorie efficients, se heurte aussi à de nombreuses difficultés. Easter et al. (1997) recense six préalables nécessaires à la mise en place de marchés de droits d'eau :

1. Un système institutionnel et juridique capable de définir des droits d'eau indépendants de la propriété foncière ;
2. L'existence d'une agence ou d'une administration particulière ayant autorité sur les échanges de droits d'eau au travers des marchés (autorité de surveillance du marché) ;
3. Une infrastructure d'approvisionnement adaptée à des transferts de droits géographiques ;
4. Les externalités résultant de l'action d'autres agents économiques sur le système eau doivent être internalisées au préalable ;
5. Des instances d'arbitrage indépendantes doivent être en charge de la gestion des conflits possibles entre usagers. A défaut, le droit de l'eau doit fournir un cadre juridique suffisamment solide aux tribunaux ordinaires pour leur permettre de trancher efficacement les litiges.
6. Les considérations d'équité et la prise en compte du long terme et du patrimoine naturel doivent être explicitement pris en compte par les autorités régulant le marché (l'eau est un bien public).

Pas plus en France que dans tout autre pays, développé ou en voie de développement, de telles conditions ne sont réunies. On a vu que le droit de l'eau en France ne fournit pas d'outils juridiques suffisamment précis pour permettre à des autorités judiciaires indépendantes de trancher les litiges entre usagers. Une législation spécifique est donc un préalable à l'instauration de marchés de droits d'eau. Par ailleurs l'instauration de l'équité dans l'accès à l'eau, tant à l'échelon intragénérationnel qu'intergénérationnel reste un problème très mal résolu (Bjornlund et Mc Kay, 1999).

L'enjeu est en effet ici de définir au préalable un système de droits de propriété privée sur la ressource, définissant des droits d'accès selon le type d'usage et entre les personnes pour une même catégorie d'usage. L'histoire montre que les droits d'eau sont de trois types : associés à la propriété foncière (droit de riveraineté), à l'antériorité historique (droit du premier occupant) ou de type public lorsque c'est l'administration qui gère la ressource (Holden et Thobani, 1996). Les problèmes posés par le droit de riveraineté comme par celui du premier occupant ont poussé historiquement les sociétés vers une gestion publique de l'eau assumée par l'Etat ou par des collectivités locales (Anderson et Snyder, 1997).

C'est ce modèle de gestion qui est actuellement en crise. Il en ressort des tentatives de réforme visant à décentraliser la gestion de la ressource au niveau des usagers au travers de systèmes de marchés de droits. Les études existantes montrent que cette transition ne se fait pas sans mal. L'administration, lorsqu'elle accepte la mise en place de ces marchés, assortit le droit à l'échange de toutes sortes de réglementations tatillonnes qui dans les faits empêchent le marché de fonctionner (Gisser M. *in* Anderson, 1983). Dans d'autres cas, le petit nombre de cambistes sur le marché favorise la collusion et les pratiques anti-concurrentielles (Vermillion, 1997). En revanche, pour Rosegrant et Scleyer (1996), le développement des marchés de droits d'eau est un phénomène relativement irréversible en raison de la mondialisation macroéconomique qui impose une décentralisation croissante des unités microéconomiques de production et de consommation et donc un retrait de l'Etat de l'administration de la ressource en eau. On note un intérêt croissant des économistes pour ce type de systèmes, une réaction aux difficultés pratiques de la tarification (Spulber et Sabbaghi, 1998).

Cet intérêt est favorisé par la mise en place progressive de marchés de droits d'eau un peu partout dans le monde. Ces marchés peuvent être purement locaux (échanges entre agriculteurs sur un quota fédéral annuel comme à Fort-Collins au Colorado), banques d'eau entre tous usagers (Californie et Idaho), échanges entre villes et agriculteurs (Utah, Arizona, Colorado, Nevada, Californie), transferts de bassins à bassins (USA, Australie). Les études montrent que trois facteurs critiques influencent l'efficacité de ces mécanismes : le pouvoir de monopole lorsque les offres de droits sont insuffisantes, les externalités exercées par des usagers situés en dehors du marché et l'imperfection des marchés

fonciers et du marché du capital. La plupart des études concluent néanmoins à une amélioration de l'efficacité du partage de la ressource et à une atténuation en parallèle des conflits d'usage dans la plupart des pays ayant tenté l'expérience, dès lors que des règles adaptées ont été mises en place pour pallier les faiblesses du système. Ces conclusions positives concernent l'Australie (Musgrave, 1997), le Chili (Hearne et Easter, 1998), le Mexique, le Pakistan, l'Inde, l'Espagne (Garrido, 1998) et le Canada.

2.3.4.5 Conclusions

La justification première des systèmes tarifaires comme moyen de réguler la demande en eau des irrigants est que, convenablement conçus et calculés, ils permettent de partager de manière collectivement efficace la ressource. Le peu d'applications pratiques de la tarification résulte de problèmes d'implémentation qui font des systèmes observés des approximations de second rang d'une tarification réellement incitative aux économies d'eau. Les systèmes de marchés de droits ont en principe les mêmes vertus d'efficacité que les tarifs. Mais ils sont eux aussi soumis à des problèmes d'implémentation. En pratique les marchés réels se présentent donc également comme des solutions de second rang. On voit que le choix entre tarifs et marchés de droits ne se joue pas au plan des principes : au premier rang, ils sont également efficaces. Ce choix résulte donc uniquement des problèmes spécifiques d'implémentation qu'ils soulèvent. Les marchés des droits supposent une législation adaptée et surtout une culture des droits de propriété, historiquement construite. La tarification suppose au contraire une culture historique de fiscalité publique.

C'est la raison pour laquelle divers experts pensent que si la tarification agricole de l'eau est possible en France, les marchés de droits d'eau sont impraticables. Ces systèmes de partage de l'eau par des marchés s'adapteraient plus facilement à des pays de tradition anglo-saxonne. La sophistication du droit français en matière de droits de propriété foncière et immobilière devrait conduire à tempérer ces affirmations hâtives quant à la relation culturelle des français aux droits de propriété. On conçoit aisément que des systèmes d'échange de droits reposent sur une confiance réciproque de la part des opérateurs, et donc que ces systèmes supposent des solidarités locales à l'échelle de bassins versants de taille réduite. Rien n'interdit donc d'imaginer à terme en France la coexistence des deux systèmes selon les spécificités du contexte local.

Références bibliographiques

Allain S., 2000a. La mise en place de systèmes de gestion volumétrique en Poitou-Charentes. Rapport INRA, AC3A, Paris.

Allain S., 2000b. Application de la loi sur l'eau et processus de négociation. Limiter l'irrigation sans nuire à la production agricole. *Gérer et Comprendre,* juin 2000, 20-30.

Allain S., 2002. La planification participative de bassin. Projet de recherche avec le Groupe Inter-Bassins SDAGE-SAGE. INRA, GAPP (ENS Cachan, CNRS). Vol. 1 + Vol. 2A et 2B. http://www.sitesage.org

Allain S., 2005. Décider de l'opportunité d'un barrage-réservoir ou construire une négociation territoriale explicite de la régulation politique du domaine de l'eau ? In Allain S. (coord.), Grujard J., Raulet-Croset N., « Décisions et délibérations dans les projets de barrage-réservoir vis-à-vis de la régulation politique du domaine de l'eau ». Rapport final pour le programme « Concertation, Décision, Environnement » du Ministère de l'Environnement. INRA, Institut Français de Géopolitique, CRG Polytechnique. Novembre 2005, 303 p. + annexes.

Allain S., Delacourt A., Garin P., Montginoul M., Rossignol B., Ruf Th., 1999. Gestion collective d'une ressource commune. 12 études de cas. Tomes I et II. ANDA, « Irrimieux », mai 1999.

Anderson T., Snyder P.S., 1995. *Water markets: Priming the invisible pump,* Cato Institute, Washington D. C.

Anderson T.L., 1983. *Water rights, scarce resource allocation, bureaucracy and the environment,* Pacific Institute for Public Policy Research, San Francisco, California.

Antle J.M., 1987. « Econometric Estimation of Producers' Risk Attitudes », *American Journal of Agricultural Economics* 69, 509-522.

Babcock B.A., 1992. « The effects of uncertainty on optimal nitrogen applications ». *Review of Agricultural Economics* 14 : 271-280.

Babcock B.A. et D.A. Hennessy, 1996. « Input demand under yield and revenue insurance ». *American Journal of Agricultural Economics* 78 : 416-427.

Barraqué B., 2002. "Les marchés de l'eau en Californie, modèle pour le monde ou spécificité de l'Ouest aride américain ? Première partie : la crise du partage du Colorado", in *Responsabilité et Environnement*, n°28, Octobre.

Bar-Shira Z., Just R.E. et D. Zilberman, 1996. « Estimation of farmers' risk attitude : an econometric approach ». *Agricultural Economics* 17 : 211-212.

Belhaj Hassine N. et A. Thomas, 2001. « Aversion au risque des agriculteurs et décisions de production : le cas de l'agriculture irriguée en Tunisie », *Economie Rurale* 266, 91-108.

Binswanger H.P., 1980. « Attitudes Toward Risk: Experimental Measurement in Rural India », *American Journal of Agricultural Economics* 62, 395-407.

Bjornlund H. et J. McKay, 1999, Do water markets promote a socially equitable reallocation of water ? A case study of a rural water market in Victoria, Australia. Article présenté à la 6ème Conference of the International Water and Resources Consortium, Hawaï.

Bontems P. et A. Thomas. 2000. Information value and risk premium in agricultural production under risk: the case of split nitrogen application for corn. *American Journal of Agricultural Economics* 82 : 59-70.

Bos M. G. et W. Walters, 1990, Water charges and irrigation efficiencies, *Irrigation and Drainage Systems*, 4, 267-278.

Bosch D.J. et V.R. Eidman. 1987. « Valuing information when risk preferences are nonneutral : an application to irrigation scheduling ». *American Journal of Agricultural Economics* : 658-668.

Botes J.H.F., Bosch D.J. et L.K. Oosthuizen. 1995. « The value of irrigation information for decision-makers with neutral and non-neutral risk preferences under conditions of unlimited and limited water supply. *Water SA* 21(3) : 221-230.

Botes J.H.F., Bosch D.J. et L.K. Oosthuizen, 1996. « A simulation and optimization approach for evaluating irrigation information. *Agricultural Systems* 51 : 165-183.

Brink, L. et B. McCarl. 1978. « The trade-off between expected return and risk among corn belt farmers ». *American Journal of Agricultural Economics* 60 : 259-263.

Buisson G., 2005. Les effets de la réforme de la PAC de juin 2003 sur la consommation d'eau par l'agriculture. Séries Etudes 05-E06. MEDD (D4E).

C.I.-Eau, 2005. Les Français et l'eau. 10 ans d'opinions et d'études (1995-2005). C.I.-Eau

Carraro Carlo et Lévêque François (Ed.), 1999. Voluntary Approaches in Environmental Policy. Series on Economics, Energy and Environment, Kluwer Academic Publishers, Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM).

Chavas J.P. et M.T. Holt, 1990. « Acreage Decisions Under Risk: The Case of Corn and Soybeans », *American Journal of Agricultural Economics* 72, 529-538.

Chavas J.P. et M.T. Holt, 1996. « Economic Behavior under Uncertainty: A Joint Analysis of Risk Preferences and Technology », *Review of Economics and Statistics* 78, 329-335.

Chohin-Kuper A., Montginoul M. et T. Rieu, 2002, Les outils économiques pour la gestion de la demande en eau en Méditerranée, rapport CEMAGREF pour le Plan Bleu, forum « avancées de la gestion de la demande en eau en Méditerranée », 3-5 Oct 2002.

Colby B., 1989, Estimating the value of water in alternative uses, *Natural Resources Journal*, 29, 511-527.

Costanza R. et al., 1997. 'The value of the world's ecosystems services and natural capital', 387 *Nature* 253.

Denozière P., 1985, L'Etat et les eaux non domaniales. Lavoisier, TEC& DOC, 1985

Dinar A. et A. Subramaniam, 1997, Water pricing experience: An international perspective, World Bank technical paper # 386.

Dinar A. et J. Mody, 2004, Irrigation water management policies: Allocation, pricing principles and implementation experience, *Natural Resource Forum,* 28, 112-122.

Easter K.W., Becker N. et Y. Tsur, 1997, Economic mechanisms for managing water resources : pricing, permits and markets, dans A. K. Biswas (ed) *Water Resources : Environmental Planning, Management and Development,* Mc Graw Hill, NewYork.

Easter K.W., Rosegrant M. W. et A. Dinar, 1998, The future of water markets: A realistic perspective, dans Easter, Rosergrant et Dinar, Eds, *Markets for water: Potential and performance*, Kluwer Academic Publishing, Boston.

Eeckhoudt L. et C. Gollier. 1992. *Les risques financiers*. Ediscience international.

Ehrlich I. et G. Becker. 1972. « Market Insurance, Self-Insurance and Self-protection ». *Journal of Political Economy* 6 : 623-648.

Feinerman E. et I. Finkelshtain. 1996. « Introducing socioeconomic characteristics into production analysis under risk ». *Agricultural Economics* 13 : 149-161.

Garrido A., 1998, Economic analysis of water markets in the Spanish agricultural sector : can they provide substantial benefits ? dans Easter, Rosegrant et Dinar, Eds, *Markets for water: Potential and performance*, Kluwer Academic Publishers, Boston.

Gazzaniga J.L., Ourliac J.P., Larrouy-Castera X., 1998 - L'eau : usages et gestion. Litec, Paris, 1998, 316 p.

Gill Z.A. et R. K. Sampath, 1992, Inequality in irrigation distribution in Pakistan, *The Pakistan Development Review*, 31(1), 75-100

Glachant M., 1995 – Les accords volontaires dans la politique environnementale : une mise en perspective de leur nature et de leur efficacité. Economie et Prévisions, n°117-118, pp. 49-60.

Groom B., C. Nauges, P. Koundouri et A. Thomas, 2006. « The story of the moment: Risk averse Cypriot farmers respond to drought management », *Applied Economics*, à paraître.

Guérin M. (coord.), 2005. Horizons 2020 : Conflits d'usage dans les territoires, quel nouveau rôle pour l'Etat ? Commissariat Général au Plan (Groupe Manon), mars 2005.

Hazell, P.B.R. 1982. « Applications of risk preference estimates in firm-household and agricultural sector models ». *American Journal of Agricultural Economics* 64 : 384-390.

Hearne R.R. et K. W. Easter, 1998, Economic and financial returns from Chile's water markets, dans Easter, Rosegrant et Dinar, Eds, *Markets for water: Potential and performance*, Kluwer Academic Publishers, Boston.

Hennessy D.A. et J. Roosen. 2003. « Tests for the role of risk aversion on input use ». *American Journal of Agricultural Economics* 85 : 30-43.

Holden P. et M. Thobani, 1996, Tradable water rights : A property rights approach for resolving water shortages and promoting investment, Policy Research Dissemination Center, WP n° 1267.

Institut de Sondage Lavialle, 2004 – Débat national sur la politique de l'eau. Synthèse du sondage national. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, avril 2004, 27 p.

Johansson R.C., Y. Tsur, T.L. Roe, R.M. Doukkali et A. Dinar, 2002. Pricing and allocation of irrigation water: A review of theory and practice. *Water Policy* 4, 173-199.

Just R.E. et R.D. Pope, 1979. « Production Function Estimation and Related Risk Considerations », *American Journal of Agricultural Economics* 71, 276-284.

Just R.E. et R.D. Pope. 1978. « Stochastic specification of production functions and econometric implications ». *Journal of Econometrics* 7 : 67-86.

Kemper K.E. et D. Olson, 2001, Water pricing : The economics of institutional change in Mexico and Ceara, Brazil, dans Dinar A. Ed, *The political economy of water pricing reforms*, Oxford University Press.

Lascoumes P., Valluy J., 1996 – Les activités publiques conventionnelles (APC) : un nouvel instrument de politique publique ? L'exemple de la protection de l'environnement industriel. *In Sociologie du Travail*, n°96, avril 1996, 551-573.

Leathers H.D. et J.C. Quiggin, 1991. « Interactions between agricultural and resource policy : the importance of attitudes toward risk ». *American Journal of Agricultural Economics* 73 : 757-764.

Musgrave W.F., 1997, Australia, dans Dinar et Subramaniam Eds, *Water pricing experience: an international perspective,* World Bank Technical Paper # 386.

Office International de l'Eau, 2004. Débat national sur la politique de l'eau. Synthèse de l'enquête papier et internet. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, avril 2004, 28 p.

Pope R.D. et R.A. Kramer. 1979. « Production uncertainty and factor demands for competitive firms ». *Southern Economic Journal* 46 : 489-501.

Ramaswani B., 1992. « Production risk and optimal input decisions ». *American Journal of Agricultural Economics* 74 : 860-869.

Reynaud A., 2006. « Modélisation de l'impact économique de la sécheresse sur les grandes cultures : Une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques pour la région Midi-Pyrénées. » Document de travail LERNA-INRA, Université de Toulouse.

Rinaudo J., Strosser P. et T. Rieu, 1997, Linking water markets functioning, access to water resources and farm production strategies : Examples from Pakistan, *Irrigation and Drainage Systems*, 11, 261-280.

Rosegrant M.W. et R.G. Schleyer ; 1996, Establishing tradable water rights : Implementation of the Mexican Water Law, *Irrigation and Drainage Systems*, 10, 263-279.

Saha A., C.R. Shumway et H. Talpaz, 1994. "Joint Estimation of Risk Preference Structure and Technology Using Expo-Power Utility", *American Journal of Agricultural Economics* 76, 173-184.

Salzman J., 'Creating Markets for Ecosystem Services : Notes from the Field', publié dans la *New York University Law Review*, vol. 80, 2005, pp 870-962

Savedoff W.D. et P.T. Spiller, 1999, *Spilled water: Institutional commitment in the provision of water services*, Inter-American Development Bank, Washington D.C.

Shah F. et D. Zilberman, 1991, Government policies to improve intertemporal allocation of water in regions with drainage problems, dans Dinar A. et D. Zilberman, Eds, *The economics and management of water and drainage in agriculture*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 637-660.

Strosser Pierre, Montginoul Marielle (2001), "Vers des marchés de l'eau en France ? Quelques éléments de réflexion", in *Annales des Mines, série Responsabilité et Environnement*, n°23, Juillet.

Thobani M., 1998, Meeting water needs in developing countries: resolving issues in establishing tradable water rights, dans Easter K.W. et alii, Eds, *Markets for water: Potential and performance*, Kluwer Academic Publishers, Boston.

Tsur Y et A. Dinar, 1997, On the relative efficiency of alternative methods for pricing irrigation water and their implementation, *World Bank Economic review*, 11, 243-262.

Tsur Y et T. Graham-Tomasi, 1991, The buffer value of groundwater with stochastic surface water supplies, *Journal of Environmental Economics and management*, 21, 811-818.

Tsur Y. et A. Dinar, 1995, Efficiency and equity considerations in pricing and allocating irrigation water, World Bank Policy Research Paper # 1460, Washington D. C.

Tsur Y., 2005, Economic aspects of irrigation water pricing, *Canadian Water Resources Journal,* 30(1), 31-46.

Vermillion D.L., 1997, Impacts of irrigation management transfers : A review of the evidence. IIMI Research Report 11, Colombo, Sri Lanka.

Von Neumann, J. et O. Morgenstern. 1944. *Theory of games and Economic Behavior*. Princeton University Press.

Wilson P.N., 1997, Economic discovery in federally supported irrigation districts: A tribute to W. E. Martin and friends, *Journal of Agricultural and Resources economics,* 22(1), 61-77.

Xépapadeas A., 1995, Quantity and quality managmenent of groundwater : an application to irrigated agriculture in Iraklion, Crete, NL 73.95 FEEM.

Zavaleta L.R., Lacewell R.D. et C.R. Taylor. 1980. « Open-loop stochastic control of grain sorghum irrigation levels and timing ». *American Journal of Agricultural Economics* : 785-792.

Annexe. Le critère d'espérance d'utilité

La théorie néoclassique en univers risqué présente une formalisation du comportement rationnel d'un agent en avenir incertain reposant sur l'hypothèse de l'espérance d'utilité. Ce critère suppose une représentation de l'incertitude de l'agent par une distribution de probabilités sur les états possibles du monde. Les préférences sont décrites par une fonction d'utilité à valeurs réelles. Les actions de l'agent sont modélisées soit par une distribution de probabilités sur leurs conséquences, soit par des applications de l'ensemble des états du monde dans celui des conséquences. Les actions sont alors comparées selon l'espérance mathématique de la fonction d'utilité.

Soit ! un ensemble fini et exhaustif d'états de la nature et $E = ((E_1), (E_2), ..., (E_n))$ une partition de ! . Soit $W = (w_1, E_1; w_2, E_2; ...; w_n, E_n)$ une variable aléatoire réelle représentant les niveaux de richesse de l'individu telle que $w_1 < w_2 < ... < w_n$. Nous supposons qu'est associée à chaque action *a* de l'agent une distribution de probabilités sur l'ensemble des états de la nature connue $P_a = (P(E_1) = p_{a,1}, P(E_2) = p_{a,2}, ..., P(E_n) = p_{a,n})$; une action est ainsi assimilée à une loterie dont les conséquences décrivent les richesses finales de l'agent.

L'agent classe les actions suivant l'espérance mathématique d'une fonction d'utilité sur les richesses. Représenter le comportement rationnel d'un agent face au risque par la maximisation de $\sum_{i=1}^{n} p_{a,i} u(w_i)$ pour une certaine fonction croissante $u()$ bornée constitue l'hypothèse de l'espérance d'utilité.

Ce critère s'appuie sur l'idée que des changements de niveaux de richesse ne provoquent pas nécessairement des modifications de la satisfaction procurée par cette richesse. Ainsi, pour apprécier des situations risquées, le décideur remplace les valeurs monétaires de la richesse finale par l'utilité de cette richesse finale. L'utilité peut donc être interprétée comme le passage de l'objectif (la richesse finale) à un niveau plus subjectif (celui de la satisfaction procurée). En termes techniques, l'utilité $u(w)$ est une transformation monotone croissante de la richesse *w*. Von Neumann Morgenstern (1944) propose une axiomatisation permettant de représenter cette fonction d'utilité. La rationalité d'un agent est définie par les trois axiomes suivants :

Axiome 1. L'agent a un préordre total défini sur l'espace des loteries. L'agent est indifférent à la façon dont les conséquences sont obtenues.

Axiome 2 (continuité). Si deux loteries ne sont pas équivalentes, on peut trouver une combinaison des deux qui soit arbitrairement proche de l'une ou de l'autre.

Axiome 3 (indépendance). Si une action a_1 est préférée à une autre a_2, tout couple de loteries $\tilde{a}_1, \tilde{a}_2$ composées à partir de a_1 et a_2 avec le même complément conduit au classement $\tilde{a}_1 > \tilde{a}_2$.

Sous les axiomes 1-3, il existe une fonction d'utilité continue croissante définie à une fonction croissante affine près telle que :

$$a_1 \quad a_2 \quad \# \quad \sum_{i=1}^{n} p_{a_1,i} u(w_i) \quad \sum_{i=1}^{n} p_{a_2,i} u(w_i)$$

La fonction $u()$ n'est pas unique.

Conclusions

En conclusion de ce travail, il est important d'en rappeler le cadre : la France n'est pas menacée d'aridité et il faut d'entrée différencier **la sécheresse, événement accidentel** mais dont l'occurrence peut augmenter, de **l'aridité, situation de pénurie d'eau structurelle** à laquelle font face d'autres pays. La sécheresse n'est pas un événement nouveau et l'analyse climatologique a bien montré que le 20e siècle tout entier était émaillé de sècheresses. La répétition récente du phénomène en 2003, 2004 et 2005, jointe aux prévisions de changement climatique qui indiquent une baisse de pluviométrie pour le sud de la France (même si les prévisions de pluviométrie sont moins fiables que celles concernant la température) justifient que l'on se préoccupe de la capacité de l'agriculture à s'adapter à une situation où la sécheresse deviendrait un événement plus récurrent.

La sécheresse ne provient pas de la seule pluviométrie. Elle est toujours le croisement du déficit pluviométrique cumulé, des conditions climatiques et des caractéristiques du milieu.

- Dans la **sécheresse édaphique**, ce croisement concerne la pluviométrie de la saison de végétation et les propriétés hydriques du sol (eau disponible) à l'échelle de la parcelle cultivée. Cette sécheresse affecte tous les agriculteurs (irrigants ou non) et les éleveurs.
- Dans la **sécheresse hydrologique**, ce croisement concerne la pluviométrie de l'automne et de l'hiver et les capacités de stockage du milieu à l'échelle d'un territoire, qu'il s'agisse de nappes phréatiques ou de ressources artificielles. Cette sécheresse affecte principalement les irrigants, mais aussi les autres usagers des ressources en eau.

Le périmètre de cette étude ne se limite pas aux seuls irrigants mais concerne bien l'ensemble des acteurs de l'agriculture, la part de l'agriculture non irriguée étant supérieure à 90% de la surface agricole utile.

Cette étude a un **double objectif** :

- **l'incidence de l'agriculture sur la ressource en eau**, bien public partagé avec d'autres usagers,
- **le maintien et le développement d'une agriculture confrontée à la sécheresse.**

L'analyse bibliographique conduite à cette fin a mis en évidence des consensus mais aussi des lacunes dans la bibliographie, qu'il s'agisse des publications scientifiques internationales ou d'études à caractère plus finalisé conduites à l'échelle régionale ou nationale.

- Les recherches se rapportent le plus souvent à l'aridité. Concernant les mécanismes physiologiques, la survie des plantes a été privilégiée par rapport à leur production en conditions de sécheresse compatible avec l'agriculture. De même, les recherches sur les systèmes de culture (assolements, successions culturales et itinéraires techniques) ont été le plus souvent menées dans des régions du globe à climat aride. Pour ce qui nous concerne, en agriculture pluviale, dans nos climats tempérés, nous avons affaire à des alternances d'années sèches et d'années normales. De même, en agriculture irriguée, nos systèmes de culture peuvent faire se succéder des cultures diversement irriguées ou non irriguées avec les arrières effets des unes sur les autres.
- Les études, à caractère physique, portant sur les bilans hydrologiques, ont été réalisées sur des sites particuliers à l'échelle de la parcelle, ou au mieux du petit bassin versant, renvoyant à des études ultérieures l'appréhension de l'incidence du croisement *"climats x sols x systèmes de culture"* sur le bilan hydrologique d'un bassin versant d'envergure. L'utilisation des modèles écophysiologiques pour réaliser de telles études, testée pour l'instant sur un nombre limité de cas illustratifs, demande de disposer de bases de données sur le croisement *"sols x systèmes de culture"*.
- Les mêmes remarques peuvent être faites quant aux études économiques ou sociétales. Elles concernent surtout des situations de fortes contraintes d'accès à la ressource et fort peu celles où la sécheresse reste un événement aléatoire qui doit être abordé comme un risque collectif.

1. Incidence de l'agriculture sur la ressource en eau

A l'échelle du territoire national, il est possible de donner un ordre de grandeur de la quantité d'eau restituée au milieu (drainage et ruissellement) : soit 360 mm, sachant que pour les 15 dernières années, les précipitations ont été en moyenne de 930 mm (avec un écart-type de 120 mm). Cette estimation, obtenue en supposant le sol uniformément couvert de prairie, est très proche de la règle classiquement enseignée : "**les deux tiers de la pluie servent, en moyenne annuelle, à l'évapotranspiration, le tiers restant s'en va à l'exutoire**". Bien entendu, cette règle ne correspond qu'à une moyenne à l'échelle du territoire et est susceptible de fortes variations à l'échelle locale en raison de la très forte hétérogénéité de la pluviométrie, des sols et de la profondeur exploitée par les racines.

Notons que tout essai de réduction de l'évapotranspiration, en jouant sur les propriétés de réduction de la transpiration des végétaux, aurait pour conséquence un réchauffement de la température de l'air en raison **du lien entre le bilan hydrique et le bilan énergétique de surface**. Pour une petite région comme la Crau, un écart de température de surface du sol de 20 à 25°C en juillet entre Crau sèche et Crau humide conduit à des écarts de température de l'air de l'ordre de 3°C. Ce lien physique entre sécheresse et canicule a contribué aux épisodes caniculaires marquants de 1976 et 2003.

Revenant au bilan hydrologique, dans les conditions réelles du milieu, l'échelle pertinente n'est pas l'échelle nationale mais bien **l'échelle du bassin versant**. Il n'y a pas de règle générale applicable pour préconiser des pratiques conduisant à telle ou telle valeur de restitution au milieu. Tout dépendra du **caractère endogène ou exogène de la ressource** en eau mobilisée. Pour l'illustrer, comparons deux régions françaises méridionales : le Sud-Est méditerranéen et le grand Sud-Ouest. C'est dans la première que le bilan Pluie – Evapotranspiration potentielle est le plus déficitaire et que l'irrigation à l'hectare est la plus forte (proche de 400 mm). C'est pourtant dans la seconde, où l'irrigation moyenne est inférieure de plus de moitié (environ 150 mm), que la question de la restitution au milieu est plus aiguë car, soit la ressource est totalement endogène (Charente-Poitou), soit les ressources exogènes aux zones cultivées (canal de la Neste en Midi-Pyrénées) sont plus modestes que celles apportées par le Rhône ou la Durance.

Ce point est important pour la mise en place de **négociations entre acteurs** : celles-ci doivent être conduites dans un **cadre contraint par des considérations d'ordre physique** qui résultent, à l'échelle du bassin versant, du croisement entre conditions climatiques, caractéristiques pédologiques, caractéristiques des réseaux hydrographiques, nature et importance des ressources en eau endogènes et exogènes.
La **restitution au milieu** s'exprime par : **D + R – I**, où D est le drainage vers les nappes, R le ruissellement et I l'irrigation. La relation entre ce terme et la totalité de la ressource (Pluie + ressources exogènes) que l'on souhaite atteindre est un préalable à toute étude ayant pour objectif de fixer des proportions de systèmes de culture dans le cadre d'accord de gestion volumétrique.

Si les ressources proviennent de nappes, on pourra raisonner la durabilité des pratiques par une **approche de type bilan de réservoir**. Le raisonnement sera pertinent à l'échelle annuelle car, pour descendre à une échelle temporelle plus fine, il faudrait disposer d'études hydrogéologiques tenant compte des temps de réponse des différents aquifères. Si les ressources proviennent de cours d'eau, le raisonnement ne pourra pas être tenu à l'échelle annuelle car le besoin d'irrigation est le plus fort au moment de l'étiage et de ce fait, c'est une **approche en termes de débit** et non plus de réservoir qu'il convient d'avoir.

Dans tous les cas, c'est bien sur un ensemble de systèmes de culture irrigués et pluviaux que le raisonnement doit porter. L'agriculture contribue en effet, via des systèmes de culture qui maintiennent le sol sans végétation active sur de longues périodes, à une réalimentation des nappes plus importante que celle résultant des surfaces non cultivées comme la forêt et la prairie. L'agriculture n'est donc pas exclusivement une consommatrice d'eau. En valeur relative par rapport aux surfaces naturelles, elle couple les deux rôles de consommateur et de contributeur. Dans les débats à engager à l'échelle du bassin versant, il existe ainsi une **interdépendance de fait entre l'agriculture irriguée et l'agriculture pluviale**.

Aussi, pour aller plus loin dans des conclusions sur ce sujet, il faut engager des études mettant en œuvre des simulations sur des bases de données croisant sols x climat x systèmes de cultures à l'échelle des territoires au sein desquels se posent les problèmes de gestion de la ressource en eau.

2. Maintien et développement d'une production agricole en conditions de sécheresse

Ce thème conditionne le premier car pour inviter l'agriculteur à s'investir dans la préservation de la ressource, il faut pouvoir lui présenter des modes alternatifs de production qui lui permettent d'assurer un revenu à son exploitation et de maintenir sa capacité à cultiver.

L'expertise a exploré deux pistes : l'amélioration des espèces cultivées ou pâturées, la mise en place de systèmes de culture et d'élevage aptes à assurer une production rentable tout en étant plus économes en eau.

2.1. La voie génétique

Il est important de bien faire la **différence** entre les résultats concernant la **survie** et ceux concernant la **production**. Si la survie des plantes est essentielle (par exemple pour la reprise de végétation herbacée après la sécheresse), ce qui intéresse principalement l'agriculteur, c'est une plante continuant à produire en conditions de sécheresse. Or, il n'est **pas de production possible sans transpiration du végétal**. Toute réduction drastique de sa consommation d'eau aurait pour effet non seulement d'augmenter le risque de stress thermique en augmentant la température du végétal, mais aussi de pénaliser la photosynthèse en raison des communautés de processus entre les échanges d'eau et de gaz carbonique. La tolérance à la sécheresse consiste donc principalement à optimiser les échanges d'eau et de carbone, plus qu'à insérer des gènes intrinsèques de résistance comme dans le cas de la résistance aux herbicides ou de la survie des plantes à l'aridité. Des marges importantes de progrès existent pour cette optimisation dans nos conditions climatiques, l'**amélioration génétique vis-à-vis de l'efficience de l'eau** (matière sèche formée par unité d'eau dépensée) n'ayant jusqu'ici été mise en oeuvre avec efficacité que dans des conditions d'aridité (comme en Australie pour des précipitations annuelles inférieures à 500 mm).

La sélection génétique menée ces vingt dernières années a abouti à des progrès de production en conditions sèches. En particulier, la sélection chez le maïs a permis une réduction de sa sensibilité à la sécheresse pendant la floraison (période critique) en améliorant le maintien de la croissance reproductive en conditions sèches. On pourrait donc dès maintenant envisager une réduction de l'irrigation pendant cette phase.

Les voies d'amélioration pour l'avenir passent par **trois stratégies** :

- La stratégie d'**esquive** consiste à déplacer les cycles culturaux dans l'année pour que les plantes soient soumises à des demandes évaporatives plus faibles (variétés précoces ou à cycle court). La plus faible sensibilité aux déficits estivaux est cependant accompagnée d'une réduction du rendement potentiel par suite de la plus faible valeur du rayonnement intercepté et donc, de la photosynthèse.
- La stratégie d'**évitement** consiste à réduire la transpiration par une réduction de la croissance. On diminue ainsi le risque de perte totale de rendement mais la réduction des échanges gazeux qui accompagne la réduction de la croissance conduit là aussi à une réduction du rendement potentiel. L'augmentation de la vigueur racinaire participe de cette stratégie ; elle a un coût en termes de biomasse investie et ne se justifie qu'en sol profond.
- La stratégie la plus prometteuse actuellement consiste au contraire à essayer de **maintenir de façon raisonnée la croissance pendant les périodes de sécheresse, en privilégiant les organes essentiels** pour la production. Cette "reprogrammation" de la plante met en jeu les signalétiques de stress, les mécanismes de croissance et l'ensemble du métabolisme de la plante. Elle sollicite conjointement les domaines de compétence de la génétique, de la génomique et de la modélisation.

En conclusion, s'il ne faut pas attendre de "miracles" de la génétique pour obtenir une production abondante en situation de sécheresse, des marges de progrès existent pour conférer à des espèces existantes des caractéristiques de tolérance. Pour disposer d'évaluations fiables de la tolérance à la sécheresse de variétés existantes ou à venir, il serait souhaitable de **mettre en place des protocoles standards d'évaluation** dans le cadre d'essais conduits lors des tests préalables à l'inscription des variétés.

2.2. La voie des systèmes de culture

Les cultures fruitières étant le plus souvent irriguées et situées principalement dans le Sud-Est, région de ressources en eau exogènes et abondantes, nous nous concentrerons sur les systèmes de culture annuels et les fourrages.

Notons tout d'abord que **l'élevage est plus sensible à la sècheresse que l'agriculture** *stricto sensu* pour deux raisons :

- pour une même sécheresse, à une baisse de production du blé de 20% pourra correspondre une baisse de production fourragère de l'ordre de 50%,
- la consommation des animaux étant peu plastique sur une longue période, l'autoprotection est indispensable pour l'éleveur s'il ne veut pas "décapitaliser" en réduisant son cheptel.

Malgré son effet bénéfique sur le plan phytosanitaire, la sécheresse a, de façon générale, un **effet négatif sur la culture** : levée tardive et irrégulière, enracinement médiocre, mauvaise utilisation des engrais, surface foliaire moins développée. Il en résulte une **production inférieure en quantité** (nombre de grains, remplissage des grains), l'effet étant variable sur la qualité (baisse de teneur en huile des oléagineux mais augmentation en protéines du blé par exemple).

Les possibilités d'adaptation ne se réduisent pas à l'irrigation. Elles concernent également l'agriculture pluviale, qui occupe plus de 90% des surfaces cultivées et qui est très directement affectée par cette sécheresse. Ces **adaptations passent par des changements de systèmes de culture** ou de leurs parts relatives, et par des adaptations d'itinéraires techniques au sein de ces systèmes.

Les systèmes intrinsèquement les moins vulnérables sont les **systèmes à base de cultures d'hiver** qui font coïncider le parcours phénologique de la culture avec les périodes de plus forte ressource (pluie) et de plus faible demande (évapotranspiration potentielle moindre).

Pour ce qui concerne les cultures d'été, il existe des marges de manœuvre par la stratégie d'"esquive" évoquée plus haut, par le biais de **variétés précoces ou à cycle court**. Ceci étant, les pistes les plus intéressantes sont celles offertes par des espèces couplant l'évitement (meilleur enracinement et/ou surface foliaire moins développée) et des caractères de tolérance.

Les deux espèces qui ressortent clairement sont le tournesol et le sorgho, espèces qui ont fait conjoncturellement l'objet des adaptations déjà réalisées par les agriculteurs lorsque l'annonce de la sécheresse a pu être faite suffisamment tôt.

Le **tournesol** est connu pour sa teneur en huile et ses possibilités d'utilisation bioénergétique. Plante en C3, il a des variétés précoces qui, ajoutant l'esquive à l'évitement et à la tolérance, en font un excellent candidat à un assolement alternatif en situation de sécheresse. Il est toutefois handicapé aujourd'hui par son défaut de productivité et par la faible marge brute induite.

Le **sorgho** cumule plusieurs avantages : thermophile dans un contexte de réchauffement climatique, il peut être cultivé en pluvial. Lorsqu'il est irrigué, il a des besoins en eau nettement inférieurs à ceux du maïs et malgré une production inférieure à ce dernier, la marge brute qu'il dégage n'est pas très éloignée en raison de la plus faible part des charges associées à sa production. Ses débouchés (potentiels sinon actuels) existent dans l'alimentation animale (les élevages espagnols et américains y ont recours). Le principal problème pour le maintien de la marge brute en situation d'augmentation de la production réside dans la **nécessité de structuration de la filière**.

Qu'il s'agisse du tournesol ou du sorgho ou de toute autre culture présentant des caractéristiques voisines, le bénéfice attendu concerne aussi bien la production (système d'autoprotection en situation de pénurie d'eau tant en pluvial qu'en irrigué) que la ressource en eau. En effet, pour le tournesol, la consommation d'eau est antérieure à la période aiguë de pénurie et pour le sorgho, même irrigué, elle est inférieure à celle du maïs pendant la période estivale.

S'agissant des **itinéraires techniques**, l'adoption des techniques de l'aridoculture (travail du sol réduit, apport de fertilisants au semis, forte réduction de la densité de semis) n'est pas justifiée dans les situations de sécheresse que nous connaissons actuellement. Si ces techniques s'avèrent efficaces occasionnellement, les effets restent marginaux. Néanmoins, selon la disponibilité en irrigation, les doses d'intrants chimiques et minéraux doivent être adaptées au potentiel de rendement accessible.

L'essentiel des améliorations attendues des itinéraires techniques portent sur les **doses** et le **rythme des apports** d'irrigation. Il faut à ce propos distinguer clairement les situations d'irrigation à partir de cours d'eau, de nappes alluviales, de lacs ou de canaux, de celles effectuées à partir de nappes phréatiques. Dans le premier cas, les outils existants d'optimisation des apports trouvent leur pleine application dans une économie d'eau qui bénéficie à la fois à l'agriculteur, dans la mesure où elle optimise la surface irrigable à partir de volumes d'eau fixés, et aux autres usagers, dans la mesure où elle permet de réduire les débits de prélèvements pendant les périodes d'étiage. Dans le cas du pompage d'eau de nappes, sans négliger l'intérêt pour la qualité de l'eau d'une irrigation plus économe, l'incidence des doses d'eau sur la gestion de la ressource peut être moins problématique puisque l'eau apportée éventuellement en excès retourne vers la nappe, dans un délai plus ou moins long cependant. Dans ce dernier cas, le maintien de la ressource en eau sur le long terme passe par le **couplage de l'optimisation des doses d'irrigation avec une action sur la répartition des différents systèmes de culture**.

Il n'existe **pas de règle générale pour répondre à la question du meilleur "panier" de systèmes de culture**. Le seul cadre pertinent à l'établissement d'une règle est le bassin versant, avec comme conditions déterminantes les réponses aux questions suivantes :

- quels sont la part et le mode d'utilisation des ressources en eau endogènes et des ressources exogènes ?
- quels sont les temps de réponse des aquifères mobilisés ?
- quels sont les temps de réponse des exutoires ?

Dans ce cadre, il est important d'insister sur le couplage des différents systèmes de culture au sein d'un même territoire à ressource en eau endogène : **la part et le type des systèmes pluviaux interviennent dans la gestion globale des ressources en eau** au niveau local, ce qui influe fortement sur les possibilités d'irrigation au niveau du bassin versant au même titre que la part et le type des différents systèmes irrigués (en irrigation totale ou en irrigation de complément).[1]

Pour chiffrer les bénéfices attendus de tel ou tel système pluvial sur le pourcentage allouable à des systèmes irrigués, il est nécessaire **d'entreprendre des études spécifiques** croisant les distributions **climat x sols x systèmes de culture**. Tout système de culture n'étant pas envisageable dans n'importe quel contexte pédoclimatique, l'établissement d'une base de données spatialisée sur les systèmes plausibles est un prérequis. Cela peut paraître lourd à mettre en œuvre, mais comment envisager d'engager des négociations entre acteurs sur des objectifs de gestion volumétrique sans se donner les bases physiques permettant de les atteindre ?

On peut conclure que retrouver une certaine **diversité dans les systèmes de culture** aurait un double intérêt :

- assurer une **autoprotection** de la production de l'agriculteur,
- permettre une **gestion améliorée de la ressource en eau**.

[1] Le raisonnement ne s'applique pas aux territoires à ressources en eau exogènes (grosso modo ceux desservis par les SAR - SCP, BRL, CACG), puisqu'il y a découplage entre agriculture irriguée et agriculture pluviale.

Pour cela, il est nécessaire d'assurer la rentabilité des systèmes alternatifs. Cela passe par des recherches de débouchés et des structurations de filières. C'est en effet parce que ces deux points ne sont pas pleinement satisfaits aujourd'hui que la diversification des systèmes de culture n'est souvent que conjoncturelle et disparaît une fois la situation apparemment redevenue normale.

3. Les voies d'action économique et politique

L'agriculteur et l'éleveur sont les premières victimes de la sècheresse puisque l'agriculture non irriguée représente plus de 90% de la SAU. Aider l'agriculture à s'adapter, c'est lui permettre d'être rentable tout en veillant à la meilleure utilisation collective de l'eau, en partageant de façon non conflictuelle la ressource en eau avec les autres acteurs de la société.

L'action publique peut envisager trois directions :

- l'augmentation de la ressource, ajustant l'offre à la demande,
- l'économie d'eau, ajustant la demande à l'offre,
- l'action compensatoire a posteriori via l'assurance publique ou privée.

Les deux premières ne sont pas mutuellement exclusives et peuvent être complémentaires. La construction de priorités entre elles ne peut s'envisager qu'à l'échelle territoriale par un croisement des caractéristiques du milieu et des spécificités territoriales et économiques de l'activité agricole.

A/ L'**augmentation de la ressource** par les barrages correspond à la vision traditionnelle de l'aménageur. Elle n'est pas du ressort de cette expertise, le Ministre de l'agriculture ayant demandé une étude parallèle sur le sujet. S'agissant des retenues collinaires, il est nécessaire d'établir au cas par cas la relation entre leur intérêt pour la production et deux points critiques :

- l'effet potentiel de l'augmentation de demande consécutive à l'augmentation de l'offre, reportant le problème à la prochaine sécheresse,
- les éventuels problèmes écologiques associés et, dans certains cas, les problèmes de sécurité pour les populations situées en aval.

B/ L'action de **compensation *a posteriori***, conduite au travers des indemnités versées par la commission des calamités agricoles ne relève pas de ce travail qui s'intéresse à l'adaptation structurelle possible à un événement circonstanciel mais récurrent. L'assurance privée constitue une option intéressante en cours de développement aujourd'hui. Elle ne saurait toutefois se substituer entièrement au fonds de calamités agricoles car son coût pour l'agriculteur est lié à la récurrence du phénomène et, surtout, nous n'avons pas affaire ici à un phénomène spatialement distribué comme dans le cas de la grêle et du gel. En effet, la sécheresse est fortement corrélée dans l'espace et cela se traduit par un coût d'indemnités élevé. Se pose alors le **problème de la réassurance**. En Espagne et aux Etats-Unis, c'est l'Etat qui prend à sa charge la plus grande partie du coût de la réassurance. L'implication des pouvoirs publics dans la réassurance en France passe par une négociation avec les assureurs et leurs réassureurs. Dans ce contexte, l'Etat doit tenter d'éviter d'alourdir sa charge financière, le développement inégal de l'assurance privée ne lui permettant pas d'abandonner entièrement son rôle d'assureur en dernier ressort au travers des fonds de calamités agricoles.

C/ Reste la troisième voie, celle de l'**ajustement de la demande à l'offre**. C'est sur ce point que nous avons porté notre attention pour identifier des marges de progrès, sans exclusive vis-à-vis de l'intérêt des autres voies d'action possible.

La première façon d'envisager une action de l'Etat dans cette direction serait de **ne pas favoriser la pratique de l'irrigation**. Le choix fait par la France, dans le cadre de la PAC avant 2003, de différencier les aides aux cultures irriguées a certainement contribué à l'accroissement de l'irrigation constaté entre 1994 et 2000. Inversement, le "découplage" à 75%, adopté en 2003 et entré en vigueur cette année, devrait contribuer à la baisse des surfaces irriguées.

La deuxième façon de diminuer la consommation en eau est le mode coercitif correspondant aux **arrêtés préfectoraux**. Il a un double inconvénient :

- un effet pénalisant fort pour les agriculteurs s'ils sont obligés d'interrompre l'irrigation à des périodes cruciales pour leur(s) culture(s). A ce propos, les agriculteurs apprécient les annonces précoces de sécheresse qui permettent de changer de cultures à temps, avec des pertes nettement inférieures à celles pouvant résulter des interdictions insuffisamment anticipées ;
- le fait de confier à une procédure, destinée à gérer des situations de crise, la mission de régler des conflits d'usage liés structurellement à des déséquilibres entre demandes et disponibilités du milieu en été. A cette gestion "à chaud" des problèmes devrait se substituer un traitement "à froid" conçu comme une recherche de solutions durables aux problèmes d'équilibre entre l'offre et la demande.

La troisième façon de réguler la consommation est la **tarification de l'eau**. Elle se justifie en particulier dans des situations de fort individualisme des irrigants, lorsque ceux-ci sont peu conscients des enjeux locaux de partage de l'eau à l'échelle du territoire. Elle peut avoir un impact très négatif à court terme si elle se cumule avec des pertes de revenu liées aux restrictions d'irrigation. Conçue sur le long terme, en revanche, elle a un rôle important à jouer dans le raisonnement des choix de systèmes de culture sur une base de rentabilité relative. L'objectif d'une telle tarification fixée à un niveau modéré, serait de fonctionner comme un **signal de rareté locale** de la ressource pour l'irrigant. La prise en compte de ce signal en amont des décisions d'équipement de périmètres et d'orientations culturales devrait ainsi permettre d'éviter des choix non viables au regard des possibilités hydriques du milieu. Des systèmes tarifaires plus élaborés pourraient permettre de moduler ce signal en fonction de la rareté de la ressource. De tels systèmes ne seront de toute manière acceptables pour les agriculteurs que dans le cadre d'une négociation et d'un effort important de communication et de transparence en direction des acteurs agricoles. Les règles tarifaires devraient être établies suffisamment tôt avant la campagne pour que les irrigants puissent les prendre en compte dans leurs choix d'assolement. L'expérience étrangère montre de nombreuses tentatives de mise en place de systèmes de **marchés de droits d'eau** (quotas transférables). Le bilan de ces expériences apparaît assez contrasté même s'il a permis certaines améliorations de la situation dans divers pays. De telles expériences "libérales" semblent aujourd'hui encore peu transposables à notre pays, de tradition juridique et politique très différente.

Une hypothèse de progrès réaliste à court terme consiste, dans le cadre d'une démarche d'accompagnement et de conseil, à favoriser la mise en place d'**accords de gestion volumétrique de l'eau**, à l'échelle du bassin versant, négociés entre parties prenantes sous les auspices de l'Etat. A l'inverse de la tarification qui vise à influencer les comportements opportunistes individuels des irrigants, cette démarche cherche à développer la **solidarité** des acteurs face à un problème commun, solidarité des irrigants entre eux comme avec les autres usagers de la ressource. A cet effet, il est important :

- de **favoriser la mise en place d'organisations d'irrigants** comme il en existe déjà chez nous et chez nos voisins espagnols ;
- de **fonder les accords sur des bases techniques** plus pertinentes comme support aux décisions politiques ou collectives. Ces bases biologiques et physiques reposent sur la notion de "restitution au milieu" développée précédemment. Cette restitution au milieu est beaucoup plus dépendante du jeu de systèmes de culture mis en place, irrigués et non irrigués, que d'éventuelles avancées biotechniques en raison du double lien entre bilan d'eau et de carbone et entre bilan d'eau et d'énergie.

En résumé, il nous paraît important de :

- **passer d'une action *a posteriori* à une action *a priori***,
- passer d'une action conjoncturelle d'ajustement (interdiction d'arroser, dérogation obtenue de l'UE pour pâturer des jachères…) à une **action structurelle** : gestion volumétrique négociée sur des bases politiques **et** physiques.

Pour cela, les pouvoirs publics pourraient :

- commanditer les **études nécessaires** à l'établissement de bilans hydriques de bassins versants à partir des croisements sols x climats x systèmes de culture,
- travailler avec **les organismes de développement et les agriculteurs** sur le principe d'autoprotection : un "panier" de systèmes de culture peut rapporter un peu moins qu'une monoculture irriguée en année normale mais éviter de fortes pertes en année exceptionnelle,
- veiller à la **sécurisation des filières** susceptibles d'offrir des débouchés rentables aux systèmes de culture alternatifs proposés,
- faire évoluer l'appareil législatif en levant les difficultés règlementaires et juridiques afin de **favoriser la mise en place de gestions volumétriques concertées**.

4. Besoins de recherche

Les bases physiques existent pour traiter la question de l'incidence des systèmes de culture et des itinéraires techniques associés sur le **bilan hydrique** à l'échelle de la parcelle. En revanche, pour les bassins versants d'ordre 2 et plus, on ne peut à l'heure actuelle que déterminer une incidence globale à l'échelle annuelle des croisements climats x sols x systèmes de culture en cumulant les effets à l'échelle parcellaire. Il est donc important de **poursuivre l'effort entrepris en hydrologie et en hydrogéologie** pour atteindre une véritable **intégration spatio-temporelle** du phénomène à l'échelle appropriée.

Dans le domaine de la **génétique**, en sus des travaux sur l'"esquive" et l'"évitement", il faudrait **appuyer les travaux entrepris sur la** "**reprogrammation**" pour obtenir dans le domaine de la production des résultats aussi importants que ceux obtenus sur la survie des plantes en conditions sèches.

En **écophysiologie**, un meilleur couplage des connaissances et des modèles de réaction des plantes avec les études génétiques et génomiques est une condition nécessaire à la réussite de celles-ci pour les principales plantes d'intérêt agronomique. L'évaluation écophysiologique du progrès génétique pour des espèces comme le maïs, le sorgho et le tournesol permettrait d'en connaître l'état actuel et, éventuellement, d'adapter les techniques aux cultivars concernés. Il serait, de plus, utile de "renseigner" les caractéristiques écophysiologiques des espèces bioénergétiques les moins classiquement étudiées (myscanthus, canne de Provence...) susceptibles d'intégrer des systèmes de culture alternatifs. De même serait-il nécessaire de **renforcer les études concernant les prairies** (potentialité de reprise et évolution de la biodiversité après la sécheresse).

Concernant **les systèmes de culture**, nous avons vu que les **situations de transition** entre aridoculture et culture pluviale en zone tempérée sont les plus difficiles à appréhender et les moins documentées. **L'effort engagé** par les instituts de recherche et les instituts techniques opérant conjointement dans le Sud-Ouest sur ce sujet **doit être poursuivi**. Il doit être soutenu par les atmosphériciens dans une recherche **d'amélioration des modèles météorologiques à moyen terme permettant une optimisation du choix des cultures d'été** dans le cadre de systèmes de culture en place. Il doit être accompagné d'une amélioration des prévisions à plus long terme concernant le **changement climatique sur le poste** "**pluviométrie**" dans les régions méridionales concernées afin **d'optimiser la part respective des assolements de cultures d'hiver et d'été** dans les systèmes de culture à mettre en place.

Enfin, concernant l'économie, un important besoin d'études apparaît au niveau de la micro-économie, tant au niveau de la **micro-économie des exploitations** qu'à des échelles plus vastes dans notre pays. Ces études devraient porter en priorité sur la connaissance des coûts et des bénéfices de l'irrigation et, plus généralement sur la **maîtrise économique des choix de systèmes de culture** et d'équipements techniques des périmètres irrigués. Elles devraient ensuite être étendues à la **gestion intégrée de l'utilisation de l'eau** par l'agriculture à l'échelle des bassins versants. Il sera en effet de plus en plus difficile de concevoir l'économie de l'irrigation sans s'interroger sur la place de l'irrigation vis-à-vis des autres usages de l'eau.

Répondre aux attentes des gestionnaires et des responsables de la politique de l'eau dans le contexte de la mise en place de la Directive cadre sur l'eau passe par la construction d'un savoir-faire adapté en matière d'analyses socio-économiques. Ces besoins de savoir-faire s'étendent de la conception de méthodologies adaptées à la mise à disposition des gestionnaires d'outils d'appui opérationnels tant pour leurs décisions que pour l'organisation de la concertation avec l'ensemble des utilisateurs de la ressource. Ils passent aussi par les produits de l'analyse de dispositifs d'acteurs et la réflexion socio-politique ou juridique.

Expertise scientifique collective "Sécheresse et agriculture"

L'utilisation de l'eau dans une agriculture durable :

le cas de l'Unité Hydrogéologique de la Mancha Oriental (Espagne)

Universidad de
Castilla La Mancha

Francisco Martín de Santa Olalla Mañas
Université de Castilla La Mancha, Albacete

1. Introduction

2. L'Unité Hydrogéologique de la Mancha Oriental

3. L'évolution des irrigations et de la demande d'eau. Les antécédents et la situation actuelle

4. La participation des usagers dans la gestion de l'eau.
Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental

5. Les outils techniques utilisés dans le processus de prise de decisions

5.1. Le Service de Consultation des Arrosages (SAR)

5.2. Une identification et un suivi des cultures par télédetection

6. Des défis et des incertitudes pour l'avenir

Références bibliographiques

1. Introduction

Le présent travail décrit les travaux réalisés dans les dix dernières années sur l'aquifère 08.29 de la Mancha Oriental en Espagne, avec l'objectif d'obtenir un usage durable de ses ressources hydriques. Cela représente un effort conjoint des administrations publiques et des usagers pour aboutir à cette fin. Bien que, comme nous le soulignons à la fin de l'exposé, le dernier objectif n'ait pas été atteint jusqu'à présent, nous pensons que les tâches développées, les méthodologies utilisées et les résultats obtenus peuvent être d'utilité en dehors du cadre où ils ont été mis en pratique.

Nous comprenons que le but qu'on essaie d'atteindre avec les travaux décrits diffère de celui qu'a le groupe d'experts de l'INRA.

Dans les conditions semi-arides d'une bonne partie du territoire de l'Espagne péninsulaire, l'agriculture pluviale acquiert un caractère de plus en plus marginal. Le changement climatique, qui peut avoir une influence sur une diminution significative des précipitations ajoute en plus un élément d'incertitude.

Dans ces territoires, seule une utilisation rationnelle de leurs ressources hydriques, chaque fois moins abondantes, peut permettre le développement d'une agriculture compétitive basée sur une irrigation soutenable. A cette réussite sont consacrés prioritairement les efforts actuels de tous ceux qui s'occupent de ces sujets. Il en résulte que notre apport s'oriente aussi dans cette direction. Nous ne pensons pas pouvoir faire une contribution éminente sur des échanges théoriques sur l'introduction de l'agriculture pluviale qui est de moins en moins compétitive dans notre environnement.

Nous voulons attirer l'attention sur deux aspects du travail que nous présentons qui nous semblent d'une utilité spéciale pour le groupe d'experts de l'INRA :

- Le premier est la **participation des usagers dans la gestion** des ressources naturelles, dans ce cas de l'eau. La dispersion géographique et temporelle de cette utilisation, les particularités dans la forme de réalisation des aménagements, parfois liés aux traditions séculaires, la diversité des cultures, des itinéraires techniques et des modes d'irrigation, et finalement, mais ce n'est pas moins important, la composante émotive que l'usage de l'eau dans l'agriculture comporte, invite à conclure que ceux qui doivent organiser la gestion sont les usagers eux-mêmes. Les expériences réalisées dans des lieux très dispersés de la planète avalisent cette théorie. Les résultats que nous présentons vont clairement dans ce sens.

- Le second est **l'utilisation** de quelques **technologies innovatrices** dans le **processus de prise de décisions** de la gestion soutenable des ressources hydriques. En ce qui concerne l'usage de l'eau et particulièrement dans les pays comme l'Espagne où le pourcentage de l'agriculture dans cette utilisation est élevé, il existe une perception sociale, de plus en plus répandue que l'agriculture abuse de la ressource hydrique, tant dans les aspects quantitatifs que qualitatifs. On ne peut pas nier qu'il existe des exemples qui appuient cette perception. Il est certain que cela a provoqué de nombreux désastres ; il n'y a aucune justification pour ces erreurs. Dans ces dernières décennies une culture technique et économique suffisante a été développée pour éviter un gaspillage de l'eau dans l'agriculture quand elle est peu abondante.

Aujourd'hui de nombreux outils ont été développés qui permettent un usage de l'eau dans l'agriculture compatible avec le développement durable que nous souhaitons. Nous allons présenter certains d'entre eux, utilisés dans la gestion des ressources de l'aquifère 08.29 dans la Mancha Oriental en Espagne.

2. L'Unité Hydrogéologique Mancha Oriental

L'Unité Hydrogéologique Mancha Oriental (UHMO) est traitée par la Confédération Hydrographique du Júcar (CHJ) et appartient au sous-ensemble dénommé Système Júcar. Elle comprend l'ensemble des ressources hydriques, aussi bien les superficielles que les souterraines, localisées dans l'aire

géographique que montre la figure 1. Parmi ces ressources 08.29, celles correspondant aux parties souterraines de l'aquifère ont une importance spéciale. L'unité a pour élément de drainage principal la rivière Júcar, bien qu'il existe d'autres voies superficielles d'une importance mineure.

L'aquifère 08.29 a une superficie proche de 8.500 km^2 et constitue l'une des réserves les plus importantes d'eau souterraine de l'Espagne. Une étude réalisée par l'Institut Géologique et Minier de l'Espagne (IGME) estime ses réserves totales à 100.000 hm^3 et les réserves disponibles à 20.000 hm^3 (IGME, 1980). Malheureusement, après le processus intensif d'exploitation qu'il a subi dans les vingt dernières années, remarquablement supérieur à sa recharge, les réserves utiles de l'aquifère, qui n'ont pas été scientifiquement réévaluées, sont nécessairement nettement inférieures au chiffre déjà indiqué (Martin de Sainte Olalla, 2001) bien qu'il existe de nombreux travaux dans lesquels on estime la recharge annuelle de l'aquifère. Une compilation des ces travaux pourra être trouvée dans Fernand Mejuto (2002).

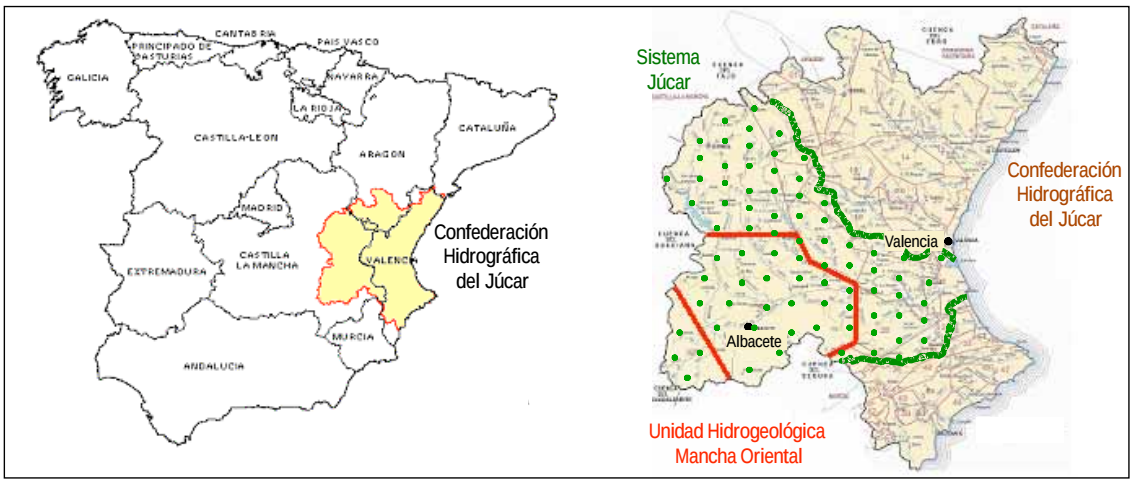


Figure 1. L'Unité Hydrogeológica Mancha Oriental (UHMO) (CHJ, 2004)

Les caractéristiques agroclimatiques de l'UHMO, selon la classification de Papadakis, sont : un climat Méditerranéen Tempéré (Met), un hiver type *Avoine Frais* (av), un été *Maïs* (M), un régime thermique *Tempéré chaud* (TU) et une humidité *Méditerranée sèche* (Je). Selon l'index de classification de l'UNESCO, exprimé comme le quotient entre la précipitation et l'évapotranspiration potentielle, il s'agit d'un climat semi-aride (figure 2).

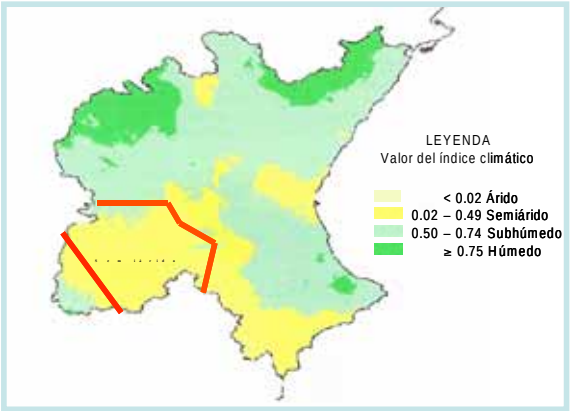


Figure 2. L'index d'humidité de l'UNESCO dans la CHJ (Estrela, 2003)

L'ample étendue de la zone d'étude fait qu'il existe deux zones clairement différenciées en ce qui concerne le pluviometríe, comme on peut le voir sur la figure 3, le volume des précipitations étant compris entre 300 et 500 mm par année.

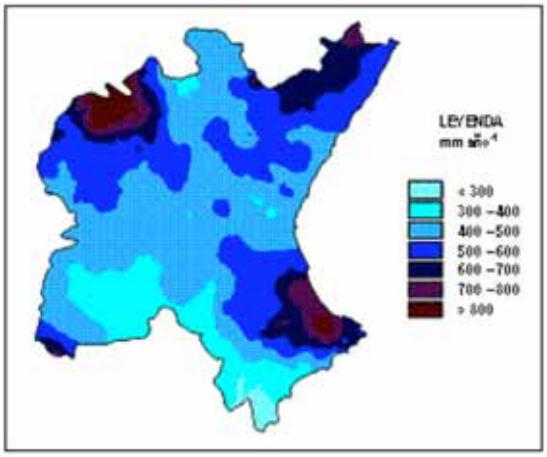


Figure 3. Précipitations moyennes sur la CHJ (Estrela, 2003)

La distribution des ressources hydriques du Système Júcar pour différentes utilisations est présentée dans le Plan Hydrológico del Júcar (PHJ, 1999). Dans la référence à l'UHMO, et plus concrètement pour l'aquifère 08.29, ce document reprend les assignations suivantes :

- Les irrigations situées dans l'enceinte de l'aquifère de la Mancha Oriental reçoivent une attribution des eaux souterraines de 275 hm^3 par année nets, équivalents à une extraction brute de 320 hm^3 par année (article 24. B. des assignations).

- L'objectif de substitution des eaux de pompages de l'aquifère de la Mancha Oriental par des eaux superficielles fixe un maximum de 80 hm^3 par année. Cette substitution implique la fermeture des puits affectés. En plus, on établit une réserve de 65 hm^3 par année, liée à cette **suppression** de pompages, par une consolidation d'irrigations et le développement possible de nouvelles irrigations dans la zone (article 24. C, réserves).

- Les déversements calculés pour le maintien du débit écologique des eaux de la rivière Júcar à'Alarcón devront être d'un minimum de 2 m^3/s.

Il est impossible d'alimenter l'aquifère avec le niveau actuel d'extractions. La substitution de pompages par des eaux superficielles, comme il est indiqué dans le PHJ, a pour but d'inverser cette situation. En 2003, on n'a utilisé que 24 hm^3 sur l'ensemble constitué par les 80 hm^3 dédiés uniquement à cette tâche, ainsi que par la partie correspondante de 65 hm^3 avec lesquels on envisage de consolider les irrigations existantes et de développer des nouvelles. Ceci est une conséquence de l'insuffisance de l'infrastructure existante dans l'enceinte de l'aquifère. Depuis le début de l'année 2004, on dispose d'une capacité structurelle de 30 hm^3 qui pourra correspondre à une substitution équivalente pourvu qu'il y ait les ressources nécessaires (CHJ, 2004b ; JCRMO, 2004).

3. L'évolution des irrigations et de la demande d'eau. Antécédents et situation actuelle

Le développement de la surface d'irrigation a été spectaculaire depuis 1975 jusqu'a la fin de la décennie passée, en constituant sans doute une source de développement important dans la Région. Ce développement a entraîné une consommation accrue d'eau, comme il est indiqué dans la figure 4.

Comme nous l'avons indiqué, les consommations, particulièrement pendant les quinze dernières années, et dans l'ensemble de l'Unité Hydrogéologique, ont été si élevées que cela a produit des extractions supérieures à sa recharge. Pendant cette période une augmentation spectaculaire de la demande a coïncidé avec quelques périodes importantes de sécheresse comme on peut le voir dans la figure 5.

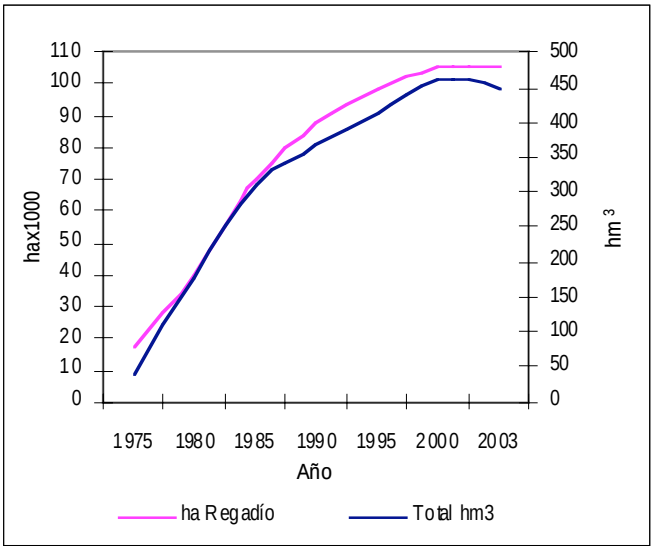


Figure 4. Evolution des irrigations et de la consommation d'eau dans l'Unité Hydrogeológica Mancha Oriental. (Montoro et al., 2005)

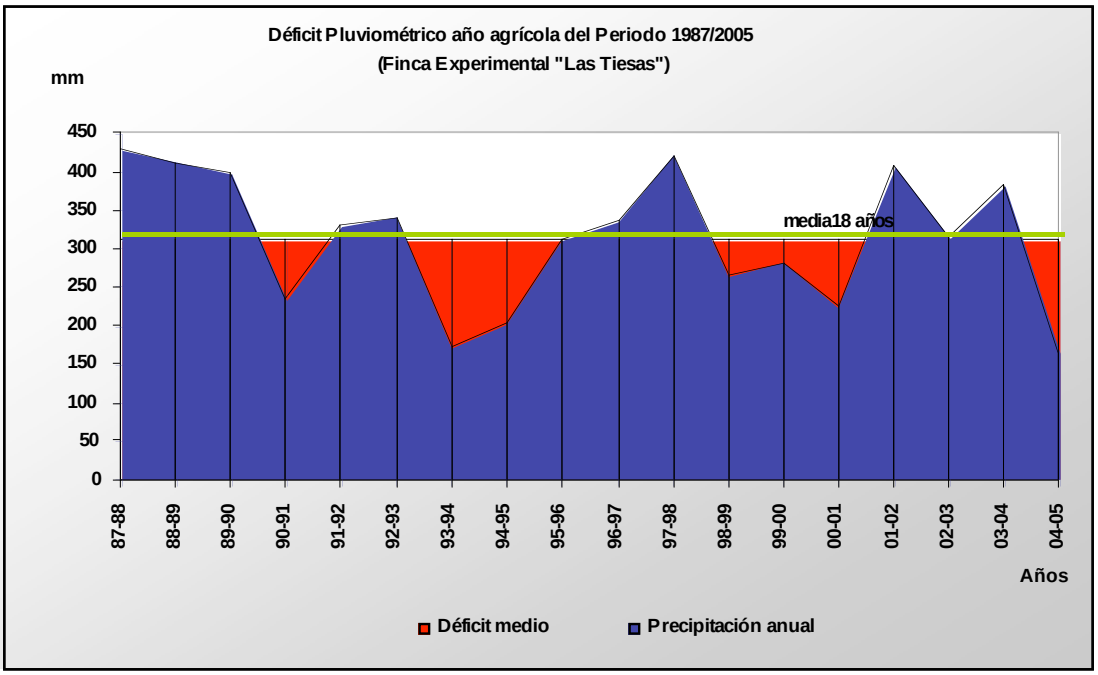


Figure 5. Déficit pluviométrique pour la période 1987-2005. (Montoro et al., 2005)

Les descentes des niveaux piezométriques ont dépassé en moyenne le mètre et demi annuel, bien que dans quelques zones, ce chiffre ait doublé. La figure 6 montre la descente subie dans les dernières années, pour les onze unités de l'ensemble de l'aquifère divisées par l'IGME.

Pendant l'année 2004, particulièrement pluvieuse, 108.539 ha ont été irrigués sur l'ensemble de l'Unité avec une consommation estimée de 363 hm^3. De ceux-ci, 314,6 hm^3 provenaient d'eau souterraine. Avec une distribution similaire de cultures en 2005, année extrêmement sèche, la consommation estimée a été de 482 hm^3 dont 444,1 hm^3 provenaient d'eau souterraine. Les données sont portées sur les tableaux 1 et 2.

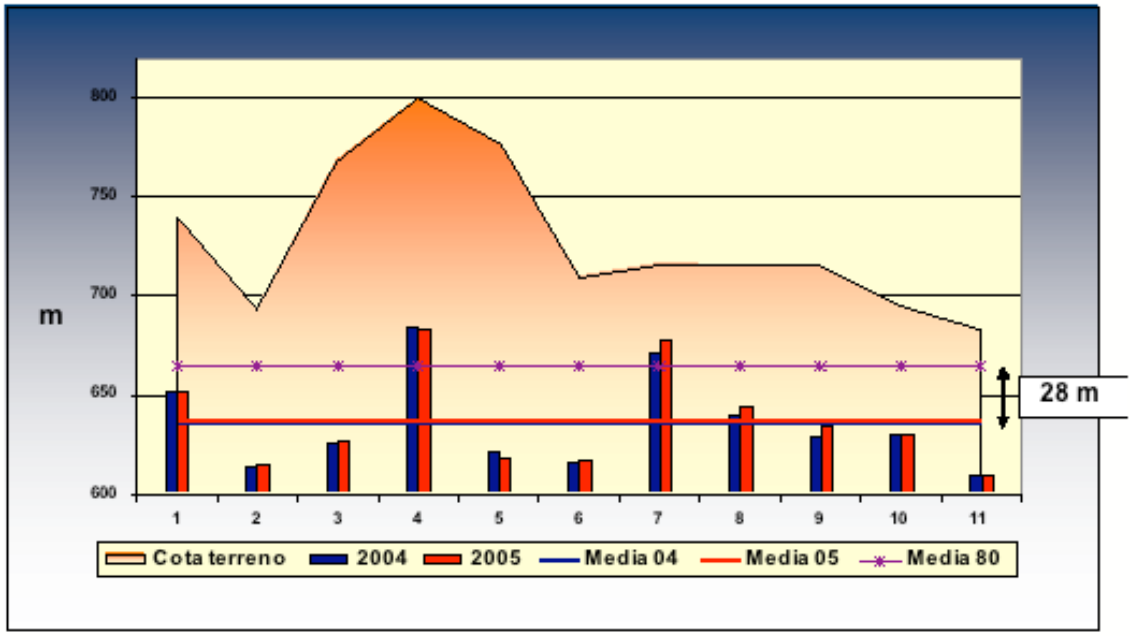


Figure 6. La descente moyenne des piézomètres de l'aquifère 08.29 de 1980 jusqu'à 2004. (Montoro et al., 2005)

Tableau 1. La distribution de cultures et de la consommation d'eau dans l'Unité Hydrogeológique Mancha Oriental en 2004 et 2005. (Montoro et al., 2005)

	2.004			2.005		
	Surface dans l'Unité (ha)	Consommation d'eau pour irrigation (m^3/ha)	Total consommation dans l'Unité (hm^3)	Surface dans l'Unité (ha)	Consommation d'eau pour irrigation (m^3/ha)	Total consommation dans l'Unité (hm^3)
Blé	16.233	2.450	40	15.942	4.170	66,5
Ail	6.236	2.130	13	4.801	3.700	17,8
Colza	182	1.900	0	45	3.680	0,2
Pavot	3.900	1.460	6	3.362	3.200	10,8
Avoinne et d'autres céréales d'hiver	788	2.200	2	1.077	3.250	3,5
Orge	16.317	2.270	37	16.986	3.300	56,1
Pois et d'autres proteagineuses	1.171	1.900	2	1.419	3.250	4,6
Pois vert	1.506	1.570	2	1.685	3.040	5,1
Jachère	9.349	0	0	11.930	0	0,0
Total cultures d'hiver	**55.682**		**102**	**57.248**		**164**
Luzerne	8.161	6.500	53	8.008	9.011	72,2
Betterave	3.500	6.000	23	3.388	7.770	26,3
Pomme de terre	1.087	5.010	5	1.086	6.300	6,8
Maïs	19.684	6.000	117	18.641	7.061	131,6
Oignon	6.802	4.320	29	6.239	5.990	37,4
Maïs doux	1.547	5.000	8	941	5.006	4,7
Kenaf	54	4.320	0	0	-	-
Tournesol	1.078	4.000	4	1.154	4.310	5,0
Haricot	790	2.250	2	628	2.510	1,6
Outres cultures	4.251	3.000	13	5.118	3.600	18,4
Total cultures d'été	**46.954**		**254**	**45.203**		**304**
Vigne				7.450	1.500	11,2
Olivier				582	1.500	0,9
Amandier				329	1.500	0,5
Autres cultures ligneuses				367	2.000	0,7
Total cultures ligneux	**5.903**		**6**	**8.727**		**13**
TOTAL CULTURES	**108.539**		**363**	**111.178**		**482**

Tableau 2. Origine de l'eau consommée dans l'Unité Hydrogeológique de la Mancha Oriental. (Montoro *et al.*, 2005)

Année 2004		Année 2005	
Origine de l'eau	m^3/an	Origine de l'eau	hm^3/an
Eau souterraine	**314,6**	Eau souterraine	**444,1**
Substitution de pompages	**22,4**	Substitution de pompages	**27,9**
Systèmes d'irrigation traditionnels (eaux superficielles)	**26**	Systèmes d'irrigation traditionnels (eaux superficielles)	**10**
TOTAL	**363**	TOTAL	**482**

L'évolution des cultures d'irrigation pendant les vingt dernières années a été particulièrement intéressante. Entre 1985 et 1990, la culture de maïs est arrivée à occuper une surface proche de cinquante mille hectares à la période de prix les plus élevés de cette céréale. Aujourd'hui, une différenciation importante de cultures s'est produite comme nous le montre le Tableau.

Cette différenciation s'est produite dans un double sens :
- à l'intérieur des cultures qui reçoivent une subvention de la Politique Agricole Commune (PAC), une diminution des cultures d'été et une augmentation de celles d'hiver ;
- dans l'ensemble des cultures, une diminution de celles qui reçoivent une subvention de la PAC et une augmentation de celles qui ne la reçoivent pas. Dans ce dernier groupe les cultures horticoles et ligneuses augmentent d'une manière significative.

En 2005, seize cultures ont dépassé les mille hectares de surface, le maïs étant celle qui a occupé la plus grande étendue. L'orge et le blé ont dépassé les quinze mille hectares. Le gel de terres, obligatoire et volontaire, dépasse les onze mille hectares, en quatrième position en étendue, suivi par la luzerne.

C'est à grands traits, la situation actuelle de l'exploitation de l'aquifère. Malgré le succès de quelques mesures prises au cours des dernières années, surtout grâce aux politiques développées par la Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental (JCRMO), le maintien de son niveau donne l'impression d'être sérieusement compromis. Réussir à équilibrer l'Unité est le défi le plus important auquel on doit faire face au cours des prochaines années, tant de la part de l'administration hydraulique que de la part des utilisateurs.

4. La participation des utilisateurs dans la gestion de l'eau. La Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental

L'ordonnance juridique espagnole recommande à l'Administration Publique la gestion du domaine public hydraulique, celui-ci lui appartenant depuis la promulgation de la Loi des eaux souterraines de 1985. On peut confier par des conventions ou par d'autres procédés aux utilisateurs, partiellement ou en totalité, la gestion des eaux qu'ils utilisent. Le Comité directeur Marco de l'Union Européenne (le Comité directeur 2000/60/CE) établit une gestion intégrale et intégrée de l'eau, en faisant référence à ce type de participation. Dans le cas de l'irrigation, ses caractéristiques spéciales conseillent d'agir de cette façon. De nombreuses expériences internationales le conseillent également, malgré l'existence de quelques échecs (Chandler, 1994 ; Blackmore, 1995 ; Humphries et Robinson, 1995 ; Maaren et Dent, 1995 ; Aragonés *et al.*, 1996).

Pour la gestion de l'aquifère 08.29, on a suivi ce principe. En 1994 est née la Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental (JCRMO). La forme juridique qu'elle a adoptée l'a transformée en Corporation de Droit public affectée à la Confédération Hydrographique du Júcar.

Elle est née avec un double objectif. D'un côté traiter les aménagements hydriques à l'intérieur de son enceinte en collaboration avec la CHJ de façon à obtenir une utilisation durable des ressources. De

l’autre représenter et défendre les intérêts collectifs de ses adhérents devant les autorités publiques et privées en ce qui concerne l’utilisation de l’eau.

Dans la première phase de sa vie, jusqu'à l'approbation du Plan Hydrologique du Júcar en 1997, ***les adhérents présentaient uniquement des revendications puis, au fil du temps, ils se sont investis de plus en plus dans la gestion***. Avec ces travaux on a clairement vu qu’il n’est possible de mettre en œuvre efficacement ces activités qu’au travers d’une bonne collaboration avec l'administration publique, dans notre cas la Confédération Hydrographique du Júcar où les usagers sont représentés par la JCRMO.

Pour sa meilleure compréhension, nous avons structuré ces tâches en **cinq grandes procédures**.

La première procédure se rapporte au développement des travaux qui conduisent à la connaissance des utilisations de l'eau dans l'aquifère. On inclut dans cette partie l'Inventaire d'Irrigations et sa caractérisation du point de vue administratif, comme technique. Depuis que l'inventaire a été établi, on l’actualise en permanence.

Les outils dont elle a disposé dans cette première phase ont été : le Cadastre Rural Numérisé, disponible pratiquement dans toute la zone d'arrosage, les propres dossiers administratifs de la CHJ, de l'identification et du suivi de cultures au moyen des techniques de télédétection et les visites sur le terrain pour valider l'information obtenue.

La mise au point des techniques de télédétection, réalisée par le Département correspondant de l'Institut de Développement Régional (IDR) de l'Université de Castilla-la Mancha, a été un processus particulièrement utile pour la prise de décisions dans la gestion de l'eau. Nous nous rapporterons à elles plus tard. Comme exemple des résultats qu'il permet d’obtenir, la figure 7 montre l'évolution des irrigations dans une zone de l'aquifère entre les années 1985 et 1997.

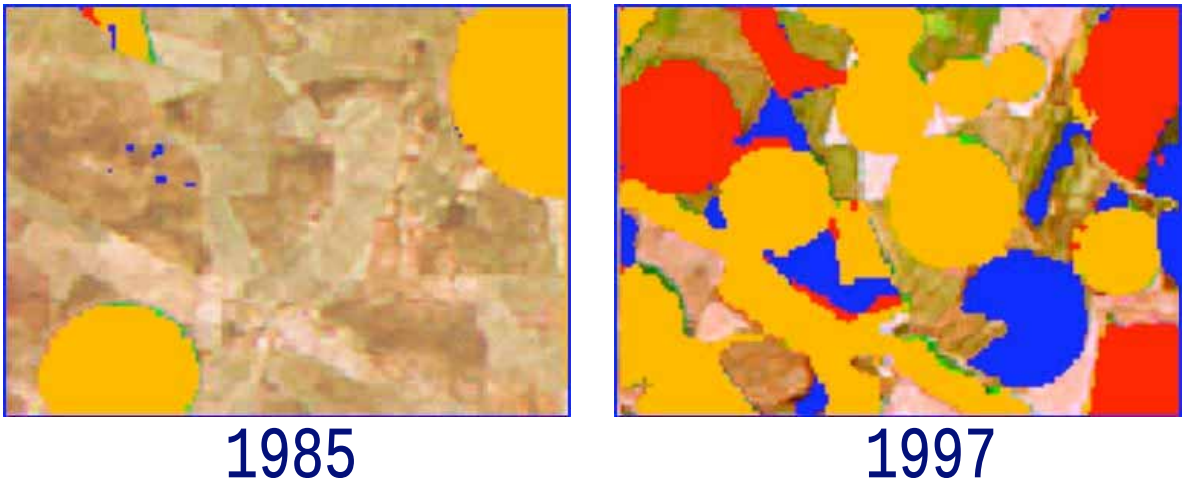


Figure 7. Exemple d'évolution de la surface irriguée obtenue par télédétection. Source : IDR (UCLM)

La **deuxième procédure** a pour but de définir les ensembles de parcelles cadastrales dans lesquelles la gestion de l'eau est réalisée de façon unitaire étant donné qu'on dispose des infrastructures nécessaires communes. Nous les avons dénommées Unités de Gestion Hydrique (UGH). Ces UGH peuvent appartenir à un ou plusieurs propriétaires, et évidemment le même propriétaire peut appartenir à plusieurs UGH. La figure 8 montre un exemple.

A chacune de ces unités on a assigné, conformément à ce qui a été établi par le Plan Hydrologique du Júcar, un volume d'eau qui est le maximum qu’elle peut utiliser dans son Plan d'Exploitation. De cette façon, chaque usager dispose d'un document qui accrédite ses droits d'usage de l'eau, comme un droit privé, avec inscription dans le Registre (Contrôle) ou le Catalogue ou bien comme une Concession Administrative.

Les instruments qui ont été utilisés dans cette procédure sont : l'inventaire d'irrigations et d'exploitation et le Cadastre Rural Numérisé et, de manière très spéciale, les données obtenues par télédétection sur l'évolution historique des cultures qui ont été irriguées dans ces parcelles.

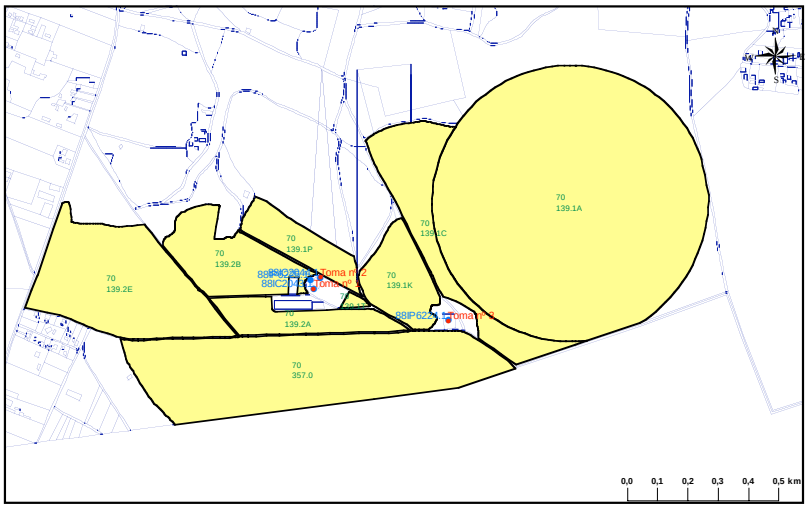


Figure 8. Un exemple d'Unité de Gestion Hydrique (UGH). Source : JCRMO

La troisième procédure de travaux a eu comme objet de limiter la consommation de chaque exploitation au maximum admissible. On a atteint cet objectif à travers des Plans d'Exploitation de l'aquifère qu'établit annuellement la Junta et qui correspondent à une mesure d'autorégulation que les utilisateurs s'imposent. Une fois assigné à chaque utilisateur un volume de l'eau qu'il peut utiliser dans les UGH qu'il gère, celui-ci établit son propre Plan d'Exploitation applicable à cette surface et le présente à la JCRMO pour son visa.

Les outils utilisés dans cette procédure ont été d'un côté l'analyse de la situation de l'aquifère, particulièrement l'évolution de ses niveaux piezométrques, les besoins d'eau des cultures, établies par le Service de Consultation d'Arrosages et les données apportées par l'utilisateur lui-même sur sa proposition de distribution de cultures dans son exploitation. Récemment on a commencé à utiliser un modèle de gestion de l'aquifère mis au point par L'Université de Castilla la Mancha et la Confédération Hydrographique du Jucar.

Tous les processus de gestion antérieurement décrits seraient inefficaces si l'on n'établissait pas les mécanismes adéquats de contrôle, qui vont nous assurer l'utilisation correcte.

Ce contrôle doit être réalisé d'une part par la propre Confédération Hydrographique, fondamentalement au travers de son service de garde, et d'autre part par La Junta de Regantes par l'intermédiaire du Jury des Arrosages. Cette activité de contrôle constitue la **quatrième procédure** des tâches que nous commentons.

Il est important de vérifier deux points :
- de la part de La Junta de Regantes, l'accomplissement du Plan d'Exploitation,
- de la part de la Confédération Hydrographique du Júcar, la vérification de l'irrigation par ceux qui ont le droit de le faire.

La tâche d'inspection est évidemment la moins agréable de toutes celles que doit aborder la JCRMO, mais précisément par respect pour ceux qui suivent la norme et qui représentent une grande majorité, c'est un devoir indispensable de la réaliser.

La cinquième procédure des rôles conjoints développés par la JCRMO et la CHJ a été la mise en marche du processus de ***substitution*** aux pompages. Comme nous l'avons indiqué, le Plan Hydrologique du Júcar prévoit que, dans une première phase, un volume de 80 **hm^3** prélevé dans les eaux souterraines doit être remplacé par la même quantité en provenance des eaux superficielles. Sa

mise en pratique conduit à doter les systèmes d'irrigations pompant aujourd'hui dans l'aquifère des infrastructures nécessaires, aujourd'hui clairement insuffisantes. Cette substitution des eaux souterraines par des eaux superficielles est un élément clef pour le maintien de l'ensemble, comme de nombreuses études l'ont mis en évidence et parmi elles, quelques modèles développés par l'Université de Castilla la Mancha (Martin de Santa Olalla et al., 2005). La collaboration entre les deux institutions s'avère être un élément des plus efficaces pour conduire cette tâche à terme.

5. Les outils techniques utilisés dans le processus de prise de décisions

La gestion suppose une prise pratiquement permanente de décisions. Ces décisions doivent être aujourd'hui appuyées sur des outils fiables, un aspect sur lequel on a beaucoup avancé au cours de ces dernières années.

Pour le cas dont on parle, l'Université de Castilla la Mancha (UCLM) et l'Institut Technique Agronomique Provincial (ITQP) ont développé et mis au point nombre de ces outils. Nous avons dû forcément sélectionner certains dans cette présentation. Dans cette sélection nous avons essayé d'insérer des éléments novateurs d'une utilité avérée.

Bien que le Service de Consultation des Arrosages ait une structure que nous pouvons qualifier de conventionnelle, dans son processus d'actualisation permanente elle incorpore de façon permanente des nouvelles technologies avec l'information qu'elles fournissent et sa diffusion. On peut penser que l'aspect le plus nouveau apporté cette année est l'obtention de l'évapotranspiration de la culture au moyen de la télédétection. Cette technologie est mise au point dans le cadre du Projet Demeter (www.demeter-ec.net) financé par l'UE.

L'identification et **le suivi** des irrigations à travers la télédétection ont été réalisée dès 1997 dans l'aquifère 08.29. L'évolution spectaculaire de ces techniques est bien connue. Il apparaît continuellement des produits nouveaux et des applications qui s'incorporent au processus de gestion.

Dans cette sélection, nous avons laissé de côté, pour des problèmes d'espace, quelques éléments qui sont actuellement en cours d'élaboration. Nous nous référons aux modèles d'appui dans la prise de décisions dans la gestion de l'eau. Un d'eux, spécifiquement développé pour l'Unité hydrogéologique de la Mancha Oriental, l'a été dans le cadre du Projet Merit financé également par l'UE (www.merit-eu.net).

5.1. Le Service de Consultation des Arrosages (SAR)

Le SAR a été créé en 1988, fruit d'une convention entre l'Université de Castilla-la Mancha (UCLM) et l'Institut Technique Agronomique Provincial (ITAP). Son but principal est la consultation des usagers de la zone, en leur fournissant l'information sur les besoins en eau d'arrosage pour leurs cultures. De même, il collabore avec la JCRMO pour assurer l'accomplissement des Plans d'exploitation des utilisateurs. Comme conséquence, il contribue au suivi et au contrôle des ressources renouvelables et de la demande d'eau d'irrigation dans l'UHMO.

Pour le calcul de l'évapotranspiration de référence (Eto ou ETP) et de culture (Etc ou ETM), on utilise la méthodologie classique de la FAO (Doorenbos et Kassan, 1986 ; Doorenbos et Pruitt, 1977), par la suite actualisée par Allen *et al.* (1998), en s'appuyant sur la station lisimétrique à laquelle on fera référence plus tard. Dans la figure 9 on présente un schéma de son système de travail.

L'accumulation d'information tout au long des douze campagnes d'arrosage, permet d'accepter les résultats que le SAR présente comme une bonne approche de la consommation réelle des plantes. D'autre part il faut tenir compte du processus de l'actualisation à laquelle cette information est soumise d'une manière permanente. L'utilisation correcte des données qui arrivent à l'usager est vérifiée au champ dans un nombre élevé de parcelles, et les résultats qui sont obtenus s'incorporent à nouveau au système.

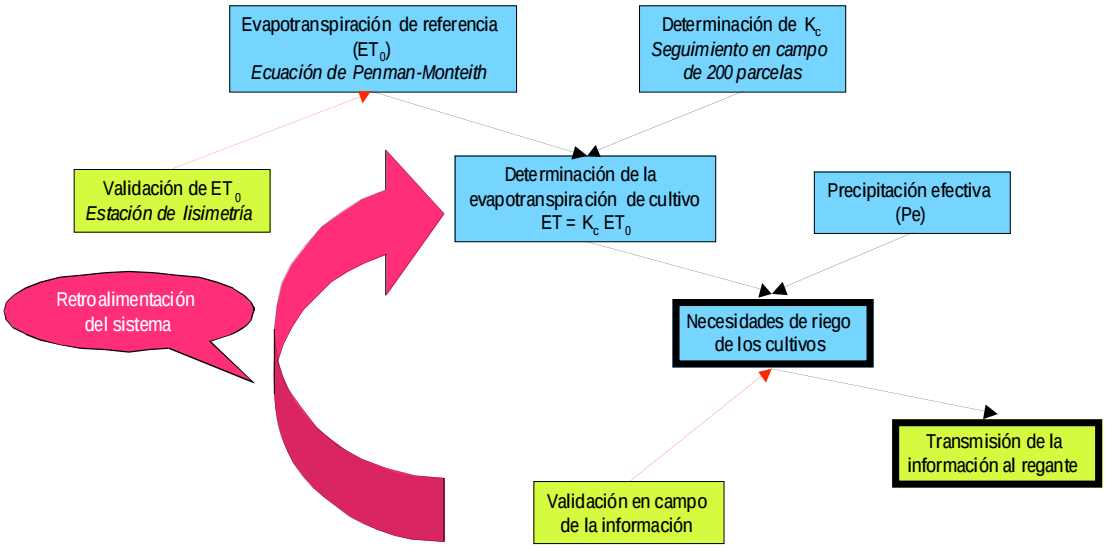


Figure 9. Méthodologie utilisée par le Service de Consultation des Arrosages d'Albacete. Source : ITAP

Ce processus est absolument indispensable pour un rapprochement progressif de la vérité. Il s'est initié en 1994 sur une surface de 3.205 hectares et en 2000 il a atteint 21.618 hectares, un chiffre qui correspond au quart de la surface irriguée dans sa zone d'influence.

En extrapolant ces données, nous pouvons connaître avec un bon niveau d'approche, la conduite réelle de l'ensemble des usagers. Ces données sont portées sur la figure 10, et correspondent à la moyenne des campagnes 1996-2004.

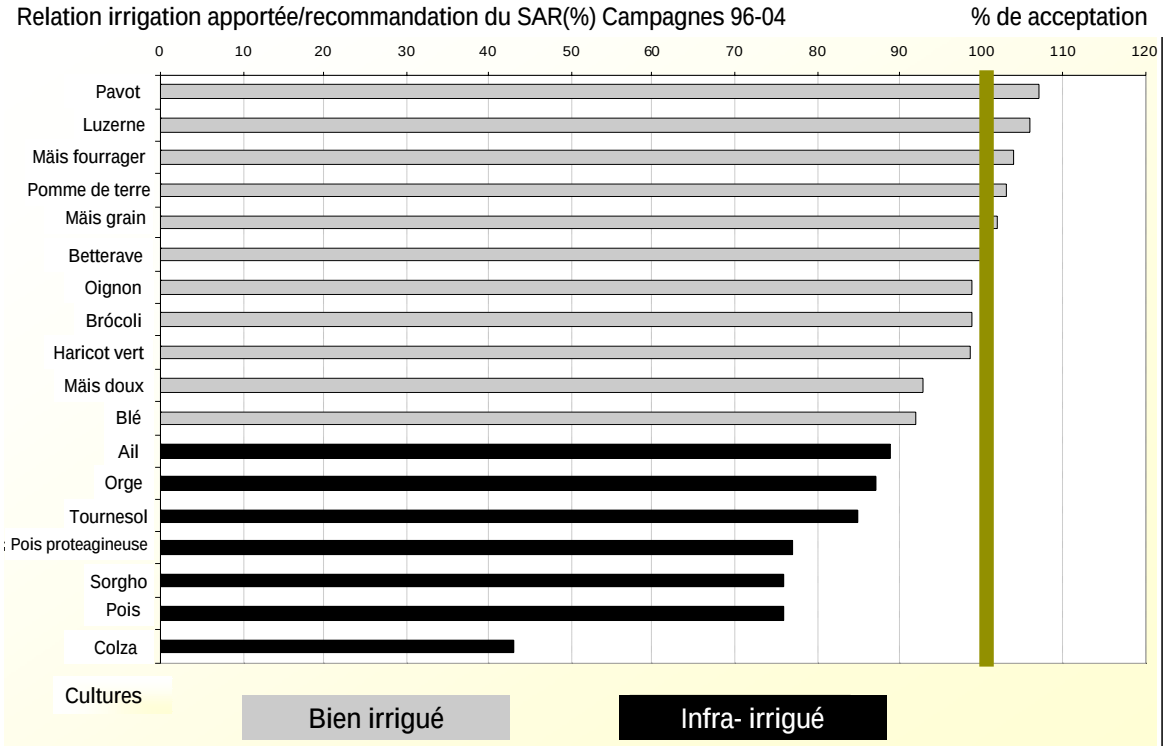


Figure 10. Relation irrigation apportée / recommandée SAR (en %), valeurs moyennes 1996-2004. (Montoro *et al.*, 2004b)

On peut extraire de l'examen de ce graphique quelques conclusions :
- Les cultures les plus consommatrices d'eau sont celles qu'on irrigue en surplus et les moins consommatrices celles qu'on irrigue le moins.
- Le "sur-arrossage" ne dépasse pas 115% ; de même le sous-arrosage ne descend pas au dessous de 70%, sauf pour le Colza d'hiver, qui est arrosé à 50%, étant donné que cette conduite a plus à voir avec la subvention que l'usager reçoit de la PAC qu'avec les nécessités hydriques réelles de la culture.
- Les agriculteurs qui surarrossent le font normalement parce qu'ils estiment qu'un bienfait marginal existe dans cet apport supplémentaire d'eau. Au fil des années, ils ont pu vérifier le côté incertain de cette supposition.

Les méthodes de diffusion des résultats ont évolué comme la technologie de l'information l'a fait dans cette période. Le SAR a commencé à informer uniquement à travers la presse locale et par un répondeur automatique. Actuellement, sans perdre cette information, les données sont sur la page Web de l'ITAP (www.itap.es), et le nombre de visites que cette page reçoit augmente chaque année. On y porte normalement les données hebdomadaires qui sont les plus maniables pour l'usager.

Le SAR dispose d'un réseau important de stations agrométéorologiques distribuées de façon stratégique tout au long de l'Unité. Par ailleurs, une station de base existe, qui mesure les paramètres nécessaires au calcul de l'évapotranspiration de référence (ETo), conformément à la méthodologie indiquée précédemment.

Cette station de base est située dans une propriété expérimentale équipée de plusieurs stations de lisimetrie formées par trois lisimètres de pesage continuel, et d'un champ pour des essais d'Arrosage Déficitaire Contrôlé (RDC) positionné près d'autres parcelles pour diverses expériences. Cette station est aussi utilisée pour la validation de l'ETo. La figure 11 présente un schéma de l'ensemble.

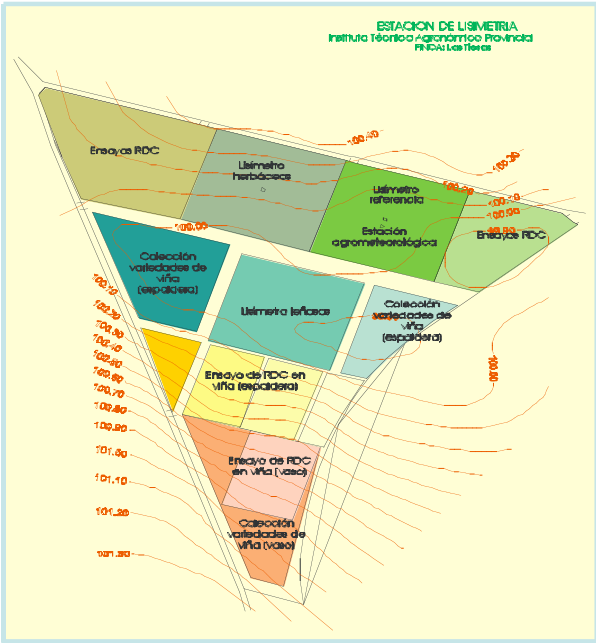


Figure 11. Station de lisimétrie dans la propriété Las Tiesas

5.2. Identification et suite de cultures par télédétection

L'un des usages principaux de la télédétection dans les systèmes agricoles irrigués est d'identifier des cultures et des parcelles. La capacité d'élaborer des cartes de cultures au moyen des images satellitaires, de les actualiser, d'estimer les surfaces, et comme conséquence, de calculer la distribution spatiale et temporelle de la consommation d'eau pour arrosage dans des régions étendues, fait de cette

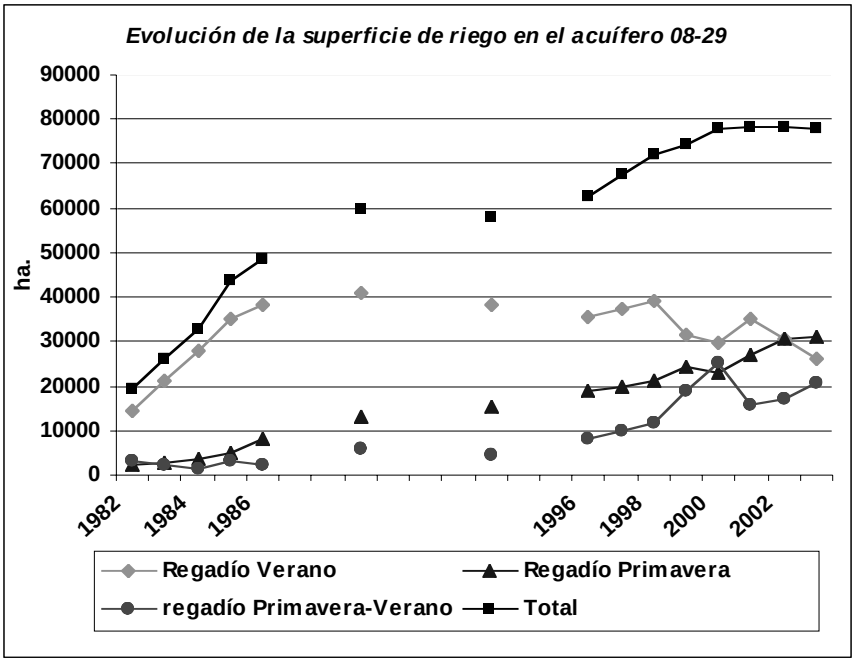
application l'une des plus importantes pour la gestion des ressources hydriques (Martin de Santa Olalla, 2003). De nombreux travaux ont été réalisés en utilisant différentes techniques, dans pratiquement tous les lieux du monde. On peut trouver une revue générale de ces travaux dans Bastiaansen (1998) et Menenti (2000). Ceux développés par l'unité de télédétection de l'Université de Castilla la Mancha sont synthétisés dans Martínez et Calera (2001).

La combinaison des cartes thématiques qui montrent la distribution spatiale des cultures en irrigation avec les technologies de Systèmes d'Information Géographique permet de renforcer l'usage et la potentialité de ces cartes, puisqu'il est possible d'introduire des couches d'information supplémentaires, comme le cadastre digital de la propriété rurale et ainsi, d'associer l'information provenant de la carte thématique à celle du parcellaire cadastral ce qui permet d'incorporer une information concernant des caractéristiques agronomiques et administratives (Calera et al., 1999). De la même manière, la grande capacité d'analyse **qu'offrent** les différentes couches d'information permet l'extraction d'informations aux échelles spatiale et temporelle appropriées.

La valeur de la carte est en relation avec l'opportunité du moment auquel l'information est fournie à l'usager, qui dépend de l'utilisation qu'il en fera à son tour. Par exemple, une carte thématique sera utile aux effets de réalisation d'une étude statistique, ou d'une reconnaissance de droits d'usages de l'eau quelques mois, ou même des années, après la campagne agricole correspondante. Des expériences d'utilisation des cartes thématiques pour la reconnaissance des droits d'arrosage commencent à être courantes dans beaucoup de régions, parmi lesquelles La Mancha (Calera y de la Cruz, 2003).

Cependant, s'il agit de suivre la surface de cultures sous irrigation pour contrôler l'accomplissement d'un plan d'exploitation, dans lequel des limitations de consommation d'eau sont établies, ce qui donne une grande valeur à la carte c'est d'être établie quand les cultures sont encore sur pied ce qui permet une vérification de terrain sur une parcelle.

Il est évident que l'obtention d'une carte de cultures d'irrigation pour chaque campagne agricole permet l'analyse de l'évolution des surfaces irriguées, et ainsi de construire l'"histoire" des cultures soit d'une parcelle individuelle, soit d'une entité spatialement plus étendue. La figure 12 montre l'évolution temporelle de la surface identifiée comme irriguée au moyen de télédétection pour l'aquifère 08.29.



regadio verano : irrigation estivale

regadio primavera : irrigation printanière

readio primavera-verano : irrigation de printemps et d'été

Figure 12. Evolution des surfaces identifiées comme irrigation au moyen de la télédétection dans l'enceinte de l'aquifère 08.29, par groupe de cultures et au total. (Calera y de la Cruz, 2003)

Les applications sur lesquelles l'Unité de télédétection de l'Université de Castilla la Mancha a travaillé dans l'aquifère 08-29 sont :
- Une réalisation de cartes thématiques de cultures irriguées ; elle est actualisée en permanence depuis 1997.
- La gestion de l'irrigation : la Suite du Plan d'Exploitation ; à partir de 2001.
- Une détermination des besoins hydriques des cultures par téledetection ; à partir de 2005.

Le but global de ces travaux est de mettre au point des outils, pour les gérants de l'aquifère comme pour les usagers, qui permettent d'améliorer l'efficacité de l'usage de l'eau en contribuant ainsi à une utilisation soutenable des ressources hydriques.

Nous faisons ensuite un bref rappel des méthodologies utilisées et des résultats obtenus.

La méthodologie utilisée pour la classification de cultures est celle de la Classification supervisée selon un mode temporel (Temporal pattern recognition), ce qui requiert l'ensemble des images multitemporelles convenablement sélectionnées. Dans ce cas, on utilise l'évolution temporelle d'une couverture comme critère principal d'attribution à chacune des classes. Ainsi, au lieu d'utiliser une distribution ou une signature spectrale, on utilise une distribution ou une signature temporelle pour chaque classe ou catégorie. Ainsi l'affectation d'un pixel à une catégorie correspondra à celle dont son évolution temporelle est la plus proche. Pour réaliser cette affectation, on applique les algorithmes de probabilité maximale, un classificateur en arbre et le contexte ; dans ce cas, les bandes sont les valeurs de l'indice de végétation "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) pour les différentes images utilisées.

Le besoin d'utiliser la classification multitemporelle est une conséquence de la grande diversité de cultures et de végétations naturelles avec des différents patrons temporels de semailles et de développement. La grande variabilité spatiale des cultures et de la végétation naturelle et sa dynamique temporelle, peuvent donner lieu au fait qu'au moment de l'acquisition d'une image, quelques cultures n'ont pas encore émergé, parce qu'elles n'ont pas été encore semées ou parce qu'elles se trouvent dans une phase trop précoce. D'autres ont été récoltées, alors elles risquent de ne pas être identifiées car elles donnent une réponse correspondant au sol nu ; la carte thématique correspondant à une campagne agricole peut, de ce fait, être incomplète.

Le critère principal de discrimination des cultures est donc la différence d'évolution phénologique. Il s'agit donc d'obtenir une connaissance très détaillée de cette évolution. Les cultures qui ont une évolution temporelle similaire seront affectées à la même classe ou la même catégorie.

La grandeur physique dérivée des images qui décrit le mieux l'évolution phénologique et les paramètres biophysiques des cultures correspond aux Indices de Végétation (Moran et al., 1997). Par cela la signature ou la distribution temporelle d'une culture seront décrites par le NDVI. Le choix du NDVI est basé, en plus de sa capacité à décrire l'évolution temporelle des paramètres biophysiques, sur le fait qu'il exige pour son obtention l'utilisation de différents capteurs avec une résolution spatiale et une largeur de bandes différentes (Steven et al., 2003 ; Martinez et al., 2003). L'évolution typique du NDVI pour une culture est connue au préalable au moyen d'une information auxiliaire, ce qui facilite la sélection des parcelles de vérification. La figure 13 présente l'évolution temporelle du NDVI dans différentes cultures.

Utiliser comme critère de classification la similitude dans l'évolution temporelle du NDVI est pertinent du point de vue des besoins hydriques des cultures. Quand il y a des cultures déterminées par une évolution temporelle semblable du NDVI, les coefficients de culture le seront aussi ; on peut alors affecter les besoins hydriques en moyenne par classe (Martin de Santa Olalla et al. 2003).

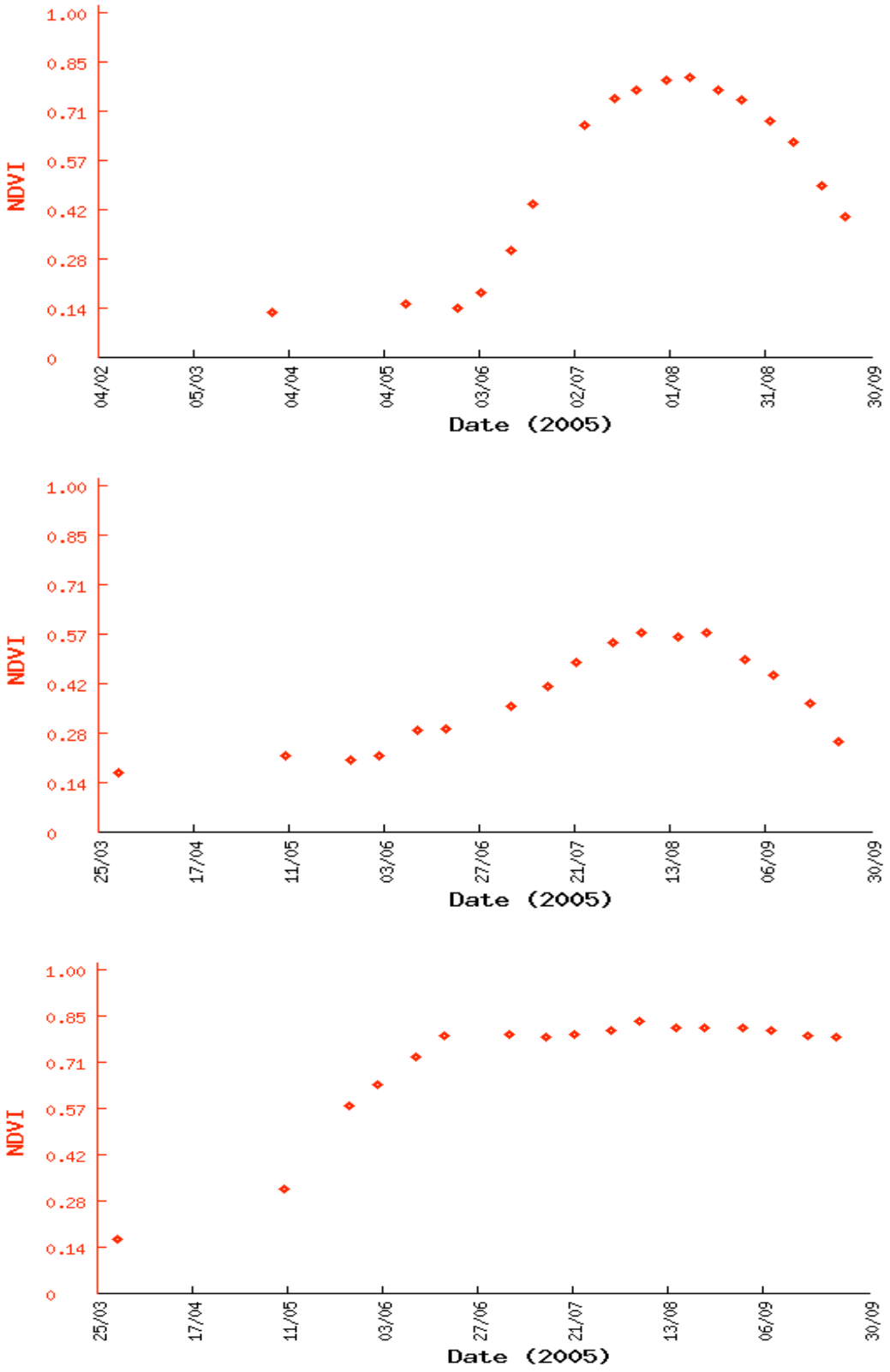


Figure 13. Evolution temporelle du NDVI d'une culture de (a) maïs, (b) oignon, et (c) betterave, pour 2005. Chaque point dans chaque figure est la valeur moyenne de 9x9 pixels (approx. 5 ha) obtenue dès l'acquisition de l'image à la date marquée. (Source : www.demeter-ec.net)

En ce qui concerne la suite des Plans d'Exploitation, à partir de la carte thématique des cultures d'irrigation, les besoins hydriques s'estiment par unité de surface (NHR) pour une surface déterminée, de la façon suivante :

$$NHR = (\sum Si\ NHRi) / \sum Si$$

NHR : besoins hydriques d'irrigation en moyenne par unité de surface [m^3/ha]
NHRi : besoins hydriques d'irrigation par unité de surface pour chacune des classes présentes dans la carte thématique [m^3/ha]
Si : Surface de la classe i présente dans l'enceinte spatiale étudiée [ha]

Les besoins hydriques d'irrigation pour chaque classe doivent être déterminées par ailleurs, ce qui est fait classiquement par le Service de Consultation des arrosages (Martin de Santa Olalla et al., 2003) ou par télédétection, comme il est indiqué plus loin. La superficie pour laquelle on peut réaliser ce calcul va de la parcelle, comme unité élémentaire de gestion de l'exploitation agricole, ce qui permet la suite du plan individuel d'exploitation, jusqu'à la totalité de la superficie de l'aquifère qui permet les extractions.

La figure 14 montre l'évolution des volumes totaux d'eau extraits pour irrigation de l'aquifère 08.29.

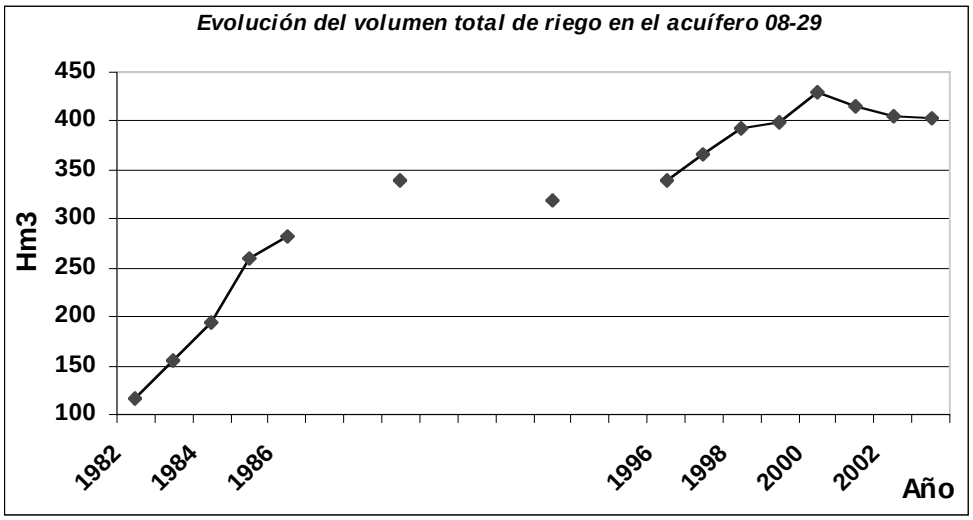


Figure 14. Evolution de la consommation d'eau pour l'irrigation sur la superficie de l'aquifère 08.29 (Calera y de la Cruz, 2003)

L'estimation des besoins hydriques d'arrosage en utilisant la télédétection est entrée dans une phase opérationnelle en 2005 et s'est développée dans le cadre du projet européen DEMETER (www.demeter-ec.net), en donnant lieu à la naissance de ce qui est nommé Service de Consultation d'Arrosage Assisté par Satellite, et-SARAS. La méthodologie utilisée consiste à obtenir le coefficient de culture depuis les images, et à introduire la carte de coefficients de culture dans le fonctionnement routinier du Service de Consultation traditionnelle des arrosages. L'usage d'outils basés sur des Systèmes d'Information Géographique et les Technologies d'Information permet de fournir en temps réel l'information spatiale personnalisée à l'agriculteur.

En ce qui concerne les résultats obtenus, l'identification de cultures réalisée embrasse une série historique qui commence en 1982 et va jusqu'à l'année actuelle. Les cartes thématiques obtenues ont été l'outil fondamental qui a permis la régularisation des droits d'irrigation. Etant donnée l'importance économique de ce processus, pratiquement toutes les cartes de cultures générées ont été vérifiées par tous les agriculteurs concernés .

La Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental (JCRMO) a incorporé les images du satellite dans son fonctionnement routinier pour la suite des Plans d'Exploitation, tant individuels que de l'ensemble de l'aquifère. Les progrès obtenus dans la réduction du temps de réception de l'image après son

acquisition par le capteur (approximativement 1 jour) et dans le processus de base (approx. 1 jour) permettent d'agir pratiquement en temps réel. Le problème de la distribution de l'image aux usagers a été résolu en utilisant des technologies Web. Au moment de rédiger cette information, le Service de Consultation des arrosages est dans la phase d'incorporation de manière routinière des coefficients de culture dérivés des images satellitaires.

6. Des défis et des incertitudes pour l'avenir

Les travaux que nous avons décrits se sont développés tout au long des dix dernières années. C'est une période qui permet déjà une certaine réflexion sur les faits et un regard sur ce qui reste à faire.

Il est difficile, en connaissant le travail réalisé, de douter de son utilité. Bien que, en dernier recours, la responsabilité de la gestion des ressources naturelles, et donc de l'eau, retombe sur l'Administration Publique, la participation des usagers, dans ce cas de la Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental (JCRMO), s'est avérée un élément indispensable.

La JCRMO jouit du respect tant de ses propres adhérents, que des institutions avec lesquelles elle est en rapport dans son travail quotidien. Elle reçoit de nombreuses visites des usagers et des spécialistes de la gestion de l'eau intéressés par les détails de son fonctionnement. Ses cadres et techniciens ont été invités à de nombreuses occasions pour en parler dans différents forums sur ces sujets.

Le bilan semble indubitablement positif.

A quels défis fait-elle face pour l'avenir ? Selon mon opinion, l'un se détache des autres .Il s'agit de l'obtention d'une utilisation durable de l'eau de l'aquifère. On a beaucoup avancé, il y a des résultats positifs et encourageants, mais le but principal, objectif de sa création, n'a pas encore été atteint. Il faut équilibrer les extractions et les recharges et freiner ainsi la descente continuelle des niveaux piézométriques.

Du côté du contrôle de la demande en eau, il y a encore un chemin à parcourir, tant en ce qui concerne la clôture de quelques irrigations illégales que de l'accomplissement des plans annuels d'exploitation. Dans les deux cas, le degré de tolérance face à l'inaccomplissement doit être zéro. Les rôles tant de l'Administration, de la Confédération Hydrographique du Júcar, que des usagers à travers son Jury des arrosages, doivent être absolument transparents et la fiabilité des données sur lesquelles se base son actualisation maximale. C'est à ces conditions que se maintiendra l'autorité nécessaire pour que ses décisions soient suivies.

Tout en exigeant des utilisateurs l'accomplissement strict de la réglementation dans l'utilisation des ressources, on ne doit pas oublier que ces mêmes utilisateurs sont, dans la situation actuelle de l'agriculture et avec les attributions limitées de ressources hydriques que permet le Plan Hydrologique du Júcar, à la limite de leurs possibilités économiques. On ne peut pas leur demander ce qu'ils ne peuvent pas donner.

Du côté de l'offre, l'aquifère est à la limite. Il ne faut pas non plus lui demander ce qu'il ne peut pas offrir.

L'équilibre recherché doit provenir de la substitution des pompages des eaux souterraines par des apports d'eau superficielle. Comme nous avons déjà remarqué, le Plan Hydrologique du Júcar le prévoit, en destinant 80 hm^3 à cette fin. Le manque des infrastructures dédiées, des radeaux et des conduites, est en train de retarder la mise en place de cette substitution dans sa totalité.

Différents modèles de simulation de la situation future de l'aquifère montrent que la substitution de 80 hm^3 n'est pas suffisante, et qu'il est nécessaire d'aller plus loin, c'est-à-dire de l'augmenter de 40 hm^3. Le Plan Hydrologique en vigueur prévoit cette substitution additionnelle. A mon avis, c'est quelque chose qui devra se faire nécessairement.

Une question importante n'a pas été abordée jusqu'au présent, au moins dans les documents publiés.

Le changement climatique a une incidence sur la diminution des précipitations sur une bonne partie du territoire péninsulaire, ce qui aura pour conséquence de réduire la recharge des aquifères. Si les prévisions s'accomplissent, cela affecterait l'aquifère 08.29 dans un délai relativement bref.

A ce stade, les changements à opérer seraient très profonds, affectant non seulement les cultures, mais aussi les systèmes de production, la technologie de l'arrosage, et très certainement, le type d'agriculture qui peut se développer dans les conditions semi-arides (ou arides ?) de notre territoire. Je pressens que c'est le défi que les nouvelles générations vont avoir devant elles ; ce défi fera suite à ceux auxquels nous avons dû faire face en faisant les premiers pas dans la gestion durable des ressources.

Une question semble certaine : celui qui a surmonté un défi est plus préparé pour surmonter le suivant que ceux qui ne sont jamais passés par cette situation critique. Ce qui a été accompli peut servir de socle aux entreprises futures.

Références bibliographiques

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water FAO, Rome.

Aragonés, J.M., Codina, J., Tu Sonnes, M.R., 1996. Importancia de las comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas (CUAS). Revista de obras públicas, 3355, 77-78.

Bastiaanssen, W.G.M. 1998. Remote sensing in water resources un management: the state of the Iwmi astucieux, Colombo.

Blackmore, D.I., 1995. Murray-Darling basin commission : à mariez study in integrated catchment un management. Water Sci. Technol., 32, 15-25.

Calera y A De la Cruz., 2003. Evolución de superficies de regadío mediante teledetección en el ámbito del acuífero Mancha Oriental. Ermot 2003. Universidad de castilla la Mancha, confederación Hidrográfica del Júcar; Junta de Comunidades de Castilla La Mancha ; Junta General de Regantes de la Mancha Oriental.

Calera, A., Medrano, J., Vela, A., and Castaño, S., 1999. GIS tools apllied to sustainable un management of water resources. Application to the aquifer system 08-29. Agricultural Water Management 40:207-220.

Chandler, J., 1994. Integrated catchment un management planning. J. Inst. Water Env. Man., 8, 93-96

CHJ (Confédération Hydrographique du Júcar), 2004a. [en ligne] http://www.chj.es. Il(Elle) consulta 2 de febrero 2004.

Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1986. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos Estudio FAO, Riego y Drenaje, 33. Rome, Italie.

Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. FAO24 Guidelines for predicting crop water requirements F.A.O., Rome.

Estrela, T., 2003. La evaluación de las guías de la Directiva Marco Europea de aguas en aspectos relacionados con las aguas subterráneas en la Cuenca del Júcar. España. Confederación Hidrográfica del Júcar. Valencia. España.

Fernández Mejuto, M.2002. Tésis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hídraulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España

Humphries, R., Robinson, S., 1995. Assessment ofthe success of the Peel-Harvey estuary system un management strategy - À Westero Australian attempt at Integrated Catchment le Management. Water Sci. Technol., 32, 255-264.

ITAP (Instituto Técnico Agronómico Provincial), 2004. Evolución de los regadíos en la Unidad Hidrogeológica Mancha Oriental. Informe interno. No Publicado. Diputación de Albacete.

Maaren, H., Dent, M., 1995. Broadening participation in integrated catchment un management for sustainable water resources development. Water Sci. Technol., 32, 161-167.

Martin De Santa Olalla, F., Dominguez, A., Artigao, A., Fabeiro, C., Ortega, J.F., 2005. Integrated water resources un management of the Hydrogeological Unit “Easter Mancha“ using Bayesianan Belief Networks. Agricultural Water Management 77, 21-36.

Martin De Santa Olalla, F.,Calera, A. and Dominguez, A., 2003. Monitoring irrigation water utilise by combining Irrigation Advisory Service, and remotely sensed date with à geographic information system. Agricultural Water Management 61,111-124.

Martin de Santa Olalla, F., 2001. La gestión del agua en el Sistema Mancha Oriental. Symposium “Las nuevas tecnologías hacia la agricultura sostenible » XX Aniversario del Instituto Técnico Provincial. Servicio de Publicaciones de la Diputación de Albacete. Albacete, España.

Martinez, C., and Calera, A., 2001. Irrigated crop une aire estimation using Landsat TM imagery in Tache, Spain. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 67:1177.

Martinez, C., Calera, A., Jochum, A..2003. Intersatellite cross-calibration : Integration of reflectance and NDVI from different satellites by means of à linear model. *In* Owe : M.; G. D´Urso; À. Calera J. Moreno, (Ed.). Vol. 5232, 128-10. Xth International Symposium on Remote Sensing. SPIE. Barcelone, Spain.

Menenti, M. 2000. Irrigation and drainage, p. 377-400, *In G*. À. Schultz and E. Engman, eds. Remote sensing in hydrology and water un management. Springer, Berlin.

Montoro Rodríguez, A.; López Fuster, P. 2005. Informe Técnico para la toma de decisiones en el “Plan de Explotación 2006”, de la Unidad Hidrogeológica de La Mancha Oriental. Anuario Técnico del Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP) 2005. Ed. ITAP, Albacete, España.

Montoro, A, ; López Fuster, P.; Castillo, P.; Lejarrega, M.J; Martínez, A.; Martínez , C.; Sánchez , L.; Sanabria I., L.; Tárraga , I. 2004 b Informe anual del seguimiento del SAR. Campaña 2004. Anuario Técnico del Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP) 2004. Ed. ITAP, Albacete, España.

PHJ (Plan Hidrológico del Júcar), 1999. Orden del 13 de Agosto de 1999 por la que se dispone la publicación de las determinaciones del contenido normativo del Plan hidrológico de la Cuenca del Júcar, aprobado, por el Real Decreto 1664/1998, de 24 de Julio. Boletín oficial del Estado número 25 (27 de Agosto de 1999). Madrid, España.

Steven, M.D., T.J. Malthus, Fort. Baret, H. Xu, and M.J. Chopping. 2003. Intercalibration of vegetation des indices from different sensor systems. Remote Sensing of Environment 88:412.

Les experts de l'ESCo "Sécheresse et agriculture"

Nom	Organisme, département de recherche*, localisation	Laboratoire / structure d'appartenance	Domaine de compétences scientifiques (mobilisées pour l'ESCo)
Sophie ALLAIN	INRA, détachée à l'ENS Cachan	Groupe d'analyse des politiques publiques - ENS de Cachan	Politiques publiques, débat public, eau et régulation territoriale
Jean-Pierre AMIGUES**	INRA-SAE2, Toulouse	UMR° INRA / Université Toulouse 1 - Laboratoire Economie des ressources naturelles (LERNA)	Economie des usages de la ressource en eau et des milieux
Bernard BARRAQUE	CNRS, Marne-la-Vallée	CNRS / Ecole nationale des ponts et chaussées - Laboratoire Techniques, territoires et sociétés (LATTS)	Politique publique de l'eau
Jacques-Eric BERGEZ	INRA-EA,Toulouse	UMR INRA / ENSAT Agrosystèmes cultivés et herbagers (ARCHE)	Stratégies d'irrigation, modélisation décisionnelle
Michel BERTRAND	INRA-EA, Grignon	UMR INRA / INA P-G Agronomie	Fonctionnement des systèmes de grande culture pluviaux
Nadine BRISSON	INRA-EA, Avignon	Unité AGROCLIM	Modélisation agroclimatique et fonctionnement des cultures
Emmanuel CLOPPET	Météo-France, Toulouse	Division Agrométéorologie	Agrométéorologie, changement climatique
Stéphane COUTURE	INRA-SAE2, Nancy	UMR INRA / ENGREF Économie forestière	Systèmes d'assurance
Pierre CRUIZIAT	INRA-EA, Clermont-Ferrand (en retraite)	UMR INRA / Université Clermont Physiologie intégrée de l'arbre fruitier et forestier	Fonctionnement hydrique des plantes
Philippe DEBAEKE	INRA-EA, Toulouse	UMR INRA / ENSAT Agrosystèmes cultivés et herbagers (ARCHE)	Fonctionnement des systèmes de grande culture irrigués et pluviaux
Luc DELABY	INRA-PHASE, Rennes	UMR INRA / ENSAR Production de lait	Production laitière
Isabelle DOUSSAN	Université de Rennes, détachée à l'INRA	Centre de recherche en droit économique (CREDECO) - Université de Nice	Droit de l'environnement
Jean-Louis DURAND	INRA-EA, Lusignan	UR° Écophysiologie des plantes fourragères	Fonctionnement des peuplements prairiaux
Michel DURU	INRA-EA, Toulouse	UMR INRA / ENSAT Agrosystèmes cultivés et herbagers (ARCHE)	Systèmes herbagers, fonctionnement des peuplements prairiaux
Jean-Louis FIORELLI	INRA-SAD, Mirecourt	UR SAD Formes d'organisations territoriales des activités agricoles à finalités environnementales	Systèmes d'élevage
Christian GARY	INRA-EA, Montpellier	UMR INRA / CIRAD / ENSAM Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens	Fonctionnement hydrique des systèmes de culture, vigne
Stéphane GHIOTTI	CNRS, Montpellier	Université Montpellier 3 – Laboratoire Mutation des territoires en Europe	Géographie, gestion de l'eau, politiques territoriales
Frédéric HUARD	INRA-EA, Avignon	Unité AGROCLIM	Agrométéorologie, simulations
Bernard ITIER**	INRA-EA, Grignon et Montpellier	UMR INRA / INA P-G Environnement et grandes cultures	Bioclimatologie, micrométéorologie, stress hydrique
*Nader KATERJI***	INRA-EA, Grignon	UMR INRA / INA P-G Environnement et grandes cultures	Relations eau-agriculture, réponse des plantes au stress hydrique
Christine LE BAS	INRA-EA, Orléans	Unité INFOSOL	Sols, bases de données

Delphine LEENHARDT	INRA-EA, Toulouse	UMR INRA / ENSAT Agrosystèmes cultivés et herbagers (ARCHE)	Modélisation, gestion de l'eau, aménagements
Gilles LEMAIRE	INRA-EA, Lusignan	UR Écophysiologie des plantes fourragères	Ecophysiologie, fonctionnement des peuplements prairiaux
Olivier MAHUL	INRA, détaché à la Banque mondiale	Banque mondiale	Risques et agriculture
Jean-Claude MAILHOL	Cemagref, Montpellier	UMR G-Eau	Systèmes irrigués, pilotage de l'irrigation
Francisco MARTIN DE SANTA OLALLA MAÑAS	Université de Castilla de la Mancha (UCLA)	Dpto Producción Vegetal y Tecnología Agraria	Irrigation, gestion de l'eau, conduite de projets intégrés
Didier MICOL	INRA-PHASE, Clermont-Ferrand - Theix	UR Herbivores	Systèmes d'élevage, qualité des produits et modélisation des performances
Arnaud REYNAUD	INRA-SAE2, Toulouse	UMR INRA / Université Toulouse 1 Laboratoire Economie des ressources naturelles (LERNA)	Econométrie, gestion de la ressource en eau, risques
Thierry RIEU	ENGREF, Montpellier	Département Eau	Economie de l'irrigation
Françoise RUGET	INRA-EA Avignon	UMR INRA / Université Climat, sol et environnement	Agroclimatologie, modélisation de la productivité des prairies
Bernard SEGUIN	INRA-EA, Avignon	UMR INRA / Université Climat, sol et environnement	Bioclimatologie, télédétection, changement climatique
François TARDIEU	INRA-EA, Montpellier	UMR INRA / ENSAM Écophysiologie des plantes sous stress environnementaux (LEPSE)	Ecophysiologie et génétique des plantes sous stress environnementaux
Alban THOMAS	INRA-SAE2, Toulouse	UMR INRA / Université Toulouse 1 Laboratoire Economie des ressources naturelles (LERNA)	Econométrie, régulation environnementale, usage et tarification de l'eau
Eugène TRIBOÏ	INRA-EA, Clermont-Ferrand	UR Agronomie	Qualité des graines
Michel ZIVY	CNRS, Gif-sur-Yvette	UMR INRA / CNRS / INA P-G Génétique végétale	Génomique, protéomique, réponse au déficit hydrique

* Départements de recherche INRA : EA : Environnement et agronomie ; PHASE : Physiologie animale et systèmes d'élevage ; SAD : Sciences pour l'action et développement ; SAE2 : Sciences sociales, agriculture et alimentation, environnement et espace.
** En gras : experts coordinateurs de parties du rapport ; en gras et souligné : pilote scientifique de l'expertise ; en italique : relecteurs du rapport.
° UMR : Unité mixte de recherche ; UR : Unité de recherche.

La présente liste n'intègre pas quelques chercheurs qui ont pu être sollicités (par l'un des experts ci-dessus) pour contribuer ponctuellement à la rédaction d'une section du rapport. Ces chercheurs sont cités dans les contributions écrites auxquelles ils ont apporté leur concours.

Evaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique

N. Brisson[(1)], F. Huard[(1)], A.I. Graux[(1)], C. Lebas[(2)], P. Debaeke[(3)], G. Lemaire[(4)], B. Itier[(5)]

(1) Unité AGROCLIM, Avignon ; (2) Unité INFOSOL, Orléans ;
(3) UMR Arche, Toulouse ; (4) UR EPF, Lusignan ;
(5) Centre INRA Montpellier

Expertise agricole de M.H. Jeuffroy,
J.M. Nolot, G. Lemaire, J. Troizier

Etude réalisée par l'unité AGROCLIM de l'INRA
pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP)

Octobre 2006

Avant propos

L'expertise scientifique collective "Sécheresse et agriculture", réalisée à la demande du Ministère de l'agriculture et de la pêche et pilotée par l'INRA, a fait ressortir deux types de carences au niveau de la bibliographie internationale :

- un manque de recherches et d'études sur les "systèmes de culture" soumis à des sécheresses aléatoires : en effet la littérature internationale donne essentiellement des éléments sur les systèmes de culture en conditions d'aridité, c'est-à-dire sur des systèmes dont les déterminants ont été adaptés à une sécheresse récurrente. Il n'y a guère que le dispositif français de Toulouse, INRA et Instituts Techniques, qui travaille le sujet sur des successions d'années sèches et d'années pluvieuses. Nous en tirons les conséquences dans les recommandations en termes de poursuite et d'amplification de l'effort de recherche car une grande partie du territoire français se trouve concerné par ces conditions "incertaines" qui nécessitent des adaptations spécifiques des systèmes de culture.

- un manque d'études sur les bilans hydriques à l'échelle de bassins versants, les quelques études conduites jusqu'à aujourd'hui sur le bilan hydrique des cultures ayant été réalisées à l'échelle de la parcelle agricole. Or l'échelle du bassin versant est la seule qui soit appropriée à la gestion de la ressource hydrique. En attendant que des études couplant Hydrologie et Hydrogéologie permettent une intégration spatio-temporelle des transferts hydriques sur chaque bassin d'intérêt (cf. recommandation en conclusions sur les besoins de recherche et d'études), l'ensemble des experts s'est accordé sur le fait qu'il serait dommage de ne pas valoriser dès à présent les possibilités offertes par la modélisation des cultures.

En effet, des outils méthodologiques comme les modèles de simulation ont été mis au point au cours des vingt dernières années. Ils intègrent un ensemble de connaissances qui font l'objet de consensus dans la communauté scientifique. Ils ont été validés sur les variables d'intérêt des deux volets de l'expertise : production de matière sèche et d'organes récoltables d'une part, bilans environnementaux (principalement bilans hydrique et azoté) d'autre part. L'outil méthodologique est référé dans la bibliographie internationale et fait donc partie de l'expertise.

Cependant, son utilisation, visant à illustrer les possibilités de rendements et la restitution d'eau au milieu offertes par tel ou tel système de culture dans divers contextes pédoclimatiques, aurait débordé du cadre formel de l'expertise. C'est pourquoi, il nous est apparu plus conforme aux règles retenues pour cet exercice de séparer la présente contribution de N. Brisson et al. de l'expertise stricto sensu. Toutefois, il est fait référence dans le rapport d'expertise à certains résultats de cette étude, au même titre qu'à ceux d'autres études.

Dans le même temps, il nous paraît indispensable de faire connaître dans sa globalité cette étude au commanditaire de l'expertise car c'est, à notre connaissance, la première étude qui présente une approche systématique de la question sur les diverses régions françaises en se focalisant sur le croissant ouest (Ile-de-France - Centre ; Charentes-Poitou ; Aquitaine - Midi Pyrénées) où se concentre le plus grand nombre de problèmes relatifs à la ressource en eau. L'étude n'a pas de caractère exhaustif et présente essentiellement une valeur comparative entre régions et années climatiques. Elle illustre ce que l'on pourrait attendre, en termes de rendement et de restitution au milieu, de trois "systèmes de culture" retenus à dires d'experts (irrigation intensive, irrigation de complément, pluvial), sur trois types de sols représentatifs de chaque région (à partir de la distribution des "réserves utiles" en eau) et pour différentes séries climatiques (successions réelles et combinaisons d'années sèches représentant une prospective de sécheresse accrue).

Sans sous-estimer les limitations liées à la non-prise en compte du temps de réponses des aquifères, cette étude permet d'ores et déjà d'illustrer ce que des études commanditées à l'échelle de bassins versants permettrait d'obtenir en croisant des bases de données climatiques, pédologiques et agronomiques :
- pour l'agriculteur, une étude fréquentielle des rendements espérés, culture par culture, permettant une analyse du risque de sécheresse au niveau du système de culture ;
- pour le gestionnaire de bassin, une estimation de l'utilisation de la ressource et de sa restitution au milieu en fonction de la répartition spatiale des différents systèmes de culture au sein du territoire.

La présente étude illustre ce qui pourrait être réalisé à l'échelle d'un territoire pour servir de base de discussions entre les différents acteurs parties prenantes de la gestion des ressources en eau.

1. Les objectifs de la modélisation dans l'étude

La notion de sécheresse agricole est difficile à définir dans l'absolu. Evidemment, à l'échelle du territoire, et apprécié annuellement, le poids du facteur climatique semble déterminant. Mais si l'on descend à l'échelle régionale, l'impact du potentiel édaphique de même que la variabilité climatique inter-régionale prennent de l'importance. Enfin, la stratégie de l'agriculteur va jouer sur le niveau de mise en adéquation de ces systèmes de culture avec le potentiel pédoclimatique dont il dispose.

L'objectif du travail de modélisation biophysique est de décliner une hiérarchisation de l'ensemble de ces facteurs à une résolution régionale et d'en apprécier les diverses sources de variabilité. Cette modélisation permet, en outre, d'accéder de façon systématique à des variables explicatives permettant de clarifier les divers aspects de la problématique, qu'il s'agisse des composantes du bilan hydrique (évaporation du sol, infiltration d'eau en profondeur, transpiration du couvert végétal) ou de ses conséquences sur les cultures (température de la surface, satisfaction des besoins en eau des végétaux…).

L'approche n'est pas véritablement de nature spatiale mais elle s'appuie sur une analyse typologique multilocale permettant d'apprécier la variabilité des sols et des climats du territoire français métropolitain.

2. Le modèle

2.1. Ses principes de fonctionnement, les variables d'entrée et les variables calculées

Les modèles de culture sont des outils mathématiques et informatiques qui simulent le fonctionnement dynamique d'une culture (système sol-plantes) en interaction avec le climat et les pratiques agricoles. Ils sont nés au début des années 70 à partir des travaux fondateurs des écoles hollandaise (de Wit, 1970) et américaine (Baker et Meyer, 1966 ; Duncan, 1971). Le modèle français STICS, développé à l'INRA depuis 1996 en collaboration avec des partenaires scientifiques et techniques, s'appuie sur des principes largement admis dans la communauté (Brisson et al, 1998, 2003). Il incarne les préoccupations environnementales de l'agronomie par une approche générique permettant de simuler de nombreuses espèces prenant en compte l'effet des pratiques agricoles.

STICS réalise des simulations en continu à l'échelle de la succession de cultures, faisant se succéder des phases de culture et d'interculture, pour des séries climatiques plus ou moins longues. La dynamique est journalière, imposée par le pas de temps climatique, le climat constituant avec le sol et l'itinéraire technique l'ensemble des données d'entrée du modèle. Les données de sorties sont agronomiques (date de récolte, rendement, qualité, consommation d'eau et d'azote) ou environnementales (infiltration profonde, lixiviation de nitrates, température de la surface). STICS simule le fonctionnement carboné (croissance des plantes et élaboration du rendement), énergétique (interception du rayonnement solaire, températures du couvert et du sol), hydrique (évaporation du sol, transpiration des plantes, drainage) et azoté (minéralisation de la matière organique, transport des nitrates, fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses) de l'agrosystème.

Il existe des interactions fortes entre le fonctionnement hydrique et les autres composantes : l'état de croissance de la plante définit ses besoins en eau mais rétroactivement l'insatisfaction de ces besoins pénalise la croissance de la plante (ainsi le modèle permet de simuler un rationnement par le l'Indice Foliaire qui réduit de fait les besoins en eau ultérieurs pour la culture) ; en réduisant l'évapotranspiration, le déficit en eau augmente la température de la surface par le biais du bilan d'énergie ; en s'infiltrant l'eau entraîne avec elle les nitrates, tandis qu'en situation de pénurie ces nitrates ne sont plus véhiculés jusqu'aux racines provoquant ainsi un déficit azoté pour la plante (stress azoté induit par le déficit hydrique) ; enfin dans un sol sec les processus de minéralisation sont considérablement ralentis.

Le modèle fait un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ainsi les remontées capillaires qui pourraient provenir du compartiment de sol sous-racinaire sont négligées, la parcelle est supposée plane de façon à pouvoir négliger les phénomènes de ruissellement de surface et parfaitement contrôlée au plan phytosanitaire. En particulier l'impact du régime hydrique sur le parasitisme ou les adventices n'est pas pris en compte.

STICS a été adapté à des cultures variées (Figure 1). La stratégie spécifique d'une culture vis-à-vis de son économie en eau repose sur divers éléments du fonctionnement et de la morphologie de la plante renseignés par un paramétrage approprié aux niveaux de son développement phénologique, des dynamiques respectives de son feuillage et de son système racinaire, de la fermeture stomatique et de sa réactivité aux stress.

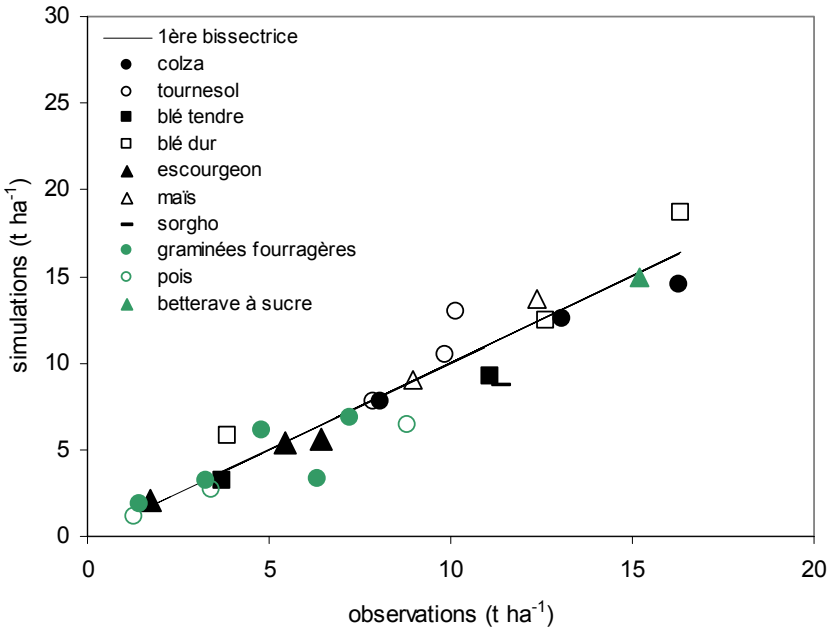


Figure 1. Comparaison entre mesures et simulations par STICS de la biomasse accumulée par des cultures très diversifiées

Les variables calculées utilisées dans cette étude sont essentiellement celles du bilan hydrique : transpiration du couvert végétal et évaporation du sol (cumulées dans la variable évapotranspiration), infiltration profonde et ruissellement par débordement (qui se produit dans le cas de sols à très faible infiltrabilité). Nous analyserons également les variables microclimatiques liées au bilan hydrique : température de surface et humidité des couverts, ainsi que les variables d'intérêt agricole (rendement) et environnemental (lixiviation des nitrates). Infiltration profonde (ou drainage) et ruissellement par débordement seront cumulés car ces deux entités représentent une estimation de la contribution à la recharge des nappes.

2.2. Choix des contextes pédoclimatiques

L'étude repose sur une sélection de milieux pédoclimatiques permettant d'appréhender la variabilité des configurations de sécheresse d'origine climatique et/ou édaphique à l'échelle du territoire français. Nous avons opéré cette sélection au niveau régional, échelle assurant le meilleur compromis entre les décisions relatives à l'eau et le découpage naturel du territoire français. Ainsi 10 régions ont été choisies, chacune étant caractérisée par une station climatique pourvue d'une série de 25 années de données au minimum et de trois types de sol (Figure 2).

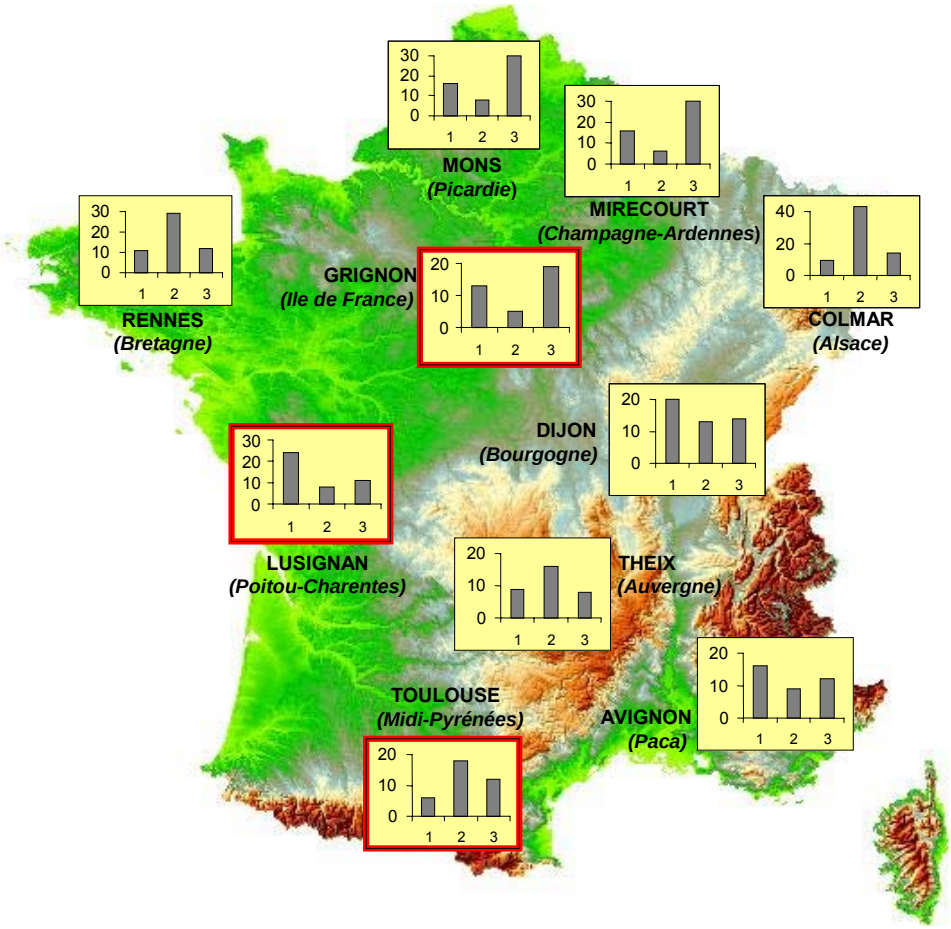


Figure 2. Carte des régions sélectionnées (chacune étant représentée par une station climatique), choix des sols par gamme de réserve utile (1 : 40 à 100 mm, 2 : 100 à 160 mm, 3 : >160 mm) et représentativité dans la région en %.
Les régions encerclées de rouge ont été choisies pour l'étude agricole.

Les climats choisis représentent les tendances océanique (Rennes, Lusignan, Grignon, Mons), continentale (Colmar, Dijon, Mirecourt), montagnarde (Theix à 800 m d'altitude) et méditerranéenne (Avignon, Toulouse) de l'hexagone, combinées du nord au sud avec la zonation latitudinale du climat global.

Le choix des sols s'est fait à partir de la carte pédologique au 1/1 000 000e sur la base de leur réserve utile, caractérisant leur capacité de stockage de l'eau, et de leur représentativité significative dans la région. Ainsi, pour chaque région, ont été retenus un sol à faible réserve utile (entre 40 et 100 mm), un sol à forte réserve utile (supérieure à 160 mm) et un sol intermédiaire (réserve utile entre 100 et 160 mm). L'hétérogénéité des régions en terme de potentiel édaphique est bien illustrée par la Figure 2 sur laquelle est, par exemple, mise en évidence l'importance des sols à faible réserve utile en Poitou-Charentes et en région PACA, alors que la région Ile-de-France ou la Picardie sont majoritairement dotées de sols à forte capacité de rétention en eau. Cependant la réserve utile n'est pas le seul critère de qualification de potentialité agricole des sols et, selon les régions les autres caractères permanents, en particulier ceux relatifs à leur fertilité (teneur en matière organique), peuvent modifier le classement des réponses attendues par la seule variation de la réserve utile (Tableau 1 en annexe).

Deux niveaux d'étude ont été menés. Le premier, de nature uniquement pédoclimatique, concerne l'ensemble des régions. Il vise à cerner le poids relatif des sols et des climats, dans leurs variabilités à la fois spatiale et temporelle, sur les flux d'eau infiltrés et évaporés, les périodes de crise ainsi que les conséquences attendues sur le microclimat. Sur un sous-ensemble de trois régions, sélectionnées pour l'acuité des problèmes liés à l'usage de l'eau (Ile-de-France, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes), nous avons introduit de manière aussi réaliste que possible la dimension agricole (les systèmes de culture).

2.3. Les protocoles de simulation retenus

Deux types de protocoles ont été retenus, correspondant aux deux niveaux d'études mentionnés.

Le protocole "pédoclimatique" correspond à des situations de couverture du sol extrêmes : permanence de sol nu sans aucune couverture végétale comparée à un couvert de prairie de graminées irrigué pour couvrir la totalité des besoins en eau des plantes. Deux coupes sont effectuées, au printemps et en été et à chacune de ces coupes, la prairie est fertilisée à raison de 50 kgN/ha, ce qui correspond à une conduite raisonnée permettant de couvrir en moyenne de 70 à 85 % des besoins en azote et limite les pertes par lixiviation. La même prairie conduite en "sec" a également été simulée afin d'estimer l'ampleur maximale du déstockage de l'eau du sol par une végétation permanente puisant uniquement dans les réserves "naturelles".

Le protocole "agricole" a été construit avec l'aide d'experts régionaux de façon à évaluer trois systèmes de culture réalistes par région. Ces systèmes de culture sont matérialisés par des rotations au plus quadriennales. Les systèmes "A" sont les plus consommateurs en eau, à base de cultures entièrement irriguées (Tableau 1). A l'opposé, les systèmes "C" sont les plus économes, avec des cultures conduites sans irrigation (appelées aussi cultures pluviales). En position intermédiaire, les systèmes "B" utilisent l'irrigation d'appoint, qui ne couvre qu'une partie des besoins en eau des plantes (évaluée à 50%). Les systèmes "B" et "C" tendent à privilégier des stratégies d'esquive en n'occupant pas le sol systématiquement pendant la période sensible de l'été. Les systèmes retenus ne sont pas forcément des systèmes très représentés dans les régions étudiées mais concrétisent une stratégie agri-environnementale que nous souhaitons tester.

Région	Rotation	Culture (variété)	Date de semis	Fertilisation KgN/ha (fractionnement)	Irrigation (satisfaction des besoins en eau)
Ile de France	**A** Maïs	Maïs (DK300)	15/04	175 (2)	100%
	Blé dur	Blé dur (Lloyd)	20/10	210 (3)	100%
	Betterave	Betteraves (Laser)	15/03	145 (1)	100%
	Blé tendre	Blé tendre (Appache)	05/10	225 (3)	100%
	B Colza	Colza (Aviso)	20/08	190 (2)	-
	Blé tendre	Blé tendre (Shango)	05/10	225 (3)	50%
	Escourgeon	Escourgeon (Alaska)	29/09	195 (2)	-
	C Tournesol	Tournesol (Albena)	15/04	80 (1)	-
	Blé tendre	Blé tendre (Appache)	20/10	225 (3)	-
	Pois de printemps	Pois (Baccara)	15/03	-	-
	Blé tendre	Blé tendre (Appache)	20/10	225 (3)	-
Midi-Pyrénées	**A** Maïs	Maïs (Cécilia)	15/04	250 (2)	100%
	B Blé dur	Blé dur (Nefer)	10/11	210 (3)	50%
	Blé dur	Blé dur (Nefer)	01/10	170 (2)	50%
	Sorgho	Sorgho (DK18)	25/04	120 (2)	50%
	C Blé dur	Blé dur (Nefer)	10/11	170 (2)	-
	Tournesol	Tournesol (Mélody)	15/04	60 (1)	-
Poitou-Charentes	**A** Maïs	Maïs (Furio)	15/04	220 (2)	100%
	B Colza	Colza (Aviso)	20/08	180 (3)	-
	Blé tendre	Blé tendre (Shango)	20/10	215 (3)	50%
	Escourgeon	Escourgeon (Alaska)	15/10	185 (2)	-
	C Tournesol	Tournesol (Mélody)	10/04	50 (1)	-
	Blé tendre	Blé tendre (Appache)	20/10	215 (3)	-
	Escourgeon	Escourgeon (Alaska)	01/10	185 (2)	-

Tableau 1. Détail des rotations et techniques associées retenues pour les trois régions tests

Les itinéraires techniques correspondant à ces systèmes, dont les éléments essentiels sont synthétisés dans le tableau 1, sont différents d'une région à l'autre mais identiques pour les trois types de sol. Les précédents culturaux jouent un rôle sur l'état hydrique et minéral du sol au semis et fournissent des

résidus qui sont enfouis lors des opérations de travail du sol supposées conventionnelles (déchaumage, labour, façons superficielles avant semis). Les densités de semis varient peu entre régions et le fractionnement des apports d'azote repose sur la phénologie des cultures. En ce qui concerne l'irrigation (pour les systèmes A et B), les apports d'eau, en date et quantité, sont calculés en fonction du niveau de satisfaction des besoins en eau recherché. Ainsi, pour les systèmes A, nous supposons que les besoins sont satisfaits à 100% et donc que l'irrigation est déclenchée dès que la transpiration réelle s'éloigne de la transpiration potentielle. Ceci correspond donc à un apport d'eau maximum par irrigation qui est supérieur aux apports d'eau effectués dans la pratique, notamment en fin de cycle cultural : en effet à partir d'un certain état de maturité du grain l'irrigation est généralement arrêtée quel que soit le stress hydrique subi par le feuillage. Pour les systèmes B, l'irrigation est déclenchée plus tardivement, quand la transpiration réelle est inférieure à 50% de la transpiration potentielle ce qui correspond à une irrigation volontairement limitée par rapport aux besoins.

Pour les deux protocoles, les simulations ont été réalisées en continu sur l'ensemble de la période climatique disponible de façon à tenir compte des effets cumulatifs. Si l'on exclut la monoculture de maïs, les systèmes de culture analysés s'appuient sur des rotations pluriannuelles, ce qui nécessite d'exécuter le protocole agricole 2, 3 ou 4 fois pour que les relations culture/année soient aussi exhaustives que possible et s'approcher ainsi de résultats à l'échelle de l'assolement. Une année culturale comprend une période de sol nu, précédant le semis, et une période de végétation. La proportion entre ces deux périodes est plus élevée pour les cultures d'été comme le maïs ou le tournesol que pour les cultures d'hiver comme le blé ou le colza.

2.4. Validité des résultats obtenus

Après en avoir vérifié la cohérence agronomique auprès d'experts, les résultats ont été comparés à des données statistiques régionales de rendement pour les années 2002 et 2003. Nous avons extrait les cultures les plus représentées dans nos trois régions tests (blé tendre, blé dur, maïs, tournesol et colza) en synthétisant les résultats sous la forme de moyennes régionales. Ces moyennes régionales accordent un poids identique aux trois systèmes de culture et aux trois sols, ce qui rend les chiffres difficilement comparables en absolu aux statistiques régionales. Cependant nous nous autorisons à en donner une interprétation en relatif.

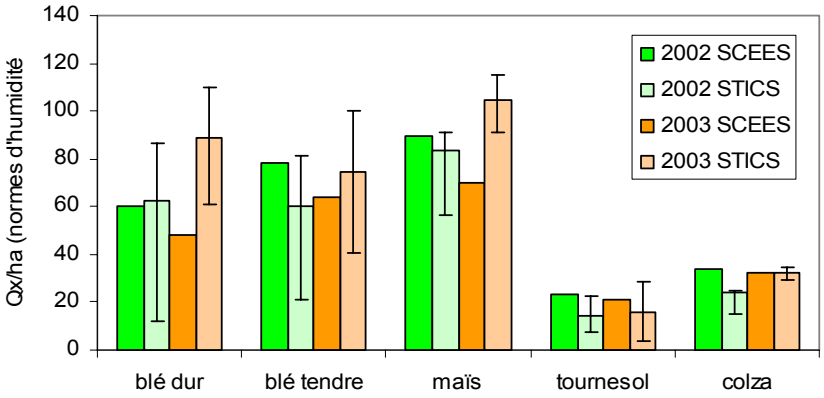


Figure 3. Comparaison entre les valeurs de production par culture (pour les plus représentées) issues des statistiques agricoles régionales (SCEES) et les calculs (STICS) pour les années 2002 et 2003. La barre donne la gamme des situations simulées (3 régions x 3 sols).

Si les ordres de grandeur de production des cultures sont respectés (Figure 3), la hiérarchie entre les années 2002 et 2003 est inversée, trahissant le poids excessif des systèmes irrigués dans les calculs. A l'inverse la culture de tournesol est défavorisée par les calculs, tout simplement parce qu'elle se trouve toujours dans les systèmes non irrigués.

3. Entre sol nu et prairie irriguée : deux extrêmes pour cadrer l'impact de l'agriculture sur le bilan hydrique et le microclimat

3.1. Comportement différentiel des deux types de surface

3.1.1. Bilan hydrique en quantité et qualité

Les besoins maximaux annuels en eau d'irrigation évalués par la quantité nécessaire à apporter à une prairie pour lui éviter tout stress hydrique permettent de borner les apports d'eau qu'une agriculture totalement irriguée pourrait engendrer (Tableau 2). En réalité il ne s'agit pas vraiment d'un maximum, puisque le couvert considéré est constitué de graminées basses et relativement peu fertilisées, ce qui modère l'exubérance du feuillage et par suite ses besoins en eau et nous verrons (chapitre suivant) que dans des contextes agricoles très irrigués, cette valeur peut être légèrement dépassée de quelques dizaines de mm par des cultures comme le maïs. Nous constatons cependant, tout en étant extrêmement variables d'une région à l'autre, que ces apports sont toujours non nuls.

En complétant les eaux météoriques, cette irrigation permet d'assurer le fonctionnement hydrique optimal de la culture : elle maximise la transpiration et entretient par suite un certain niveau d'évaporation du sol (seule l'irrigation par goutte-à-goutte permettrait de limiter cet effet secondaire). Dans ce contexte soulignons que la transpiration, c'est-à-dire l'eau absorbée par les plantes, est d'un ordre de grandeur comparable à l'évaporation directe du sol sous-jacent (Tableau 2), mécanisme purement physique. De plus, la Figure 4 montre que les quantités d'eau évaporées sous un sol de prairie irriguée sont importantes, correspondant au minimum à 70% de celles du sol nu. En effet si l'ombrage du sol par le feuillage tend à diminuer l'évaporation, l'irrigation en humectant régulièrement la surface du sol tend à l'augmenter et selon les régions et les sols une quantité d'eau importante peut ainsi être en apparence "perdue". C'est en particulier le cas en région PACA. Toutefois cette eau évaporée contribue à diminuer la demande climatique au niveau des plantes, et n'est donc pas entièrement perdue pour le système irrigué.

Région	Système	Sol	Irrigation (mm)	Drainage (mm)	ETR (mm)	ETR / ETM	Transpiration (mm)	Evaporation (mm)	Lixivation (kg N/ha)
Picardie	Sol nu	rendzine	0	256	347	0.55	0	347	83
		alluvial calcaire sableux	0	261	375	0.52	0	375	133
		lessivé limoneux	0	232	351	0.55	0	351	60
	Prairie irriguée	rendzine	249	242	630	1	327	303	7
		alluvial calcaire sableux	249	231	621	1	369	252	6
		lessivé limoneux	94	90	619	1	326	293	0
	Prairie sèche	rendzine	0	166	442	0.77	189	253	8
		alluvial calcaire sableux	0	152	457	0.78	218	239	9
		lessivé limoneux	0	52	566	0.94	292	275	0
Ile de France	Sol nu	rendzine	0	292	368	0.57	0	368	67
		brun calcaire	0	390	269	0.42	0	269	84
		limoneux lessivé	0	311	348	0.54	0	348	48
	Prairie irriguée	rendzine	195	271	588	1	297	291	7
		brun calcaire	128	261	531	1	346	185	6
		limoneux lessivé	87	184	568	1	302	266	0
	Prairie sèche	rendzine	0	199	460	0.82	198	263	7
		brun calcaire	0	198	461	0.88	280	182	3
		limoneux lessivé	0	131	531	0.95	275	256	0
Bretagne	Sol nu	brun acide limoneux	0	330	369	0.56	0	369	74
		brun limoneux	0	324	378	0.57	0	378	33
		Lessivé	0	339	369	0.54	0	369	91
	Prairie irriguée	brun acide limoneux	252	326	623	1	331	292	6
		brun limoneux	170	261	637	1	299	338	1
		Lessivé	112	200	621	1	362	259	0
	Prairie sèche	brun acide limoneux	0	259	455	0.78	200	255	11
		brun limoneux	0	196	518	0.89	236	281	1
		Lessivé	0	152	562	0.93	318	243	0

Poitou-Charentes	Sol nu	fersiallitique calcaire	0	440	369	0.53	0	369	47
		rendzine argileuse	0	440	369	0.53	0	369	47
		rendzine argileuse sur craie	0	442	366	0.53	0	366	59
	Prairie irriguée	fersiallitique calcaire	205	405	777	1	308	469	6
		rendzine argileuse	159	369	766	1	322	444	2
		rendzine argileuse sur craie	73	289	782	1	328	454	1
	Prairie sèche	fersiallitique calcaire	0	331	477	0.81	206	271	7
		rendzine argileuse	0	299	510	0.87	249	260	2
		rendzine argileuse sur craie	0	238	574	0.96	308	266	1
Midi Pyrénées	Sol nu	brun calcaire argileux	0	291	417	0.45	0	417	74
		alluvial calcaire	0	274	398	0.47	0	398	71
		brun calcaire	0	274	417	0.47	0	417	46
	Prairie irriguée	brun calcaire argileux	306	223	771	1	402	375	2
		alluvial calcaire	265	191	766	1	432	334	1
		brun calcaire	218	130	752	1	431	351	0
	Prairie sèche	brun calcaire argileux	0	146	544	0.77	233	311	3
		alluvial calcaire	0	122	566	0.80	281	286	1
		brun calcaire	0	69	622	0.85	322	299	0
Champagne Ardennes	Sol nu	rendzine peu profonde	0	498	388	0.60	0	388	78
		alluvial calcaire sableux	0	503	383	0.59	0	383	113
		rendzine profonde	0	492	395	0.60	0	395	78
	Prairie irriguée	rendzine peu profonde	155	451	603	1	290	313	13
		alluvial calcaire sableux	151	439	595	1	318	277	11
		rendzine profonde	81	378	596	1	299	297	6
	Prairie sèche	rendzine peu profonde	0	387	499	0.87	216	284	13
		alluvial calcaire sableux	0	374	513	0.88	247	266	10
		rendzine profonde	0	332	555	0.95	271	284	5
Alsace	Sol nu	brun acide sableux	0	134	384	0.52	0	403	96
		brun calcaire argileux	0	127	370	0.52	0	409	0
		alluvial	0	116	373	0.53	0	419	91
	Prairie irriguée	brun acide sableux	269	134	651	1	352	337	3
		brun calcaire argileux	203	100	653	1	319	330	0
		alluvial	171	38	624	1	355	330	0
	Prairie sèche	brun acide sableux	0	83	455	0.75	179	276	6
		brun calcaire argileux	0	0	478	0.80	196	282	0
		alluvial	0	22	517	0.83	240	276	0
Bourgogne	Sol nu	brun calcaire limoneux	0	373	390	0.57	0	390	47
		brun argileux	0	402	357	0.52	0	357	0
		lessivé hydromorphe	0	333	374	0.55	0	374	0
	Prairie irriguée	brun calcaire limoneux	192	308	623	1	288	362	6
		brun argileux	188	335	603	1	318	290	0
		lessivé hydromorphe	82	213	600	1	301	303	0
	Prairie sèche	brun calcaire limoneux	0	266	503	0.85	206	298	7
		brun argileux	0	0	492	0.84	231	260	0
		lessivé hydromorphe	0	0	561	0.95	273	288	0
Auvergne	Sol nu	brun acide sableux	0	380	381	0.66	0	425	135
		andosol	0	341	399	0.64	0	446	137
		brun hydromorphe	0	342	397	0.66	0	446	0
	Prairie irriguée	brun acide sableux	187	380	579	1	288	291	19
		andosol	62	241	580	1	300	278	7
		brun hydromorphe	25	167	573	1	310	263	0
	Prairie sèche	brun acide sableux	0	241	470	0.96	278	273	6
		andosol	0	319	550	0.85	199	272	20
		brun hydromorphe	0	0	575	0.99	309	266	0
PACA	Sol nu	brun calcaire	0	337	359	0.35	0	359	65
		fersiallitique	0	338	357	0.35	0	357	42
		alluvial calcaire	0	326	368	0.36	0	369	53
	Prairie irriguée	brun calcaire	489	301	888	1	505	383	5
		fersiallitique	433	259	874	1	499	376	2
		alluvial calcaire	349	176	875	1	510	365	0
	Prairie sèche	brun calcaire	0	194	499	0.65	229	270	7
		fersiallitique	0	167	526	0.69	253	273	3
		alluvial calcaire	0	106	590	0.76	312	277	0

Tableau 2. Valeurs moyennes des diverses composantes du bilan d'eau (quantité et qualité) par type de sol et par région pour les trois surfaces sol nu, prairie irriguée et prairie sèche

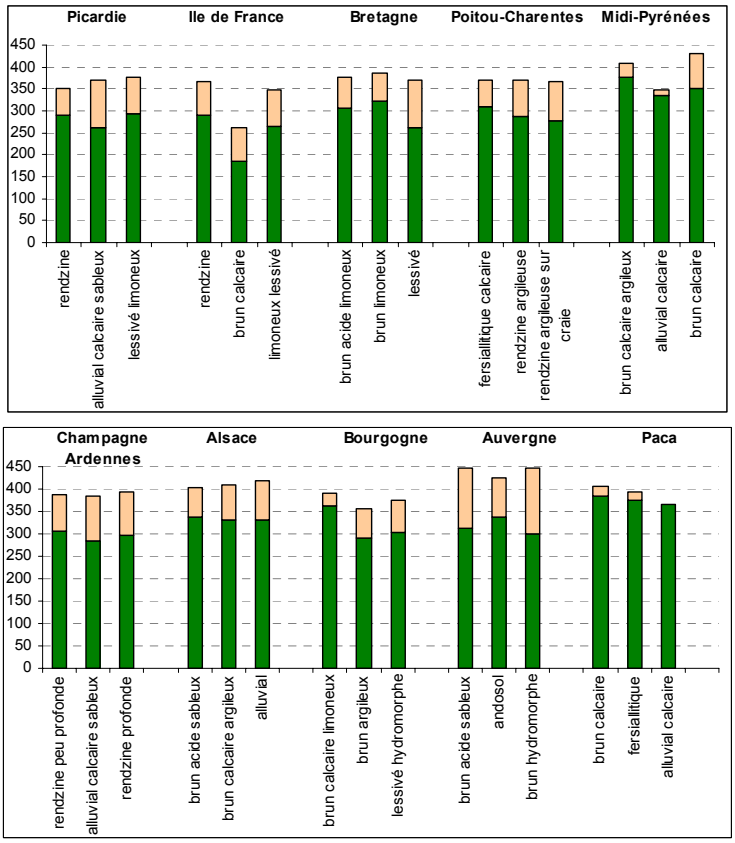


Figure 4. Evaporation directe annuelle moyenne (mm) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région. Les valeurs sont présentées de façon emboîtée (sol nu en beige et sol sous prairie irriguée en vert) mettant en évidence le classement respectif des deux valeurs.

L'ETM correspond à la quantité d'eau maximum consommée par la culture quand elle est exempte de tout contrainte hydrique alors que l'ETR correspond à la quantité d'eau réellement évapotranspirée lorsque la disponibilité en eau devient limitante. Le Tableau 2 permet de vérifier que l'objectif de l'irrigation de la prairie telle que simulée par le modèle est effectivement atteint, puisque le rapport ETR/ETM est de 1. Le rapport des évapotranspirations des deux surfaces, sol nu et prairie irriguée, est de l'ordre de 0.5. Donc une vision synthétique des deux systèmes aboutit à des ordres de grandeurs équivalents pour les trois flux évaporatoires que sont la transpiration des plantes irriguées, l'évaporation du sol sous couvert des plantes irriguées et l'évaporation du sol nu soumis uniquement à la pluviométrie naturelle.

La combinaison entre la capacité de rétention des sols, le régime pluviométrique (naturel et artificiel) et les flux évaporatoires détermine la quantité d'eau qui s'écoule hors du compartiment de sol exploitable par les racines (drainage + ruissellement). Ainsi les situations pédoclimatiques où l'alimentation des nappes par les eaux drainées-ruisselées est particulièrement limitée correspondent à des situations à forte réserve utile, faible pluviométrie et forte demande climatique comme l'Alsace (Tableau 2). A ce titre, il est intéressant de comparer les trois surfaces étudiées dont la capacité à restituer l'eau au milieu est décroissante depuis le sol nu jusqu'à la prairie sèche (Figure 5). La prairie irriguée est à un niveau le plus souvent intermédiaire entre sol nu et prairie sèche, l'eau complémentaire apportée permettant un accroissement de l'évapotranspiration plus que proportionnel. Cependant pour les sols à faible capacité de rétention, les besoins élevés en irrigation peuvent compenser cet accroissement et engendrer des volumes d'eau drainée-ruisselée comparables à ceux du sol nu. Pour les sols hydromorphes, les deux modes de conduite de la prairie n'engendrent que très peu de différence sur les volumes d'eau drainée-ruisselée car la persistance de l'eau dans la macroporosité des sols permet de mieux couvrir les besoins en eau des plantes que dans le cas de sols drainants.

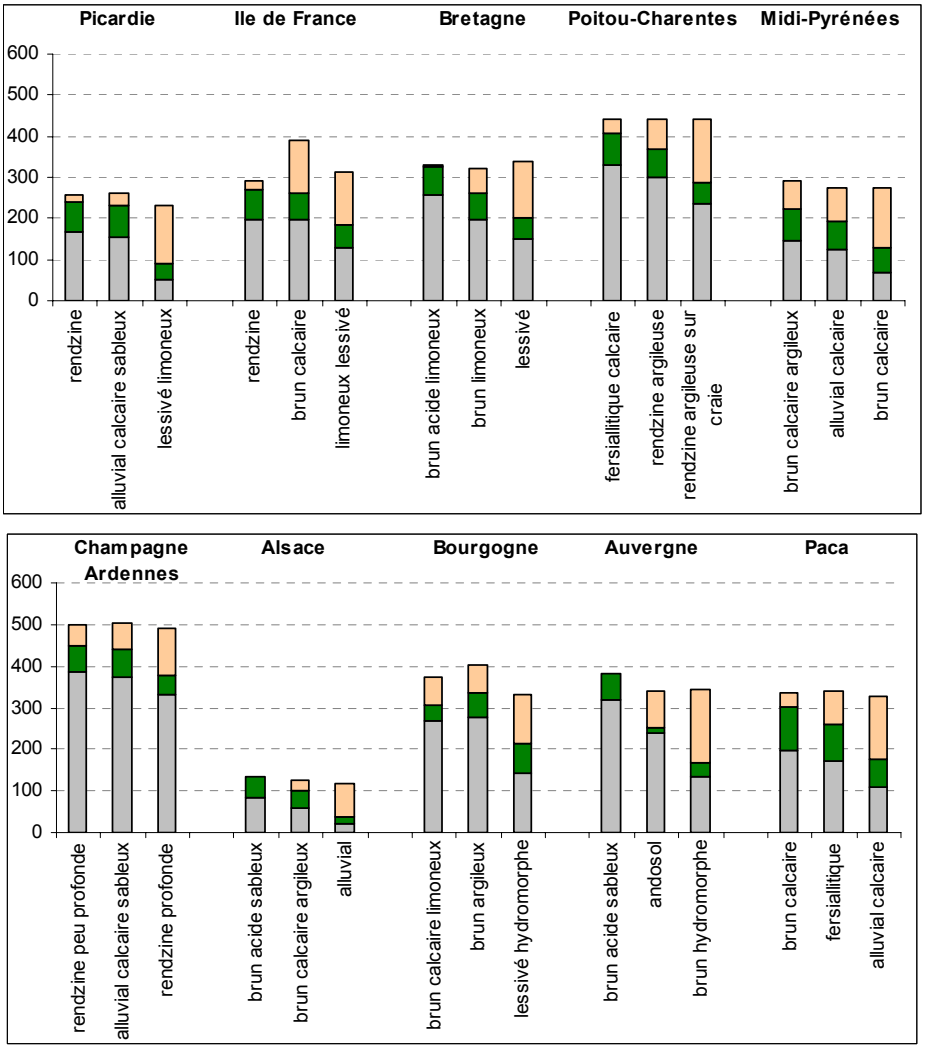


Figure 5. Drainage annuel et ruissellement moyen (mm) pour les trois surfaces étudiées, par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région.
Les valeurs sont présentées de façon emboîtée (sol nu en beige, prairie irriguée en vert foncé et prairie sèche en gris) mettant en évidence le classement respectif des deux valeurs.

La capacité de rétention des sols diminue à la fois les besoins en irrigation et le drainage, de sorte qu'elle joue très peu sur la différence irrigation - (drainage + ruissellement), et donne un sens à la moyenne par site (Tableau 3). Dans 4 régions sur 10, le volume d'eau drainée+ruisselée dépasse les besoins en irrigation. Cela démontre premièrement que localement, l'irrigation intensive peut provoquer un réel déstockage de l'eau en réserve dans les nappes et les retenues, et deuxièmement qu'un bilan à l'échelle annuelle ne suffit pas à déterminer les besoins en irrigation (exemple de la région Poitou-Charentes).

Picardie	Ile-de-France	Bretagne	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées	Champagne-Ardennes	Alsace	Bourgogne	Auvergne	PACA
9	-102	-84	-209	82	-161	124	-131	-171	178

Tableau 3. Différences moyennes (interannuelles et intersols) entre l'irrigation d'une part et le cumul drainage-ruissellement d'autre part (en mm) pour une prairie irriguée.

La quantité de nitrate lixiviée n'est pas proportionnelle aux eaux de drainage. Elle dépend de la capacité du sol à "produire" des nitrates, c'est-à-dire de son potentiel de minéralisation combinant teneur en matière organique (éventuellement neutralisée par le calcaire actif) et caractéristiques

climatiques locales. Mais comme le montre le Tableau 2, elle dépend avant tout de la présence d'une couverture végétale capable d'absorber l'azote minéral. En effet la lixiviation des nitrates est très étroitement reliée à l'occupation du sol.

La relation entre la pluviométrie (naturelle et artificielle) et l'eau qui s'écoule hors du compartiment de sol exploitable par les racines et sert à l'alimentation des nappes est fortement modulée par la réserve utile des sols et l'évapotranspiration des surfaces. La différence entre les deux extrêmes que sont le sol nu et la prairie sèche peut aller de quelques dizaines à une centaine de mm. Malgré l'irrigation, la couverture permanente du sol réduit les phénomènes de drainage-ruissellement et donc la réalimentation des nappes. Dans une large moitié des régions étudiées, les volumes d'eau drainée-ruisselée dépassent les besoins potentiels en irrigation. C'est avant tout l'occupation du sol par une végétation qui permet de limiter la lixiviation des nitrates.

3.1.2. Microclimat

L'occupation du sol et la conduite des cultures ont des impacts sur les climats locaux et ce sont des éléments importants des modèles climatiques globaux. Par leur caractère extrême, les deux types de surface simulés donnent l'amplitude de cet impact.

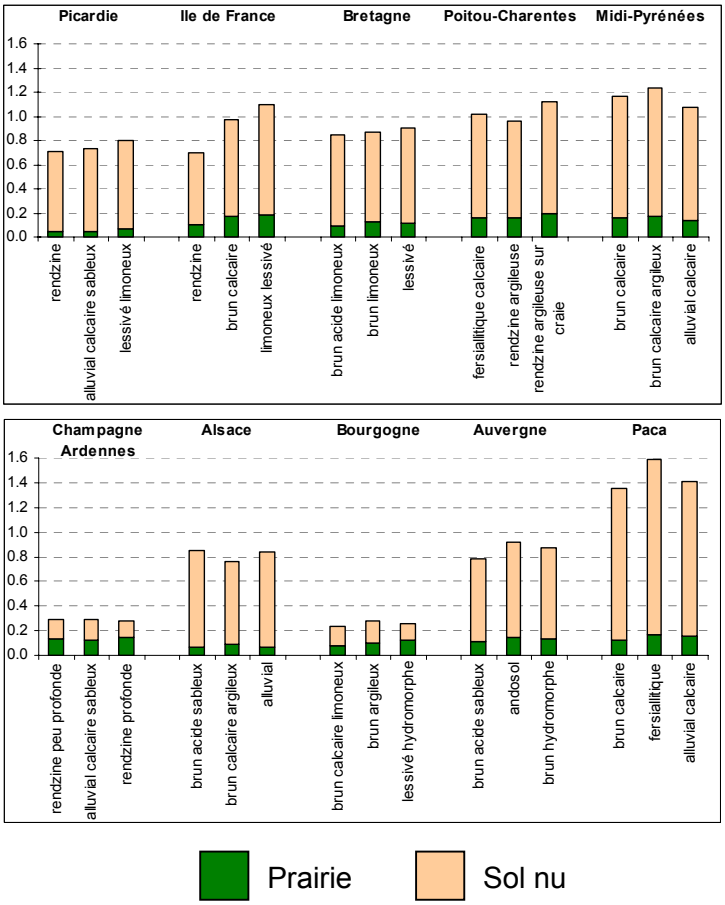


Figure 6. Ecarts moyens de température annuelle entre la surface et l'air (°C) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région.
Les valeurs sont présentées de façon emboîtée mettant en évidence le classement respectif des deux valeurs.

Un rapide regard comparatif sur la Figure A1 (en Annexe) indique les grandes tendances, à savoir un assèchement de l'air au dessus des surfaces en sol nu et une humidification au dessus des prairies. Les élévations de température (Figure 6) induites par une suppression des surfaces végétalisées sont de l'ordre de grandeur de 1°C en moyenne annuelle. Cette élévation de température joue un rôle

important sur les processus biologiques du sol. Au-delà, l'occupation du sol par une végétation agricole "transpirante" est un facteur non négligeable de régulation de la température à l'échelle locale. En terme d'ordre de grandeur, cette différence thermique annuelle entre des surfaces de sol nu et de prairie irriguée est juste un peu plus faible que les prévisions de réchauffement données par les climatologues pour la fin du siècle : entre 1.5 et 6°C.

La température d'une surface de sol nu est, en moyenne annuelle, plus élevée de 1°C par rapport à celle d'une prairie irriguée.

3.2. Sources de variabilité

3.2.1. Gammes de variabilité spatiale inter et intrarégionale

S'il est évident que la diversité des climats et des sols de l'hexagone génère une variabilité importante dans les bilans hydrique et microclimatique, les éléments de ces bilans sont inégalement affectés. La plus grande variabilité apparaît dans les besoins potentiels en irrigation (Figure 7) et les volumes d'eau drainée-ruisselée (Figure 8).

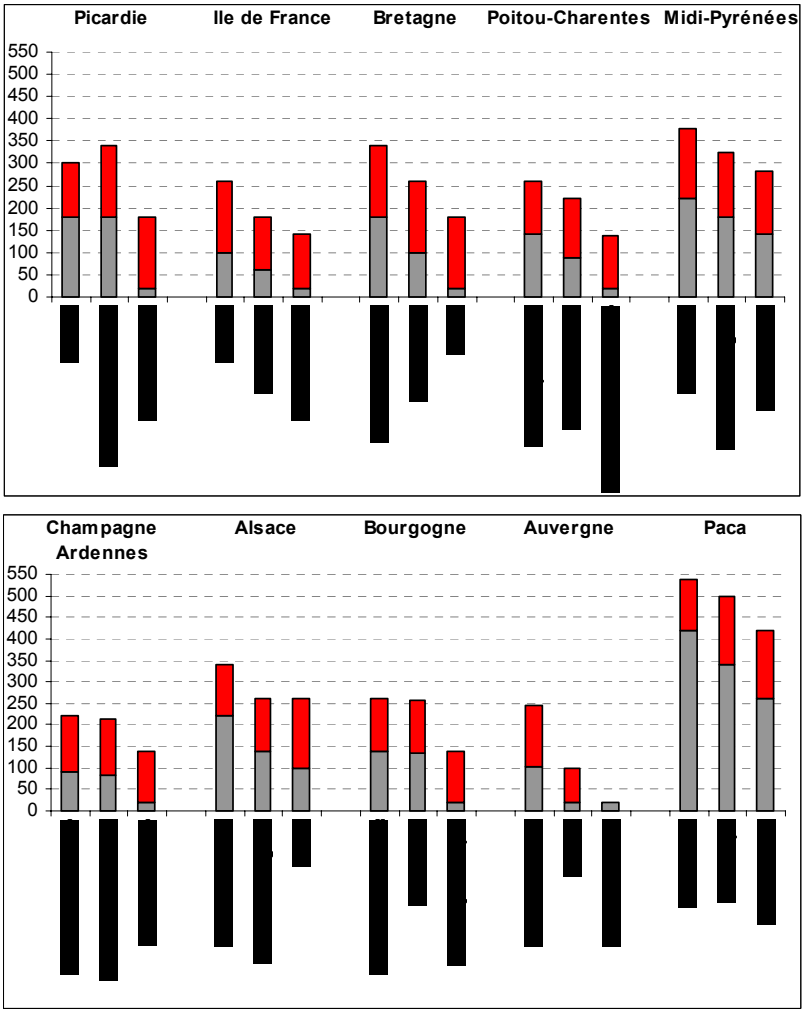


Figure 7. Irrigation annuelle (mm) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région, avec la quantité minimale nécessaire 8 années sur 10 (en gris) et celle nécessaire 2 années sur 10 (en rouge).

L'ampleur de la différence entre ces deux grandeurs indique la variabilité interannuelle

La combinaison des variabilités des régimes pluviométriques d'un côté et des gisements radiatif et thermique d'un autre côté est une première clé expliquant les besoins en irrigation. Nous rappelons ici qu'il s'agit de besoins théoriques maximaux en eau qui sont supérieurs aux pratiques d'irrigation réellement recommandées. Il s'agit donc de comparer les situations en valeurs relatives. Ainsi avec des irrigations potentielles annuelles de l'ordre de 400 mm, la région PACA se situe à un niveau très supérieur à celui des autres régions. Viennent ensuite les régions Midi-Pyrénées et Alsace avec des valeurs de l'ordre de 200 mm. A l'opposé, les plus modestes en terme de besoins en irrigation semblent être les régions Champagne-Ardenne et Auvergne (de l'ordre de 100 mm). Dans les autres régions, il est impossible de réaliser un classement sans tenir compte du poids respectif des différents sols. La variabilité entre types de sol est le plus souvent d'un ordre de grandeur supérieur à celui de la variabilité climatique, allant de 80 à 150 mm. Cette variabilité est en adéquation avec la capacité de rétention des sols, les sols ayant la plus faible réserve utile nécessitant davantage d'eau d'irrigation. Les régimes pluviométriques, presque indépendamment du type de sol, vont déterminer aussi le niveau du flux d'évaporation issu du sol nu par rapport à celui issu de la prairie irriguée : 0.35 en région PACA et 0.60 en Champagne.

De même le volume du compartiment exploitable par les racines est un élément déterminant du drainage+ruissellement des sols. Les sols superficiels ou caillouteux (cas de Poitou-Charentes) présentent généralement des volumes d'eau drainée importants (Figure 8). Il est intéressant de souligner que le type de sol explique davantage la variabilité du drainage que le climat. On voit cependant que la région Poitou-Charentes est celle où le volume d'eau qui retourne aux aquifères (drainage + ruissellement) est le plus élevé, mais aussi le plus variable.

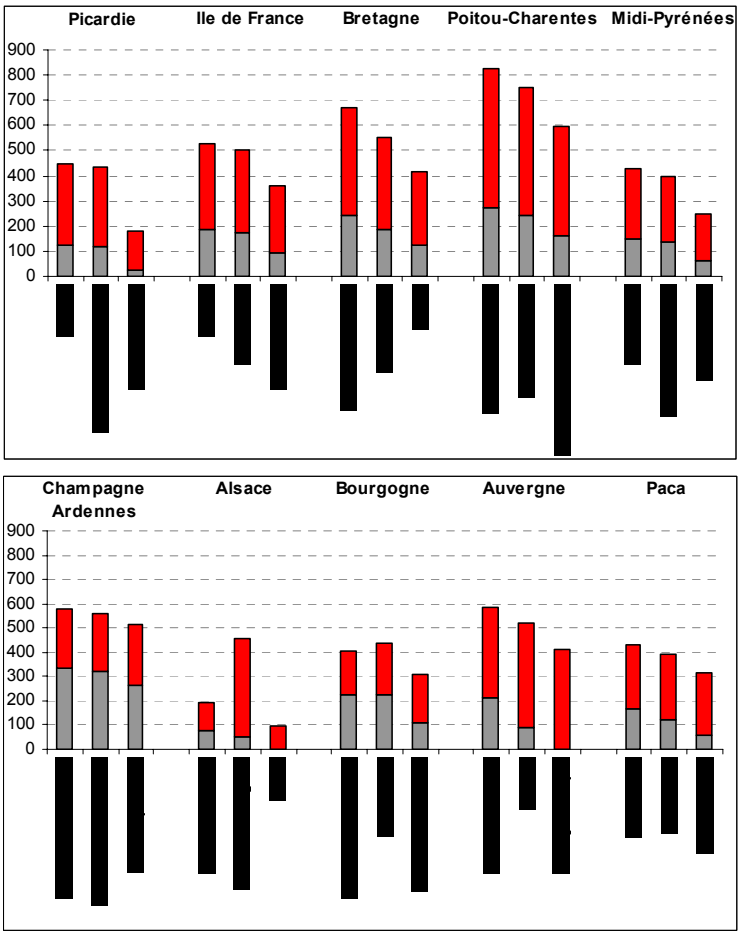


Figure 8. Cumuls annuels de l'eau de drainage profond et de ruissellement (mm) pour une prairie irriguée par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région.

La quantité minimale atteinte 8 années sur 10 est en gris et celle atteinte 2 années sur 10 est en rouge.
L'ampleur de la différence entre ces deux grandeurs indique la variabilité interannuelle

Cet impact très fort du type de sol apparaît aussi sur les différences de drainage-ruissellement entre les surfaces (Figure 5) avec des classements entre types de sol pouvant varier pour le sol nu et la prairie puisque que les propriétés des sols en cause ne sont pas les mêmes (Tableau A1 en annexe).

La transpiration des plantes (Tableau 2) ne présente pas une variabilité aussi importante et les valeurs se situent autour de 300-350 mm au nord et 400-450 mm au sud (PACA et Midi-Pyrénées). La variabilité entre les sols est due aux propriétés de dessèchement de la couche de surface responsables de la formation du mulch naturel. Ce mulch est la pellicule sèche en surface du sol qui fait obstacle aux transferts d'eau et donc aux dessèchements ultérieurs du sol. Ce mécanisme joue deux rôles quelque peu antagonistes au niveau de la plante : en diminuant les pertes par évaporation, c'est un facteur d'économie d'eau au profit de la plante, mais en même temps la réduction de l'évaporation augmente la demande climatique du feuillage par des mécanismes de microconvection. En bilan la présence d'un mulch naturel est plutôt de nature à économiser l'eau ; ce qui est parfaitement illustré en Ile-de-France par le sol brun-calcaire, sol très argileux présentant une forte capacité de mise en place du mulch, sur lequel la transpiration maximale des plantes est supérieure de 50 mm à celle des deux autres sols alors que l'évaporation est diminuée de 100 mm.

En ce qui concerne le microclimat, la nature des sols (couleur, capacité de rétention) et des surfaces, végétalisées ou non, exacerbe les différences climatiques. On constate que les différences inter-régionales pour ce qui concerne l'élévation de température au dessus d'une surface de sol nu peuvent atteindre 1°C (entre l'Ile-de-France et PACA) et les différences intra-régionales entre types de sols 0.4°C (en Ile-de-France). Par conséquent la variabilité microclimatique spatiale est comparable à la variabilité climatique temporelle.

Les besoins en irrigation et les volumes d'eau drainée-ruisselée sont les composantes du bilan hydrique les plus variables spatialement et temporellement. Le climat constitue une première clé d'explication des besoins en irrigation avec en tête les régions PACA (autour de 400mm en moyenne), puis l'Alsace et la région Midi-Pyrénées (autour de 200 mm en moyenne). Vient ensuite la faible capacité de rétention en eau des sols qui explique les besoins en irrigation de régions comme Poitou-Charentes (Figure 2). Le poids des sols est également déterminant sur les volumes d'eau qui alimentent les nappes. Il existe des mécanismes naturels, liés aux propriétés des sols, permettant de limiter l'évaporation directe du sol au profit de la transpiration des plantes

3.2.2. Gammes de la variabilité temporelle

La variabilité temporelle des processus en cause dans le bilan hydrique des surfaces est sans doute l'élément le plus important en terme de gestion de l'eau, tant il est vrai que les décisions stratégiques, aux niveaux d'une part des systèmes de culture et d'autre part des équipements hydriques et hydrauliques, s'appuient sur cette variabilité annuelle et saisonnière. Les figures 7 et 8, en exprimant les résultats sous forme de quintiles, montrent combien les besoins en irrigation et plus encore la recharge des nappes peuvent varier entre années "favorables" et années "défavorables".

Pour appréhender davantage la variabilité interannuelle, nous avons choisi les trois régions d'intérêt agricole retenues pour la seconde partie de l'étude (Ile-de-France, Poitou-Charentes et Midi-Pyrénées). En ce qui concerne le terme de consommation eau (Figure 9) des deux types de surface, il apparaît que la variabilité interannuelle est importante et l'irrigation de la prairie, même si elle l'atténue par rapport au sol nu, ne la supprime pas. Cela souligne le poids de la variabilité des autres composantes du climat que sont le rayonnement et la température. Les différences climatiques entre les trois régions sont complètement gommées pour le sol nu. Par ailleurs les trois courbes de la Figure 9 sont rarement en phase, mettant en évidence le fait que la sécheresse affecte de façon très contrastée l'ensemble de l'hexagone.

Quels que soient les types de couvert, le drainage est typiquement un phénomène hivernal (Tableau A2 en annexe). Cependant, l'irrigation de la prairie provoque également un drainage printanier et estival significatif, même pendant les mois de juillet et août. C'est évidemment parce que l'irrigation

est concentrée sur cette période avec des maxima en août. C'est également à ce moment là que les élévations de température par rapport à l'air culminent, pouvant atteindre 3-4°C sur sol nu. Une analyse par type de sol indique que si le sol joue un rôle important dans le bilan hydrique annuel, il n'intervient pas dans la dynamique saisonnière.

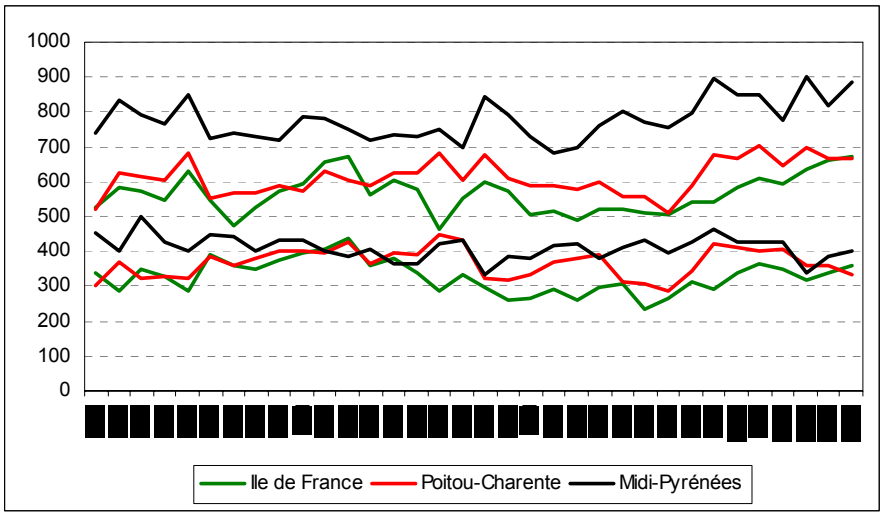


Figure 9. Variabilité interannuelle de l'évaporation du sol nu (en bas) et de l'évapotranspiration de la prairie irriguée (en haut)

La variabilité interannuelle de l'évapotranspiration de la prairie irriguée souligne le poids de la variabilité des autres composantes climatiques que la pluviométrie, rayonnement et température en particulier. L'irrigation culmine en été alors que les phénomènes de drainage-ruissellement se produisent surtout pendant la période automno-hivernale. En été, un sol nu peut être jusqu'à 4°C plus chaud que l'air ambiant.

4. En situations agricoles

L'objectif de cette partie est d'approcher le comportement hydrique de véritables surfaces agricoles. Selon le nombre de cultures constituant le système, la surface est représentée par 1, 2, 3 ou 4 cultures et les synthèses annuelles présentées correspondent à une moyenne de cet ensemble.

4.1. Différence entre les systèmes de culture

Comme attendu, dans chacune des régions analysées, les trois systèmes de culture A, B et C correspondent à des niveaux de satisfaction de besoin en eau décroissants (Figure 10), les systèmes irrigués assurant presque 100% des besoins alors que les systèmes pluviaux les plus déficitaires assurant 85% des besoins, ce qui permet une consommation additionnelle des eaux météoriques par rapport au sol nu de l'ordre de 35% au minimum.

Les apports d'eau d'irrigation ne sont pas dans les mêmes proportions et les systèmes B n'utilisent que de 25 à 45% de l'eau apportée aux systèmes A à base de maïs alors qu'ils permettent de couvrir 95% des besoins. Par ailleurs, bien que le maïs n'occupe pas le sol en permanence, les apports d'eau d'irrigation sont semblables (parfois même supérieurs) aux apports potentiels estimés pour la prairie irriguée. Ceci s'explique par la hauteur des plants de maïs, qui intervient dans le bilan d'énergie et tend à augmenter la demande climatique du couvert végétal par rapport à un couvert bas de prairie, et par un taux de couverture plus faible autorisant davantage de pertes par évaporation.

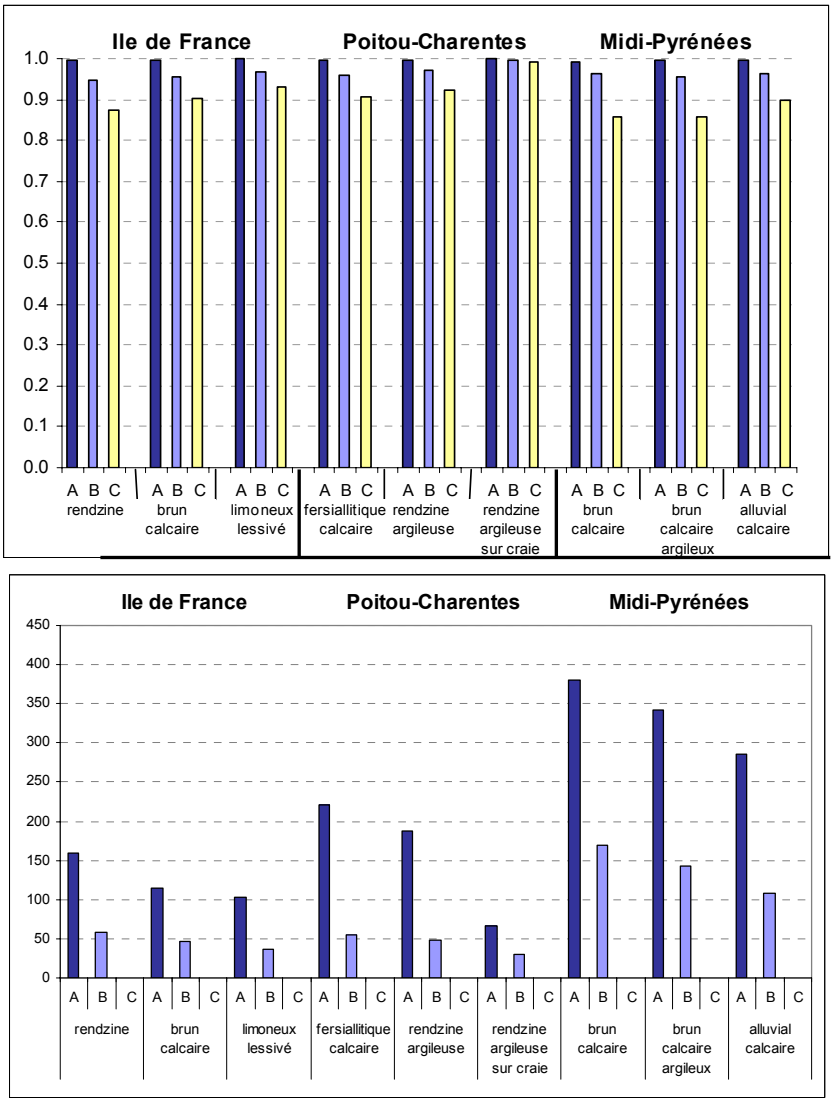


Figure 10. Moyennes interannuelles de la satisfaction des besoins en eau estimée par le rapport ETR/ETM par région, système de culture et sol (haut) comparée aux moyennes interannuelles des apports d'eau d'irrigation (mm) par région, système de culture et sol (bas)

Le modèle permet de rendre compte de l'effet du rationnement en eau des cultures en début de cycle. En effet ce rationnement limite le développement de l'Indice Foliaire du couvert végétal, ce qui en retour limite les besoins en eau ultérieurs de la culture.

Cependant ces apports d'eau n'ont pas tout à fait le même impact sur le microclimat que pour la prairie (Figure A2 en annexe) puisque les différences thermiques annuelles entre les systèmes irrigués et les systèmes pluviaux sont au maximum de 0.2°C avec un minimum de 0.2°C de différence entre l'air et la surface cultivée. L'été, les différences de température entre les systèmes sec et irrigués peuvent être de l'ordre de 1°C provoquant des accélérations de cycle de plusieurs jours.

La différence de drainage (Figure 11) entre systèmes de culture est relativement constante : de l'ordre de 50 mm avec les systèmes irrigués (en tête) puis à un niveau équivalent pour les systèmes B et C. Cela démontre l'efficacité hydrique de l'irrigation d'appoint pratiquée dans les systèmes B. Notons que les systèmes A sont également des systèmes à forte proportion de cultures d'été donc prélevant peu d'eau au printemps contrairement aux cultures d'hiver, ce qui constitue un autre élément en faveur du drainage. Les quantités de nitrates lessivés ne sont pas déductibles des quantités d'eau drainées et la Figure A3 (Annexe) démontre clairement combien le type de sol est déterminant sur la lixiviation, faisant passer les systèmes de culture et la variabilité climatique au second plan des facteurs explicatifs.

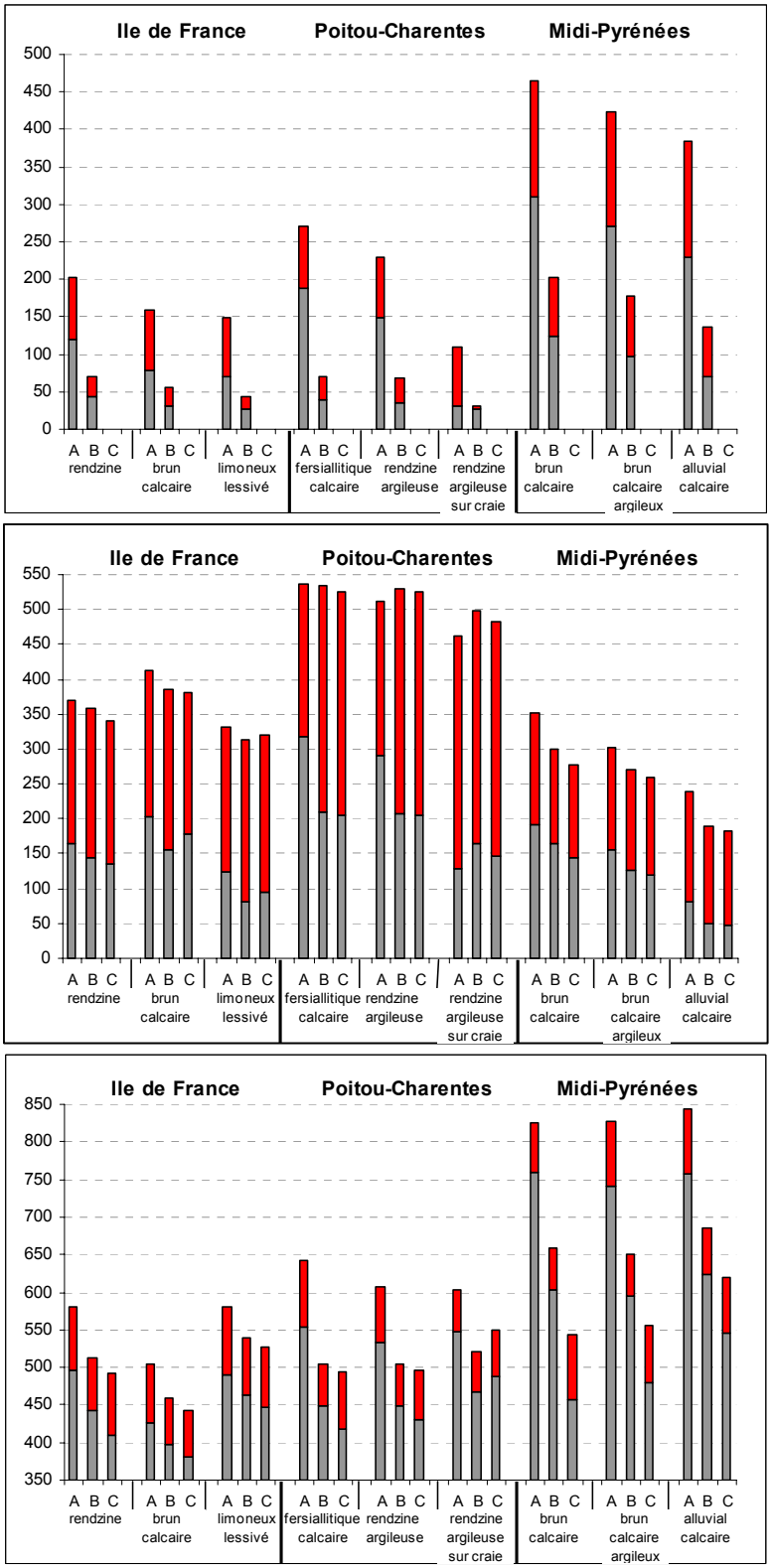


Figure 11. Variabilités interannuelles de l'irrigation (en haut), du drainage (au milieu) et de l'évapotranspiration (en bas).
Les valeurs minimales atteintes 8 années sur 10 sont en gris et celles atteintes 2 années sur 10 sont en rouge.
L'ampleur de la différence entre ces deux grandeurs indique la variabilité interannuelle.

Le déficit hydraulique induit par l'irrigation intensive (Figure 12) est proportionnel aux apports mais inférieurs à ceux-ci de l'ordre de 50 mm. Par exemple en Poitou-Charentes le déficit hydraulique entre les systèmes A et C est de 150 mm pour le sol squelettique (fersiallitique calcaire) alors que

l'irrigation est de 220 mm. En Midi-Pyrénées, ce déficit est si important qu'il provoque un déstockage de l'eau de réserve (risques potentiels de baisse des nappes et vidange des retenues), phénomène qui ne se produit pas pour les systèmes B d'irrigation d'appoint.

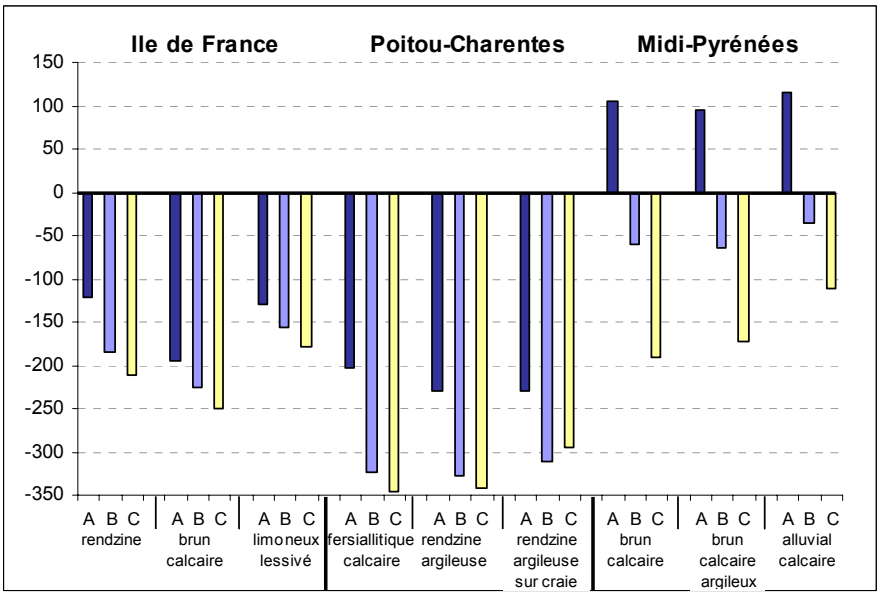


Figure 12. Différences moyennes entre l'irrigation et le drainage (en mm) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région. La différence entre les systèmes C et les systèmes A peut être analysée comme le déficit hydraulique induit par l'irrigation intensive.

La Figure 13 montre que les systèmes irrigués permettent de mettre en évidence le potentiel climatique régional en maximisant la consommation en eau alors que les systèmes pluviaux mais aussi les systèmes avec irrigation d'appoint tendent à homogénéiser le niveau des consommations en eau, même si ces niveaux satisfont très différemment les besoins (Figure 10).

Avec de 25 à 45% des quantités d'eau apportés aux systèmes intensifs A, les systèmes B couvrent 95% des besoins en eau des cultures. Cela s'explique par la présence de cultures d'été plus tolérantes et de cultures d'hiver auxquelles s'ajoute le rationnement du besoin par une contrainte modérée qui joue sur la réduction de la surface foliaire. Sous les systèmes A, intensivement irrigués, les quantités d'eau de drainage sont très nettement diminuées par rapport aux systèmes pluviaux ("C") car l'évapo-transpiration est stimulée par l'exubérance du feuillage. En Midi-Pyrénées, contrairement aux systèmes B basés sur l'irrigation d'appoint, les systèmes A provoquent un véritable déstockage comme pour la prairie irriguée, à l'instar d'autres régions notoirement sèches comme l'Alsace ou la région PACA. La différence thermique entre les systèmes secs et irrigués provoque des accélérations du cycle cultural de plusieurs jours.

4.2. Impact des systèmes de culture sur les variabilités spatiale et temporelle

En ce qui concerne les besoins en irrigation, le classement régional est cohérent avec un gradient nord-sud. Ces différences régionales sont exacerbées en cultures annuelles par rapport à ce qu'elles sont pour une prairie irriguée (Figures 7 et 10). Ainsi les besoins en irrigation du système intensif de la région Poitou-Charentes sont nettement supérieurs à ceux d'Ile-de-France alors qu'ils sont comparables pour la prairie. Cela est lié à la présence de cultures d'hiver dans les rotations du système intensif d'Ile-de-France. Le classement des sols sur les besoins en irrigation est, lui, bien conforme aux résultats obtenus sur prairie. Par ailleurs, la proportion de sols peu favorables (Figure 2) explique la fragilité de la région Poitou-Charentes en cas de sécheresse. Dans le même temps, il semble que Poitou-Charentes valorise mieux les systèmes pluviaux puisque les valeurs ETR/ETM sont les plus

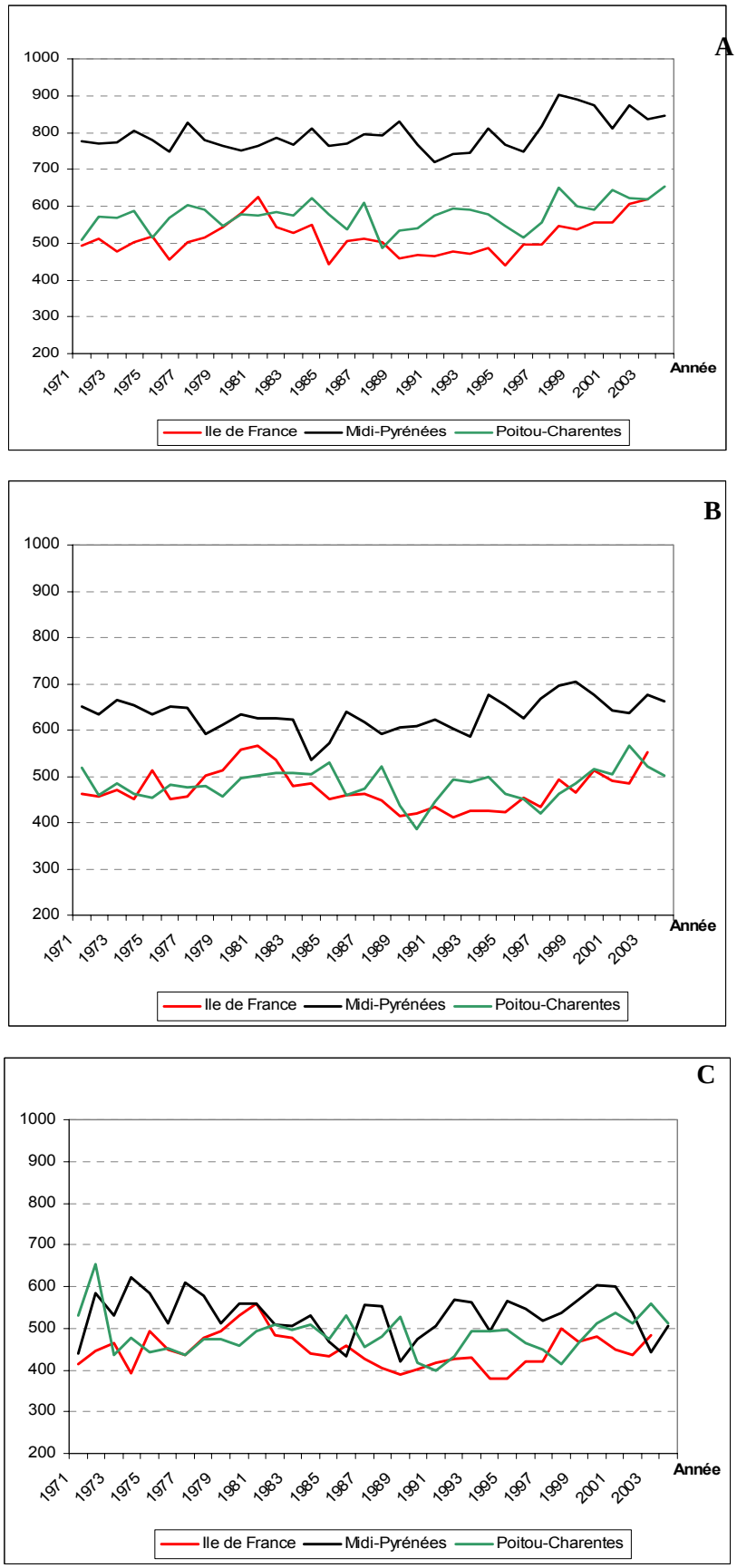


Figure 13. Evolution de la consommation en eau (1971-2004) des trois systèmes de culture (moyenne sur la sole et les types de sol) pour les trois régions test

élevées des trois régions (Figure 10). A l'opposé, c'est en Midi-Pyrénées que les systèmes C ont le plus de mal à satisfaire les besoins en eau requis. Ainsi pour ces systèmes, l'ajustement au type de sol parait indispensable : si par exemple on évalue leur viabilité à une couverture minimale des besoins d'au moins 90%, cela exclut les sols bruns calcaires de Midi-Pyrénées et les rendzines d'Ile-de-France, ce qui conforte les résultats du bilan hydraulique (Figure 12).

Par ailleurs, notons que la capacité du sol à mettre rapidement en place un mulch naturel peut compenser une faible réserve utile et nécessiter des volumes d'eau d'irrigation comparables aux sols profonds, cas du sol brun calcaire d'Ile de France. De ce point de vue les techniques de non-labour, en laissant un mulch végétal à la surface du sol, peuvent jouer un rôle non négligeable sur l'économie en eau de la parcelle.

Concernant le drainage, on retrouve en situations agricoles, la variabilité spatiale inter-régionale perçue lors de l'analyse pédoclimatique. En revanche, la variabilité entre types de sol est légèrement inférieure à celle obtenue sous prairie, même si les systèmes irrigués en totalité ont tendance à accentuer le drainage.

La différence d'ambiance thermique entre types de sol est de l'ordre du dixième de degré, inférieure à la différence induite par le passage d'un système irrigué à un système cultivé en sec, qui elle est exacerbée en ambiance méridionale. En conséquence cette différence entre types de sol n'aura, a priori, que très peu d'impact sur la culture.

Sur la Figure 13, il est intéressant de constater de nouveau que les systèmes de culture irrigués ne suppriment pas la variabilité inter-annuelle de la consommation en eau des cultures. Même si elle n'est pas significative, on observe toutefois une tendance à l'augmentation de cette consommation depuis 7 ans pour les systèmes irrigués, signe de l'augmentation des besoins liés à l'augmentation de la température et dans une moindre mesure au rayonnement. La disparition de cette tendance pour les systèmes pluviaux est un indicateur de la tendance à l'augmentation des sécheresses agricoles.

Par l'écart entre les quintiles extrêmes, la Figure 11 fournit une synthèse de cette variabilité interannuelle, confirmant l'importance de la variabilité des termes d'irrigation et de drainage, le sol intervenant peu dans cette variabilité. La variabilité de la consommation en eau est d'un ordre de grandeur inférieur et clairement liée à la région et au système de culture, avec, sans surprise, une valeur légèrement accentuée pour les systèmes pluviaux.

Système de culture		**A**		**B**		**C**	
Région	**Période**	**Drainage %**	**Irrigation %**	**Drainage %**	**Irrigation %**	**Drainage %**	**Irrigation %**
Ile-de-France	août	1	23	1	6	3	0
	sept.-octobre	8	7	16	**53**	5	0
	nov.-janvier	**49**	0	**51**	0	**49**	0
	février-avril	**35**	0	**30**	0	**38**	0
	mai-juin	4	**43**	0	36	2	0
	juillet	3	27	2	4	3	0
Poitou-Charentes	août	0	**35**	0	5	1	0
	sept.-octobre	12	15	19	**56**	10	0
	nov.-janvier	**65**	0	**72**	0	**75**	0
	février-avril	12	0	5	0	7	0
	mai-juin	11	25	4	32	7	0
	juillet	0	**35**	0	7	0	0
Midi-Pyrénées	août	2	26	1	17	2	0
	sept.-octobre	7	**29**	8	25	4	0
	nov.-janvier	**37**	0	**47**	0	**44**	0
	février-avril	**36**	0	**31**	0	**36**	0
	mai-juin	17	15	12	**44**	12	0
	juillet	1	30	1	14	2	0

Tableau 4. Pics saisonniers de drainage et d'irrigation (en mm) par région et système de culture (tous sols confondus)

Sans surprise, ce sont les mois de juillet et août qui correspondent aux périodes critiques de besoins en eau (Tableau 4) et ce d'autant plus que le climat est plus méridional. Cependant les "avant" saisons printanières peuvent représenter un volume tout aussi important. C'est en particulier le cas en Ile-de-France où le système irrigué comporte à la fois des cultures d'été et des cultures d'hiver. Tout en diminuant considérablement les volumes d'eau requis, l'irrigation d'appoint permet également de déplacer les périodes de consommation intense au printemps. En ce qui concerne la réalimentation des nappes, les systèmes de culture ont peu d'impact sur la période de drainage intense qui reste centrée sur le trimestre novembre-janvier. On constate simplement que les systèmes irrigués de type A fournissent davantage d'eau au printemps que les systèmes plus économes, en relation avec une occupation du sol majoritairement estivale.

Les besoins en irrigation des systèmes A sont croissants du Nord au Sud mais la présence de cultures d'hiver dans les rotations, même irriguées, permet de diminuer significativement ces besoins. Après les systèmes de culture, c'est essentiellement le climat qui pèse sur la variabilité spatiale du drainage et du bilan hydraulique (drainage - irrigation), le sol n'intervenant que très marginalement. Les systèmes B permettent de déplacer la période de besoins intenses en irrigation vers le printemps.

5. Le maïs par rapport aux autres cultures

La culture de maïs est souvent désignée comme une culture très consommatrice en eau parce que très productive. Afin d'apporter des éléments chiffrés dans cette discussion, les résultats précédents ont été réexaminés par culture sur les deux sols extrêmes, à très faible et forte réserve utile. Les variables d'intérêt analysées sont la consommation en eau sur le cycle de la culture, l'irrigation nécessaire et le rendement. En faisant le rapport entre rendement et eau consommée on obtient une estimation de l'efficience agricole de l'eau.

Si l'on excepte la betterave en Ile-de-France, le maïs est, en effet, la culture qui consomme le plus d'eau (Figure 14) avec de 30 à 50% de cette consommation couverte par l'irrigation, l'augmentation des besoins en irrigation suivant très logiquement un gradient nord-sud. Il existe des cultures d'été moins consommatrices comme le sorgho (Midi-Pyrénées) ou le tournesol mais qui évidemment produisent moins (Figure 15) dans les contextes d'agriculture plus économes en eau dans lesquels ils sont produits (systèmes de culture B et C). Pourtant le sorgho montre une efficience de l'eau comparable à celle du maïs, ce qui lui confère un statut agronomique substitutif par rapport au maïs. Le blé est sans doute la culture dont consommation en eau et production se rapprochent le plus de celle du maïs. Son efficience de l'eau est bien supérieure à celle du maïs en Midi-Pyrénées.

Les performances du maïs sont également liées à la fertilisation azotée qui augmente de façon proportionnelle avec les apports d'eau par irrigation (Tableau 1) indiquant que l'intensification liée à l'irrigation s'accompagne d'une forte fertilisation.

Evidemment le choix du type de sol pèse lourd sur l'irrigation requise et la pratiquer sur un sol à faible réserve peut augmenter de 100 mm les besoins en eau d'irrigation.

Le culture du maïs est la culture à vocation nationale la plus consommatrice en eau, ses besoins allant en moyenne de 400 à 600 mm du nord au sud. Cela s'explique parce que c'est aussi une culture très productive dans ces situations de culture intensive, qui s'accompagnent d'une fertilisation élevée. En terme d'efficacité de l'eau, le blé et le sorgho sont des cultures de substitution possibles. Le choix pertinent des sols permet d'économiser jusqu'à 30% de l'eau d'irrigation.

	Ile de France		Poitou-Charentes		Midi-Pyrénées	
	sol 1 : rendzine		*sol 1 : fersiallitique calcaire*		*sol 1 : brun calcaire*	
(mm)	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation
600-649					◀ maïs	
550-599						
500-549	◀ betterave				◀ sorgho	
450-499			◀ maïs			
400-449	◀ maïs				◀ blé dur	
350-399	◀ blés, colza ◀ escourgeon		◀ blé tendre ◀ colza			◀ maïs
300-349	◀ tournesol		◀ escourgeon ◀ tournesol			
250-299	◀ pois			◀ maïs	◀ tournesol	◀ sorgho
200-249		◀ betterave				
150-199		◀ maïs				
100-149						
50-99		◀ blé		◀ blé		◀ blé dur
0-49		◀ colza, tournesol ◀ escourgeon, pois		◀ colza, tournesol ◀ escourgeon		◀ tournesol
	sol 3 : limoneux lessivé		*sol 3 : rendzine argileuse sur craie*		*sol 3 : alluvial calcaire*	
(mm)	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation
600-649					◀ maïs	
550-599						
500-549	◀ betterave				◀ sorgho	
450-499			◀ maïs		◀ blé dur	
400-449	◀ maïs ◀ escourgeon ◀ blé tendre ◀ colza		◀ tournesol ◀ blé tendre			
350-399	◀ tournesol ◀ blé dur		◀ escourgeon ◀ colza		◀ tournesol	
300-349						
250-299	◀ pois					◀ maïs
200-249						
150-199		◀ betterave, maïs				◀ sorgho
100-149						
50-99				◀ maïs		◀ blé dur
0-49		◀ blé, colza ◀ tournesol ◀ escourgeon, pois		◀ blé tendre ◀ tournesol, colza ◀ escourgeon		◀ tournesol

Figure 14. Position relatives des cultures en termes de consommation en eau et de besoins en irrigation sur les 2 sols "extrêmes". Il s'agit de moyennes pour l'ensemble des systèmes de culture

Rendement MS 0%	Ile de France	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées
14-15	◀**betterave**		
13-14			
12-13			
11-12			
10-11			
9-10			◀**maïs**
8-9		◀**maïs**	
7-8	◀**maïs**		
6-7	◀**blé**	◀**blé**	◀**blé**
5-6			
4-5			◀**sorgho**
3-4	◀**escourgeon**	◀**escourgeon**	
2-3	◀**pois** (1)	◀**colza**	
1-2		◀**tournesol**	◀**tournesol**
0-1			

Autres cultures non mentionnées dans leur ordre de production :
(1) : colza et tournesol

Figure 15. Positions relatives des cultures en termes de production récoltable (t/ha)
En rouge, le maïs ; en bleu, les cultures d'hiver et en vert, les cultures d'été

6. Et si la fréquence des sécheresses s'accentuait…

L'inquiétude qui fait suite aux sécheresses de 2003 et 2005 est-elle légitime ? Afin de répondre à cette question, nous avons extrait de la série climatique passée 5 années connues pour leur caractère sec, le plus souvent au printemps et en été mais aussi en hiver (cas de l'année 2004). Parallèlement, nous nous sommes livrés à une étude prospective afin d'apprécier d'éventuels effets cumulatifs des sécheresses en supposant que la succession des années 2003 à 2005 se reproduisait 10 fois. Indépendamment du fait que ces années sont encore dans les mémoires, elles représentent un échantillonnage intéressant des divers modes de sécheresse : sécheresse combinée avec une canicule en 2003, sécheresse hivernale en 2004 et estivale en 2005.

Série climatique	Variable	Système				
		Prairie	**A**	**B**	**C**	**Sol nu**
1972-2005	Pluie	819 (±161)	799 (±175)	802 (±202)	799 (±196)	809 (±147)
	Irrigation	164 (±71)	187 (±52)	48 (±22)	0	0
	Drainage	374 (±132)	416 (±143)	377 (±183)	369 (±176)	440 (±129)
	ETR/ETM	1.00	0.99 (±0.00)	0.97 (±0.00)	0.92 (±0.01)	0.53 (± 0.07)
	INN (*)	0.65 (±0.05)	0.80 (±0.05)	0.81 (±0.07)	0.78 (±0.06)	- - -
	Rendement	9.7 (±0.4)	8.5 (±1.4)	3.9 (±0.8)	3.2 (±0.8)	- - -
1976	Pluie	815	571	556	561	707
	Irrigation	340	184	80	0	0
	Drainage	481	257	206	205	390
	ETR/ETM	1.00	1.00	0.92	0.84	0.43
	INN (*)	0.68	0.65	0.75	0.72	- - -
	Rendement	10.0	5.4	3.2	1.9	- - -
1989	Pluie	619	523	568	549	583
	Irrigation	300	190	42	0	0
	Drainage	239	254	243	235	256
	ETR/ETM	1.00	1.00	0.99	0.87	0.42
	INN (*)	0.62	0.73	0.73	0.76	- - -
	Rendement	9.8	8.2	2.6	3.1	- - -
2003	Pluie	809	782	834	822	740
	Irrigation	259	230	56	0	0
	Drainage	376	390	364	360	379
	ETR/ETM	1.00	1.00	0.93	0.88	0.44
	INN (*)	0.59	0.77	0.80	0.79	- - -
	Rendement	10.0	7.3	3.3	2.7	- - -
2004	Pluie	536	776	741	766	652
	Irrigation	220	230	91	0	0
	Drainage	91	402	381	378	286
	ETR/ETM	1.00	1.00	0.93	0.84	0.48
	IINN (*)	0.62	0.74	0.89	0.82	- - -
	Rendement	9.3	8.7	4.8	2.9	- - -
2005	Pluie	427	397	520	475	427
	Irrigation	299	304	77	0	0
	Drainage	42	120	64	61	97
	ETR/ETM	1.00	1.00	0.91	0.83	0.42
	INN (*)	0.58	0.76	0.88	0.85	- - -
	Rendement	9.1	9.2	4.0	2.8	- - -
Série sèche de 30 ans créée à partir d'un tirage au sort des années 2003, 2004 et 2005	Pluie	587 (±118)	603(±123)	606 (±75)	605 (±76)	591 (±139)
	Irrigation	273 (±44)	244 (± 47)	61 (± 23)	0	0
	Drainage	173 (±100)	234 (±23)	183 (± 101)	180 (± 104)	251 (±132)
	ETR/ETM	1.00	0.99 (±0.00)	0.94 (±0.02)	0.86 (± 0.03)	0.43 (±0.01)
	INN (*)	0.63 (±0.04)	0.76 (±0.04)	0.83 (±0.08)	0.82 (±0.04)	- - -
	Rendement	9.9 (±0.5)	8.2 (± 0.9)	3.9 (± 0.01)	2.8 (± 0.4)	- - -

(*) INN : Indice de nutrition azotée pendant la phase végétative

Tableau 5. Comparaison de l'impact des sécheresses en Poitou-Charentes sur rendzine argileuse (sol médian) sur les grandeurs d'intérêt hydrique et agronomique et sur les cycles de culture à partir de deux séries climatiques (série réelle 1972-2005 et série fictive très sèche) avec les écart-types et des années sèches connues (1976, 1989, 2003, 2004, 2005). Les valeurs sont comparables entre années ou séries climatiques mais pas entre systèmes de culture car les périodes sur lesquelles sont réalisées les moyennes et les cultures sont différentes.

Afin de ne pas mélanger d'autres sources de variabilité que celle de l'occupation des sols, nous nous sommes concentrés sur un seul milieu pédoclimatique, en Poitou-Charentes sur rendzine argileuse. Les résultats (Tableau 5) sont édifiants. En comparant série réelle et série fictive, on voit les besoins en irrigation plus que doubler pour la prairie alors qu'ils n'augmentent que de 30% en moyenne pour les systèmes irrigués à base de cultures annuelles. Beaucoup plus drastique, la diminution du drainage est de l'ordre de 50% sous l'ensemble des surfaces. Les systèmes avec irrigation d'appoint parviennent à maintenir un même niveau de rendement alors que les systèmes pluviaux voient leurs rendements chuter de 12% qui s'expliquent par une diminution de la satisfaction des besoins en eau de 92 à 86%. Dans le scénario fictif, les eaux météoriques ne satisfont plus que 43% des besoins d'évaporation du sol nu, contre 53% avec la série passée. Il apparaît, par ailleurs, une accentuation des déficits azotés (INN) pour les systèmes intensément irrigués (prairie, maïs), ce qui pourrait conduire les agriculteurs à augmenter la fertilisation avec, en corollaire, les effets néfastes sur l'environnement (émission de N_2O notamment). C'est l'inverse pour les systèmes B et C : meilleure couverture des besoins azotés, ce qui contribue à maintenir un niveau de rendement comparable dans les deux séries pour les systèmes B.

Les années sèches isolées démontrent combien les sécheresses peuvent différer dans leurs impacts. Ainsi en 1976, la sécheresse brutale au printemps a fait suite à une période pluvieuse en fin d'hiver qui explique le faible niveau des quantités d'eau d'irrigation pour le maïs mais aussi le déficit azoté lié à la lixiviation des nitrates avant le semis. Il en résulte un faible rendement du maïs malgré l'irrigation, suite au déficit azoté. En 1989, les surfaces emblavées en cultures annuelles ne semblent pas avoir véritablement souffert de sécheresse dans ce contexte pédoclimatique : volume d'eau d'irrigation égaux ou inférieurs à la moyenne, besoins en eau satisfaits pour les systèmes pluviaux, fort drainage. En revanche pour la prairie, culture pérenne, l'impact des sécheresses de 1976 et 1989 est lisible sur le volume d'eau d'irrigation et sur le faible niveau de l'évaporation du sol. La forte sensibilité des systèmes prairiaux à la sécheresse apparaît ici de façon évidente.

Les sécheresses récentes jouent davantage sur les surfaces agricoles, se caractérisant par des volumes d'eau d'irrigation fortement augmentés par rapport à la moyenne (65% pour 2005) et une difficulté accrue pour satisfaire les besoins en eau des systèmes pluviaux. Ce qui est très frappant c'est la sévère diminution des volumes drainés démontrant le poids important que semble prendre la composante hivernale des sécheresses agricoles.

Les années de sécheresse ont des caractéristiques différentes : les sécheresses "anciennes" étaient centrées sur la période printanière et estivale alors qu'il semble que pour les sécheresses récentes le déficit d'eau hivernal pèse beaucoup, diminuant, de surcroît, significativement la réalimentation des nappes. Si les besoins azotés sont mal couverts en période végétative, l'irrigation ne peut induire une augmentation substantielle du rendement qu'avec une augmentation de la fertilisation azotée. Les systèmes prairiaux sont très pénalisés par la sécheresse. Si les scénarios de sécheresse des années 2003 à 2005 se répétaient, les systèmes irrigués intensivement auraient besoin d'au moins 30% d'eau supplémentaire alors que le drainage hivernal serait diminué de 50%.

7. Conclusion

Il faut considérer cette étude par modélisation comme une illustration qui n'a pas l'ambition de reproduire une réalité précise, mais seulement de montrer les possibilités offertes par l'approche de modélisation. C'est pourquoi elle procède d'une approche typologique et permet de proposer des ordres de grandeurs des variables clés du bilan hydrique et une hiérarchisation des facteurs de variation de l'impact de la sécheresse (climat, sol, système de culture). Il ressort que d'un point de vue strictement agronomique les systèmes basés sur l'irrigation de complément présentent beaucoup d'avantages et mériteraient donc d'être déclinés plus précisément pour des conditions locales bien identifiées.

Bibliographie

Baker D.N., Meyer R.E. 1966. Influence of stand geometry on light interception and net photosynthesis in cotton. *Crop Sci.* 6:15-19.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Nicoullaud B., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311-346.

Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussière F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron*. 18: 309-332.

de Wit C.T., Brouwer R., Penning de Vries F.W.T., 1970. The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 47-50.

Duncan W.G., 1971. Leaf angles, leaf area, and canopy photosynthesis. *Crop Sci.* 11 : 482-485.

Annexes

Région	Sol	RU (mm)	Profondeur (cm)	MO[1] (%)	Mulch[2]
Picardie	rendzine	96	50	1.9	*
	alluvial calcaire sableux	103	110	1.9	*
	lessivé limoneux	271	140	1.0	*
Ile de France	rendzine	96	50	1.9	*
	brun calcaire	115	80	2.3	***
	limoneux lessivé	191	140	1.3	**
Bretagne	brun acide limoneux	101	50	1.9	*
	brun limoneux	158	80	0.5	*
	Lessivé	230	140	1.9	*
Poitou Charentes	fersiallitique calcaire	91	50	1.0	*
	rendzine argileuse	124	80	1.9	**
	rendzine argileuse sur craie	338	95	1.9	**
Midi Pyrénées	brun calcaire argileux	85	50	0.8	*
	alluvial calcaire	116	80	1.5	**
	brun calcaire	182	110	1.3	*
Champagne Ardennes	rendzine peu profonde	96	50	1.9	*
	alluvial calcaire sableux	103	110	1.9	*
	rendzine profonde	159	80	1.9	*
Alsace	brun acide sableux	79	80	1.9	*
	brun calcaire argileux	116	80	1.3	**
	alluvial	170	110	1.9	*
Bourgogne	brun calcaire limoneux	101	50	1.0	*
	brun argileux	112	80	1.3	**
	lessivé hydromorphe	170	110	0.5	*
Auvergne	brun acide sableux	55	50	1.9	*
	andosol	159	80	1.9	*
	brun hydromorphe	198	120	1.9	*
Paca	brun calcaire	86	50	1.5	*
	fersiallitique	118	70	0.8	*
	alluvial calcaire	182	110	1.0	*

Tableau A.1. Caractéristiques des sols retenus dans chacune des régions

[1] MO : Matière organique. Une bonne fertilité des sols correspond à une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en calcaire actif qui bloque la minéralisation.

[2] Selon les propriétés de surface du sol, se formera plus ou moins rapidement une couche sèche, appelée mulch naturel, protectrice vis-à-vis de l'évaporation.

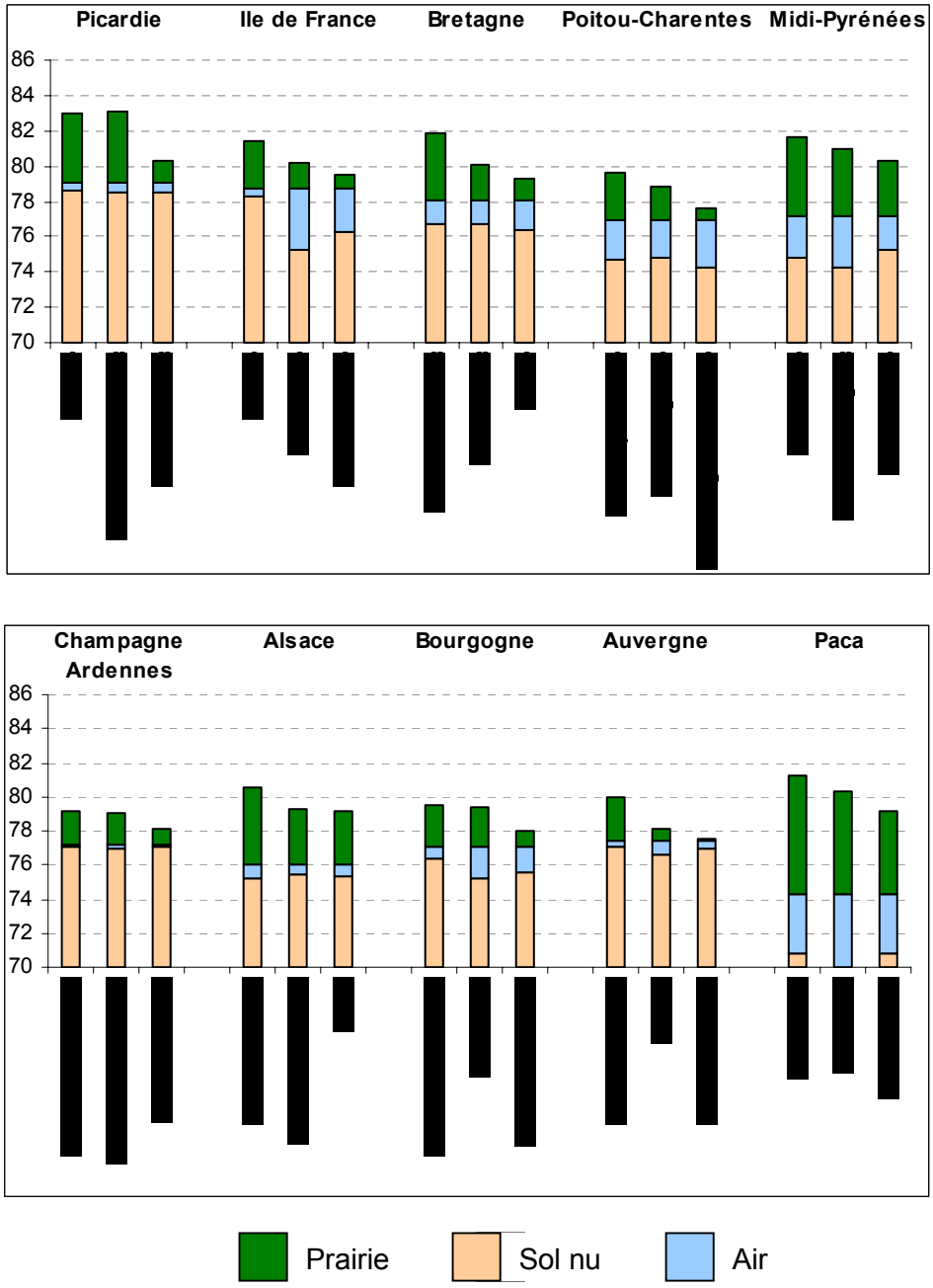


Figure A.1. Humidités moyennes annuelles (%) au dessus du sol nu (1cm) et de la prairie (30cm) comparées à celles de l'air à 2m par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région.

Les valeurs sont présentées de façon emboîtée mettant en évidence le classement respectif des trois valeurs.

Région	période	ΔT prairie (°C)	ΔT sol nu (°C)	Drainage prairie (%)	Drainage sol nu (%)	Irrigation prairie (%)
Ile de France	août	0.1	1.8	0	3	25
	sep-oct	0.0	0.0	9	17	12
	nov-jan	0.0	0.0	49	42	0.0
	fev-avr	0.1	0.5	39	25	14
	mai-juin	0.0	2.4	1	7	38
	juillet	1.0	2.4	2	6	11
Poitou-Charentes	août	0.2	2.2	0	2	29
	sep-oct	0.0	0.0	8	15	12
	nov-jan	0.0	0.0	54	49	0.0
	fev-avr	0.1	0.5	34	25	13
	mai-juin	0.0	2.3	4	8	30
	juillet	1.2	3.0	0	1	16
Midi-Pyrénées	août	0.1	2.5	1	4	28
	sep-oct	0.0	0.1	7	12	13
	nov-jan	0.0	0.0	45	42	0
	fev-avr	0.1	0.6	36	25	8
	mai-juin	0.0	2.2	10	15	33
	juillet	1.1	3.3	1	2	18

Tableau A.2. Valeurs saisonnières moyennes des variables d'intérêt suivantes : ΔT (élévation de la température de la surface par rapport à celle de l'air), drainage et irrigation pour les deux surfaces, sol nu et prairie.

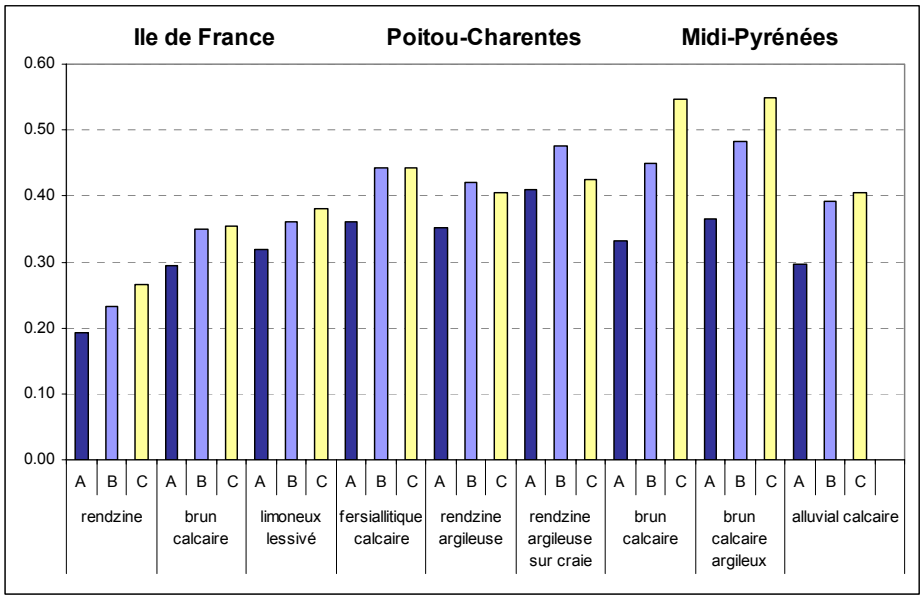


Figure A.2. Moyennes interannuelles de l'élévation de température de la surface agricole par rapport à l'air (ΔT en °C) par région, système de culture et sol

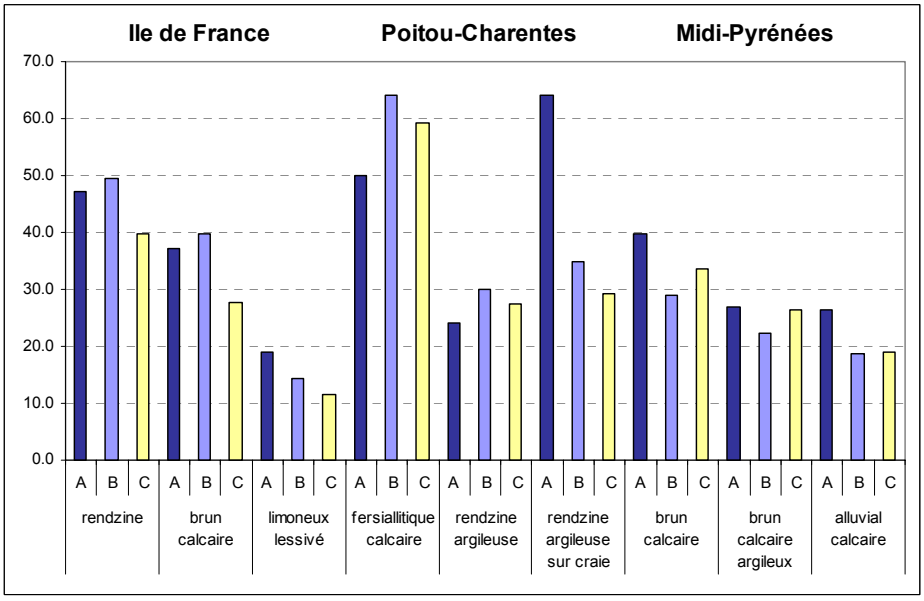


Figure A.3. Moyennes interannuelles des quantités d'azote lixivié (kgN/ha) par région, système de culture et sol

Modélisation de l'impact économique de la sécheresse sur les grandes cultures :

une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques pour la région Midi-Pyrénées

Arnaud Reynaud (LERNA, Toulouse)

Etude réalisée Laboratoire d'Economie des Ressources Naturelles
pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP)

Octobre 2006

Avant propos

Cette étude a été réalisée par le Laboratoire d'Economie des Ressources Naturelles (LERNA, UMR INRA et Université des Sciences Sociales de Toulouse 1) pour le ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP).

L'Expertise scientifique collective (ESCo) "Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau" a mis en évidence un manque de références bibliographiques concernant des données quantifiées sur les impacts agronomiques et économiques de la sécheresse en France. La présente étude a pour objet de pallier ce manque en montrant que, pour une région française donnée, la modélisation microéconomique permet de quantifier et d'analyser l'impact des sécheresses sur les décisions et sur la fonction objectif des agriculteurs. Ce travail s'inscrit donc dans une perspective de recherche et l'on s'écarte quelque peu de l'exercice de mise en perspective de la bibliographie scientifique de l'ESCo. A cet égard, il constitue la première tentative de couplage entre un modèle agronomique et un modèle de calcul économique pour la simulation de l'impact économique d'une sécheresse sur données françaises.

Cette étude illustre le potentiel de recherche pluridisciplinaire au sein de l'INRA en contexte d'expertise finalisée. Grâce à la collaboration avec l'unité Agroclim de l'INRA Avignon, les économistes du LERNA ont pu calibrer les principales caractéristiques pédoclimatiques et agronomiques (types de sols, références climatiques, variétés cultivées) représentatives de la zone choisie pour l'étude économique, la Région Midi-Pyrénées.

Le LERNA a ensuite développé un modèle économique permettant d'analyser et de quantifier l'impact des sécheresses sur l'agriculture en Midi-Pyrénées. Ce modèle économique a été couplé avec le simulateur agronomique STICS antérieurement développé par l'INRA Avignon. Le paramétrage du simulateur agronomique STICS a été opéré à partir du référentiel agronomique établi pour la région Midi-Pyrénées, référentiel présenté dans Brisson et al. (2006) et repris à l'annexe 2 du présent document.*

L'étude que nous présentons s'attache en particulier à répondre, au moyen d'outils d'optimisation et de simulation, à la question suivante : les décisions des agriculteurs à court terme (choix de tactiques d'irrigation) et à long terme (choix de systèmes de culture) permettent-elles une réduction significative du coût imposé à l'agriculture en Midi-Pyrénées par la sécheresse ?

* N. Brisson, F. Huard, A.I. Graux, C. Lebas, P. Debaeke, G. Lemaire, B. Itier : "Evaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique", Etude réalisée par l'unité AGROCLIM de l'INRA pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP), octobre 2006.

1. Introduction : une approche par couplage de modèle biophysique et économique

Une mesure correcte du coût économique de la sécheresse pour l'agriculteur ne peut pas se faire sans les deux éléments fondamentaux suivants :

- une connaissance précise de la relation qui existe entre la quantité d'eau apportée aux plantes par l'irrigation (avec prise en compte de la date de ces apports) et le niveau de production final ;
- une modélisation du comportement de l'agriculteur qui intègre les principales décisions (de court et de long terme) qui peuvent être prises de manière à limiter le coût de la sécheresse.[1]

Une manière de procéder pour intégrer ces deux éléments fondamentaux consiste alors à intégrer des sorties de simulations d'un modèle agronomique de croissance de plante dans un programme d'optimisation du comportement de l'agriculteur. Ce type d'approche est décrite de manière assez exhaustive dans un article récent (Flichman et Jacquet, 2003).

Le dispositif mis en place est destiné à analyser l'impact de la sécheresse sur les décisions d'irrigation et sur les choix de systèmes de culture des agriculteurs dans la région Midi-Pyrénées. Pour cela, on utilise un modèle agronomique (STICS[2]) permettant de simuler le processus de croissance des cultures pour différents itinéraires techniques, notamment différents vecteurs d'apports en eau tout au long de la campagne d'irrigation. Les sorties du modèle agronomique servent d'entrée à un modèle économique qui décrit le comportement de maximisation de la fonction objectif de l'agriculteur.

L'emploi d'un simulateur agronomique permet d'acquérir des données fines sur les relations entre calendriers d'irrigation et niveau physique de la production, Couture (2000). Pour étudier l'impact de la sécheresse sur le comportement et la fonction objectif de l'agriculteur, il paraît peu approprié de se limiter aux données généralement utilisées par les économistes agricoles (volume de production et inputs agrégés), qui ne renseignent que sur les rapports entre rendement et volume d'eau appliqué *total* mais pas sur les relations entre l'output et la répartition *intra-annuelle* de ce volume. Un simulateur agronomique présente en outre plusieurs avantages. C'est un moyen peu coûteux d'acquérir de l'information (les simulations sont un substitut à des expérimentations à grandes échelles) qui permet de générer des données qui correspondent à différentes conditions météorologiques, toutes choses égales par ailleurs. Il est alors possible d'isoler la variabilité des rendements due au climat et de mettre en lumière le rôle joué par l'irrigation, Flichman et Jacquet (2003).

A partir des couples (schémas d'irrigation/rendements) générés pour chaque système de culture par le simulateur agronomique, le modèle économique identifie les choix optimaux en terme de système de culture devant être utilisé ainsi que les combinaisons d'itinéraires techniques (essentiellement apports en eau) – d'un point de vue économique – étant donnée une offre d'eau limitée aux différentes périodes. Ce procédé permet de mesurer l'impact d'un changement du contexte économique ou

1. L'utilisation de modèles mathématiques dynamiques pour analyser le problème de l'allocation intra-saisonnière de l'eau pour l'irrigation a été étudié par les économistes depuis le début des années 1970. On peut par exemple citer Dudley et al. (1971) qui cherchent à déterminer la conduite d'irrigation optimale au cours d'une saison dans un univers risqué et lorsque la quantité d'eau est fixée ex-ante pour la campagne. Yaron et Dinar (1982) analysent l'allocation optimale de l'eau d'irrigation durant les périodes de pointe au niveau d'une exploitation qui produit plusieurs cultures. Plus récemment, Rao et al. (1990) utilisent un modèle de programmation linéaire et dynamique pour étudier un problème similaire.

2. Le modèle français STICS, développé à l'INRA depuis 1996 en collaboration avec des partenaires scientifiques et techniques, s'appuie sur des principes largement admis dans la communauté, voir Brisson et al. (1998) ou bien Brisson et al. (2003). STICS réalise des simulations à l'échelle des rotations en continu sur une série climatique, faisant se succéder des phases de culture et d'interculture. La dynamique est journalière, imposée par le pas de temps climatique, le climat constituant avec le sol et l'itinéraire technique l'ensemble des données d'entrée du modèle. Les données de sorties sont agronomiques (date de récolte, rendement, qualité, consommation d'eau et d'azote) ou environnementales (infiltration profonde, lixiviation de nitrates, température de la surface). STICS simule le fonctionnement carboné (croissance des plantes et élaboration du rendement), énergétique (interception du rayonnement solaire, températures du couvert et du sol), hydrique (évaporation du sol, transpiration des plantes, drainage) et azoté (minéralisation de la matière organique, transport des nitrates, fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses) de l'agrosystème.

climatique sur les décision d'un agriculteur (choix des tactiques d'irrigation et des systèmes de culture) et de déterminer ses fonctions de meilleures réponses à un changement de son environnement (naturel ou économique). Ainsi, l'analyse associe à la fois des informations agronomiques (sol, climat, paramètres techniques) et économiques (prix, contraintes) qui sont les deux ensembles de facteurs externes par rapport auxquels les agriculteurs prennent leurs décisions d'irrigation et de systèmes de culture.

Comme l'indique Flichman et Jacquet (2003), le couplage des modèles agronomiques et économiques remonte au début des années 1990. Cette approche a été largement initiée aux Etats-Unis par le Ministère de l'Agriculture (USDA) qui était alors fortement préoccupé par la mise en place d'une politique efficace de conservation des sols agricoles. Plus tard, les travaux utilisant des méthodes de couplage ont porté sur la question de la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole et sur des problèmes de gestion de pollution par les nitrates ou bien par les pesticides (Mapp et al., 1994 et Bouhzaher et al., 1995).

Dans ce qui suit, on décrit tout d'abord le modèle économique décrivant le comportement de l'agriculteur. Dans la section 3, on présente ensuite le modèle empirique pour la région Midi-Pyrénées. Les sections 4 et 5 de cette étude sont consacrées à l'analyse des résultats des simulations économiques. Dans la section 6, nous résumons les principaux résultats et nous présentons quelques pistes de recherches en économie agricole.

2. Le modèle économique de décision de l'agriculteur

Nous présentons ici de manière non technique le modèle économique de décision de l'agriculteur en univers incertain. La présentation formalisée de ce modèle se trouve en annexe 1.

2.1. Les décisions possibles de l'agriculteur

Considérons un agriculteur représentatif d'une zone géographique et d'un contexte pédo-climatique donnés. Chaque année, un aléa qui représente les conditions climatiques (ETP, pluviométrie, rayonnement solaire…) est tiré dans une distribution de probabilités connue de l'agriculteur. Pour gérer au mieux les réalisations possibles de ces aléas climatiques, l'agriculteur peut prendre 2 types de décisions que nous détaillons maintenant.

- *Décisions de court terme (intra-annuelle)*

A court terme, c'est-à-dire à l'échelle intra-annuelle, les assolements sont fixés et les seules variables d'ajustement dont dispose l'agriculteur sont les tactiques d'irrigation qui peuvent être associées à chaque culture. On entend par tactique d'irrigation associée à une culture un vecteur de dates et de niveaux d'apports en eau tout au long de la campagne d'irrigation. Dans ce qui suit, lorsqu'on parlera de décisions à court terme de l'agriculteur, il s'agira donc des choix intra-annuels de tactiques d'irrigation.

- *Décision de long terme (inter-annuelle).*

A long terme, les assolements c'est-à-dire ici les parts de surface agricole utile (SAU) attribuées à chaque système de culture peuvent être également modifiées par l'agriculteur de manière à maximiser sa fonction objectif. L'hypothèse sous-jacente est que ces choix de systèmes de culture sont effectués une fois pour toutes par l'agriculteur (étant donnée la distribution de l'aléa climatique et étant donné l'ensemble des paramètres du modèle) et qu'ils ne peuvent pas être optimisés chaque année en fonction de la réalisation de l'aléa climatique. Dans ce qui suit, lorsqu'on parlera de décisions de long terme de l'agriculteur, il s'agira donc du choix inter-annuel de système de culture.

Les questions qui sont alors au cœur des simulations économiques que nous allons présenter sont, d'une part, d'estimer le coût pour l'agriculteur représentatif des épisodes de sécheresse et d'autre part, de déterminer si les décisions de court et/ou de long terme de l'agriculteur permettent d'atténuer ou

non de manière significative ce coût. Autrement dit, au delà d'une estimation du coût pour l'agriculteur de la sécheresse, le problème qui nous intéresse est de savoir si des décisions de court terme (choix de tactique d'irrigation) sont suffisantes ou pas pour limiter l'impact de la sécheresse.

2.2. La fonction objectif de l'agriculteur

On suppose que l'agriculteur connaît la relation qui existe entre ses variables de décision à court et à long terme et le niveau de production final (en d'autre terme, il connaît sa fonction de production), qui dépend également de la réalisation de l'aléa climatique[3]. Ainsi l'agriculteur est à même de calculer pour toute décision, qu'il peut éventuellement prendre, le profit qui en résulte, étant donné la réalisation de l'aléa climatique. Le profit annuel est ici simplement défini comme la somme des recettes (valeur de la production augmentée des primes compensatoires) diminuée de la somme des coûts de production (charges d'exploitation augmentées des coûts fixes spécifiques à chaque système de culture).
Une question importante en terme de modélisation consiste alors à caractériser la fonction objectif de l'agriculteur, c'est-à-dire l'objectif qu'il va chercher à maximiser par rapport à ses décisions de court et de long terme.

En univers certain, c'est-à-dire dans un monde où l'agriculteur connaît les réalisations à venir de l'aléa climatique, le problème de son aversion au risque (c'est-à-dire la propension que peut avoir l'agriculteur à préférer des décisions "moins rentables" à condition qu'elles réduisent son exposition au risque) ne se pose pas. L'hypothèse de recherche d'un profit maximal par l'agriculteur peut alors être tout a fait admise comme élément structurant d'un modèle d'optimisation du comportement de l'agriculteur.

Mais c'est en univers incertain que l'agriculteur doit prendre des décisions permettant de limiter ou d'atténuer le coût de la sécheresse. Lorsque l'agriculteur décide à un instant donné de la dose d'eau à apporter ou non à une culture, il met en balance le gain immédiat que pourrait procurer cet apport en eau (gain de croissance de la culture) avec la perte future liée au risque de manquer d'eau plus tard, en cas d'épisode de sécheresse (perte de croissance de la culture liée à un stress hydrique). Un agriculteur très averse au risque aura tendance à adopter un comportement plus conservateur en terme d'utilisation de l'eau en début de campagne, au risque de valoriser faiblement cette eau en fin de campagne d'irrigation dans le cas où aucune sécheresse ne se produit. De même, un agriculteur très averse au risque préfèrera opter pour des systèmes de culture peut-être moins rentables en moyenne mais moins sensibles dans le cas de réalisations de sécheresses. Notons également qu'il est évident que l'efficience de l'eau d'irrigation est plus faible en univers incertain qu'en univers certain puisque certains choix qui pouvaient apparaître comme optimaux ex-ante ne le seront pas ex-post, c'est-à-dire après réalisation de l'aléa.

En univers incertain, supposer que l'agriculteur cherche à maximiser l'espérance de son profit consiste à faire implicitement une hypothèse de neutralité des agriculteurs vis-à-vis du risque climatique, hypothèse clairement rejetée par la plupart des études empiriques existantes. Par exemple, Belhaj Hassine et Thomas (2001) estiment un coefficient d'aversion au risque égal à 0.314 dans le cas d'irrigants tunisiens. Ce coefficient est significativement différent de 1, niveau qui correspond à l'hypothèse de neutralité au risque. Groom et al. (2006), sur des données de céréaliers chypriotes, trouvent une estimation du coefficient d'Arrow-Pratt relativement proche, égale à 0.340.

Une manière de prendre en compte l'aversion au risque de l'agriculteur consiste à supposer qu'il cherche non pas à maximiser son espérance de profit mais son espérance d'utilité du profit. C'est le cadre axiomatique de maximisation de l'espérance d'utilité initialement proposé par Von Neuman et Morgenstern (1944), couramment utilisé en économie du risque et de l'incertain, et que nous allons adopter. La fonction d'utilité reflète alors les préférences de l'agent et ses attitudes face à une situation risquée. Plus concrètement, le degré d'aversion au risque de l'agriculteur est mesuré par le niveau de

3. Il s'agit là d'une hypothèse faite dans la plupart des modèles économiques décrivant le comportement d'optimisation d'un agriculteur, voir Howitt (1995-a) ou bien Howitt (1995-b).

concavité de la fonction d'utilité, plus la fonction d'utilité de l'agriculteur est concave plus son niveau d'aversion au risque est élevé. La fonction d'utilité du profit retiré par l'agriculteur est notée *U(.)* (voir en annexe 1 la présentation technique du modèle économique). Pour conclure, cette fonction d'utilité est donc supposée croissante et concave avec le profit dans le reste de cette étude.

2.3. Le problème d'optimisation de l'agriculteur

Le problème de l'agriculteur consiste alors à allouer sa SAU aux différents systèmes de culture possibles (choix de long terme) et à choisir des tactiques d'irrigation pour chaque système de culture (choix de court terme) de manière à maximiser sa fonction objectif c'est-à-dire l'espérance d'utilité de son profit[4]. Le modèle d'optimisation des décisions de l'agriculteur est décrit de manière beaucoup plus formelle en annexe 1.

3. Le modèle empirique pour la région Midi-Pyrénées

Dans ce qui suit, nous présentons le modèle empirique d'optimisation de l'agriculteur représentatif de la région Midi-Pyrénées en faisant la distinction entre ses choix de court terme (tactique d'irrigation) et ses choix de long terme (part de surface à allouer aux différents systèmes de culture).

3.1. La limitation de l'espace des décisions possibles

Il est clair que l'on doit limiter le nombre de décisions que peut prendre l'agriculteur de manière à ce que le modèle puisse être résolu par optimisation numérique. Nous détaillons maintenant les limitations que nous avons imposées aux espaces des décisions possibles à long terme (choix entre systèmes de culture) et à court terme (choix de tactique d'irrigation pour chaque système de culture).

Espace des décisions de long terme : choix de systèmes de culture possible

Nous avons limité le nombre de systèmes de culture pouvant être utilisés par l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées à 3. Pour la région Midi-Pyrénées, nous avons donc considéré les 3 systèmes de cultures (A, B, C) définis dans la section précédente de ce chapitre. Le système A correspond à une monoculture maïs, B à une rotation Blé dur – Blé dur – Sorgho et le système C à une rotation Blé dur – Tournesol. Ainsi, à long terme le problème d'optimisation de l'agriculteur consiste à déterminer quelle proportion de sa surface agricole utile doit être allouée à chacun des 3 systèmes de culture de manière à maximiser l'espérance d'utilité de son profit.

Espace des décisions de court terme : choix des tactiques d'irrigation

Pour les culture associées à chaque système de culture, l'agriculteur peut opter chaque année pour une tactique d'irrigation. Etant donné les choix de long terme de systèmes de culture, la question que l'on cherche à étudier ici est de savoir si la flexibilité offerte à court terme par le choix de tactique d'irrigation permet de réduire le coût, pour l'agriculteur, des épisodes de sécheresse. Nous définissons de manière formelle une tactique d'irrigation de la manière suivante.

Définition : Une tactique d'irrigation est un vecteur d'apports d'eau à différentes dates de la campagne d'irrigation. Dans ce qui suit, on limite le nombre de dates potentielles d'apports en eau à 12, dates que l'on indice par *p*, $p \in \{1,...,12\}$.

4. Comme on l'a mentionné précédemment, le choix de système de culture (c'est-à-dire de part de SAU à allouer à chaque culture) est un choix de long terme qui ne peut pas être modifié chaque année. Cela paraît raisonnable par exemple pour le maïs irrigué qui peut nécessiter des équipements en irrigation lourds. Au contraire, le choix de la tactique d'irrigation est un choix de court terme qui dépend des conditions climatiques au cours de chaque année. Autrement dit, le choix d'allocation de la SAU entre les systèmes de culture possibles est un choix inter-annuel (on recherche une allocation stationnaire qui ne varie pas avec l'année) alors que le choix de tactiques d'irrigation est une décision intra-annuelle qui varie d'année en année en fonction de la réalisation du climat, notamment.

L'agriculteur dispose donc de 12 dates réparties de manière uniforme tout au long de sa campagne d'irrigation, dates auxquelles il peut choisir d'apporter ou non à chaque culture une dose d'eau prédéfinie. Dans le cas où l'agriculteur a le choix entre 2 doses à chaque date, le nombre de tactiques d'irrigation s'élève déjà à $2^{12} = 4096$. Nous détaillons de manière plus précise les tactiques d'irrigation possibles pour les systèmes de culture A, B et C décrit dans Brisson et al. (2006), voir Annexe 2.

- Pour le système de culture A, nous considérons que l'agriculteur peut apporter à chacune des 12 dates possibles une dose de 30 mm d'eau par hectare avec un cumul maximum de 300 mm sur l'ensemble de la saison d'irrigation. On note $WAT_s^A \in$ ¡ ^{12} la s-ième tactique du système de culture A. Par définition, l'ensemble des tactiques possibles est défini par :

$$WAT_s^A(p) \in \{0, 30\} \text{ et } \sum_{p=1}^{12} WAT_s^A(p) \leq 300$$

  Le cardinal de l'ensemble de tactiques pour le système de culture A est 4083.

- Le système de culture B correspond à une irrigation de complément. On considère ici encore 12 dates possibles auxquelles l'agriculteur peut apporter 30 mm d'eau par hectare. On limite cependant le total des apports sur l'ensemble de la saison d'irrigation à 120 mm. Par définition, l'ensemble des tactiques possibles est défini par :

$$WAT_s^A(p) \in \{0, 30\} \text{ et } \sum_{p=1}^{12} WAT_s^A(p) \leq 120$$

  Le nombre de tactiques d'irrigation considérées pour le système de culture B est donc 794.

- Le système de culture C correspond à des cultures en sec (blé dur et tournesol). Il n'y a donc pas de tactique d'irrigation associée à cette culture.

3.2. La fonction de production

On a supposé que l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées est en mesure de calculer, pour chaque décision possible (système de culture et tactique d'irrigation), la valeur de sa fonction objectif de manière à pouvoir prendre des décisions optimales.

Le modèle d'optimisation du comportement de l'agriculteur doit donc être en mesure de représenter ces différents choix. Pour cela, nous avons utilisé la version STICS-C du modèle agronomique STICS développée par J.C. Poupa (Poupa, 2006). Cette version permet d'associer à chaque vecteur d'irrigation possible le rendement de la culture considérée (nous avons retenu comme variable de rendement la "matière sèche des organes récoltés à 0% d'humidité" directement fournie en sortie de STICS).

Nous ne présentons ici que très brièvement le paramétrage du modèle agronomique STICS puisque nous avons repris les fichiers d'entrée présentés dans l'étude de Brisson et al. (2006). En particulier, les fichiers climat, itinéraire technique, sols et plante nécessaires aux simulations de STICS correspondent aux fichiers utilisés dans cette étude, à l'exception des tactiques d'irrigation.

Pour chaque système de culture, chaque culture, chaque type de sol, chaque année et chaque tactique d'irrigation possible, STICS fournit le rendement (kg/ha) de la culture considérée. Par exemple, si l'on s'intéresse au système de culture A (monoculture de maïs), pour un sol donné on doit effectuer 134739 simulations de STICS qui correspondent aux résultats des 4083 tactiques d'irrigation possibles pendant les 33 années d'historique (1972 à 2005).

3.3. La distribution de l'aléa climatique

Dans ce qui précède, nous avons indiqué que l'agriculteur maximise l'espérance d'utilité de son profit. Autrement dit, l'agriculteur connaît la distribution de probabilité qui caractérise l'aléa climatique et il prend des décisions optimales en conséquence.

Nous disposons de 33 années d'historique (1972 à 2005) pour lesquelles on observe les caractéristiques climatiques de l'année (ETP, rayonnement, pluie…) à un pas de temps journalier. On considère que chaque année climatique observée est équiprobable et on affecte donc à chacune d'elle dans la fonction objectif un poids égal à 1/33.

On peut cependant penser que le réchauffement climatique va se traduire par une augmentation de la fréquence de réalisation des années "sèches" et on peut alors s'interroger sur l'impact de cette augmentation sur les comportements et la fonction objectif de l'agriculteur. La méthode consistera à modifier les probabilités associées aux années climatiques en attribuant un poids plus important aux années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) puis à résoudre le programme d'optimisation de l'agriculteur.

3.4. Le paramétrage du modèle économique

Le modèle a été paramétré en utilisant les données de prix, de coût et de primes compensatoires à partir des fiches production du modèle SICOMORE développé par la Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées (CRA-MP).

La calibration du modèle sur l'année 2000-2001

Le modèle économique a été calibré (paramétrage des coûts de production, des prix des produits…) sur l'année 2000-2001. Ce choix résulte de deux raisons principales. D'abord, il s'agit de la dernière année pour laquelle il est possible de connaître, via les données du modèle SICOMORE de la CRA-MP, les coûts unitaires de production *par culture* pour différents sols de la région Midi-Pyrénées. Ensuite, il est préférable de calibrer le modèle sur une année "moyenne" plutôt que sur une année sèche.[5]

La SAU moyenne en Midi-Pyrénées est de 40 hectares en grandes cultures (source Agreste). A partir de l'observation des surfaces régionales allouées aux différentes cultures en 2000-01 (maïs, blé dur, sorgho et tournesol, source CRA-MP), nous avons calculé la part de surface allouée aux systèmes de culture A, B et C en 2000-01[6]. On obtient pour l'année 2000-01, pour le système de culture A (monoculture maïs) 46.0% de la SAU, pour le système de culture B (Blé dur – Blé dur – Sorgho) 19.1% et pour le système de culture C (Blé dur – Tournesol) 34.9%.

Les données de prix et de coût de production

Dans le tableau 1, nous présentons les données économiques qui ont servi au calibrage du modèle d'optimisation de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées sur l'année 2000-01.

Il convient de relever que les données de coût de production par culture de la CRA-MP, $C^K(t)$, correspondent aux coûts variables uniquement (c'est-à-dire aux charges d'approvisionnement qui incluent les dépenses d'engrais, de semences, de produits phytosanitaires, d'assurance grêle ainsi que les différentes taxes sur la culture et les frais de récolte). Les dépenses en eau fournies par les fiches production du modèle SICOMORE de la CRA-MP correspondent à un prix unitaire de 0.64 euro par mm/ha, soit 0.064 euros par mètre cube. C'est le prix que nous retiendrons dans ce qui suit.

Les coûts spécifiques à chaque système de culture, C^K, ont été calibrés de manière à ce que le programme d'optimisation de l'agriculture ait pour optimum libre l'allocation des surfaces entre

[5] Se faisant, on se place dans un contexte de mesures PAC avant réforme 2003.

[6] Nous ne disposons au niveau de la région Midi-Pyrénées que des données de surface par culture et non pas des surfaces allouées à chaque système de culture. Une manière de procéder pour retrouver cette information pourrait être d'estimer un processus de Markov à partir des données de surface régionales et d'en déduire les proportions de surface attribuées à chaque système de culture (voir Howitt et Reynaud (2003) par exemple). Nous avons opté pour une méthode beaucoup plus simple qui consiste à additionner les surfaces observées en 2000-01 pour le maïs grain, le blé dur et le tournesol. La proportion de maïs correspond à la proportion du système de culture A, celle de blé dur au système B et celle de tournesol au système C.

systèmes de culture observée en 2000-01[7].Le principe de ce calibrage consiste à résoudre le programme d'optimisation de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées en contraignant les parts de surface allouées aux systèmes de culture A, B et C à être égales à celles observées. Les variables duales associées à ces contraintes nous donnent alors les coûts spécifiques devant être associés à chaque système de culture, coûts que l'on intègre alors dans la fonction objectif de l'agriculteur.

Tableau 1. Paramétrage du modèle économique pour la région Midi-Pyrénées pour l'année 2000/2001 par type de sol et système de culture

		Unité	**A**		**B**				**C**	
			Maïs		**Blé dur – Blé dur – Sorgho**				**Blé dur – Tournesol**	
			Maïs		Blé dur		Sorgho		Blé dur	Tournesol
			irrigué	sec	irrigué	sec	irrigué	sec	sec	Sec
Sol Type 1	Prix du produit, $p^K(t)$	*Euros/kg*	0.1188	0.1188	0.1263	0.1263	0.0963	0.0963	0.1263	0.2665
	Prime, $PAC^K(t)$	*Euros/ha*	448.17	300.3	643.45	643.45	448.17	300.3	643.45	342.53
	Coût variable, $C^K(t)$	*Euros/ha*	650.1	459.6	585.95	489.16	441.2	259.0	489.16	224.54
	Coût fixe par SdC, C^K	--	Endogène au modèle							
Sol Type 2	Prix du produit, $p^K(t)$	*Euros/kg*	0.1188	0.1188	0.1263	0.1263	0.0963	0.0963	0.1263	0.2665
	Prime, $PAC^K(t)$	*Euros/ha*	448.17	300.3	643.45	643.45	448.17	300.3	643.45	342.53
	Coût variable, $C^K(t)$	*Euros/ha*	698.3	459.6	585.95	489.16	441.2	309.29	489.16	293.14
	Coût fixe par SdC, C^K	--	Endogène au modèle							
Sol Type 3	Prix du produit, $p^K(t)$	*Euros/kg*	0.1188	0.1188	0.1263	0.1263	0.0963	0.0963	0.1263	0.2665
	Prime, $PAC^K(t)$	*Euros/ha*	448.17	300.3	643.45	643.45	448.17	300.3	643.45	342.53
	Coût variable, $C^K(t)$	*Euros/ha*	729.88	516.58	585.95	489.16	441.16	368.29	489.16	418.29
	Coût fixe par SdC, C^K	--	Endogène au modèle							

Source : les valeurs reportées ont été calculées à partir des fiches production du modèle SICOMORE développé par la Chambre d'agriculture de Midi-Pyrénées.

La spécification de la fonction d'utilité de l'agriculteur

Les agriculteurs ne connaissent pas de manière parfaite la situation dans laquelle ils effectuent leurs choix de productions (systèmes de culture, itinéraires techniques…). Cette connaissance imparfaite du futur (par exemple des précipitations à venir ou bien d'éventuelles restrictions d'irrigation en cas de sécheresse) confère à leurs revenus un caractère incertain. Tous les agriculteurs n'ont alors pas les mêmes comportements vis-à-vis de la gestion de ce risque. Les goûts des agriculteurs sont en général représentés par leurs préférences et donc par leur fonction d'utilité (fonction *U(.)* dans les programmes $\boldsymbol{P_{2a}}$, $\boldsymbol{P_{2b}}$ en annexe). La fonction d'utilité reflète les préférences de l'agent et ses attitudes face à une situation risquée. Elle permet de ramener l'étude des décisions individuelles rationnelles à des programmes de maximisation sous contraintes.

Nous avons retenu une fonction d'utilité avec aversion relative pour le risque constante car c'est, d'une part, une forme fonctionnelle très couramment utilisée en économie de l'incertain et, d'autre part, une forme dont les paramètres s'interprètent très aisément. L'utilité que retire l'agriculteur d'un profit Π s'écrit :

$$U(\Pi) = \frac{1}{1-\alpha}\Pi^{1-\alpha}$$

[7] En ce sens, notre approche est, dans un premier temps, de nature positive et non pas normative. Le paramètre de coût spécifique à chaque culture est calibré de manière à ce que l'allocation observée au niveau régional corresponde à un optimum pour l'agriculteur. Dans l'esprit on se rapproche d'un modèle de programmation positive du type de ceux développés dans Howitt (1995-a) ou Howitt (1995-b).

où α est le coefficient relatif d'aversion au risque de l'agriculteur (coefficient d'Arrow-Pratt). Ce coefficient traduit les préférences de l'agriculteur pour un lissage de ses revenus agricoles dans le temps ou entre les différents états de la nature possibles.

Il n'existe pas à notre connaissance de travaux publiés sur l'estimation de l'aversion au risque des producteurs faisant intervenir l'eau d'irrigation, en France. Les travaux les plus proches sont, soit sur le cas français mais n'incluent pas l'eau d'irrigation dans la liste de leurs intrants, soit sur des pays étrangers. Par exemple, Belhaj Hassine et Thomas (2001) estiment le coefficient d'Arrow-Pratt à 0.314 dans le cas d'irrigants tunisiens. Groom et al. (2006), sur des données de céréaliers chypriotes, trouvent une estimation du coefficient d'Arrow-Pratt égale à 0.340.

Dans l'application du modèle au cas de la région Midi-Pyrénées, nous avons choisi un coefficient d'aversion au risque égal à 0.2. Des exercices de statique comparative seront conduits de manière à tester la stabilité des résultats obtenus au choix du coefficient d'aversion au risque.

4. Les résultats du modèle économique – cadre standard

4.1. Les résultats du modèle d'optimisation économique

Nous présentons, dans le tableau 2, le résultat des simulations économiques dans le cadre standard pour les 3 sols représentatifs de Midi-Pyrénées. Nous rappelons que, dans le tableau suivant, les niveaux d'irrigation correspondent aux niveaux optimisés par l'agriculteur étant donnés les prix des cultures, les coûts unitaires de production, la distribution de l'aléa climatique, etc.

On se limite dans un premier temps à une discussion sur le niveau des marges brutes (même s'il est nécessaire ici de rappeler que l'agriculteur représentatif ne cherche pas nécessairement à maximiser sa marge brute mais l'utilité qu'il retire de cette marge brute) et sur celui de l'irrigation optimale.

Tableau 2 : Les résultats du modèle de base

		1972-2005			**Années sèches** [a]		
Systèmes de culture		**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
Type sol 1	Marge Brute (euros/ha)	472.3	669.5	595.3	436.7 *-7.5%*	612.5 *-8.5%*	532.5 *-10.6%*
	Irrigation (mm/ha)	134.6	10.3	--	210 *+56.0%*	12 *+16.5%*	-- --
Type sol 2	Marge Brute (euros/ha)	917.4	725.3	746.7	628.6 *-31.5%*	725.8 *+0.1%*	664.48 *-11.0%*
	Irrigation (mm/ha)	157.7	12	--	246 *+56.0%*	12 *+0.0%*	-- --
Type sol 3	Marge Brute (euros/ha)	932.0	742.1	778.1	718.1 -23.0%	702.5 *-5.3%*	675.8 -13.1%
	Irrigation (mm/ha)	145.7	10.3	--	282 *+93.5%*	10 *-2.9%*	-- --

[a] : Les années sèches correspondent aux années 1976, 1989, 1990, 2003 et 2005.
La marge brute et l'irrigation correspondent à des moyennes annuelles calculées sur l'ensemble des années pour la colonne *1972-2005* et sur les années sèches pour la colonne *Années sèches*.
Les pourcentages correspondent à la variation par rapport à la colonne 1972-2005. Par exemple, la marge brute moyenne pour une année sèche du système de culture A et un sol de type 1 est 7.5% plus faible que la marge brute moyenne calculée sur l'ensemble des périodes.

- *Une sensibilité importante des résultats au type de sol*

Tout d'abord, le type de sol a un impact très important sur la marge brute associée à chaque système de culture. C'est en particulier vrai pour le système de culture A (monoculture maïs) dont la marge brute passe en moyenne, sur l'ensemble des années 1972-2005, de 932 euros par ha avec un sol de

type 3 (sol profond avec forte réserve utile) à 472.3 euros par ha dans le cas d'un sol 1 (sol peu profond avec faible réserve utile). On peut relever cependant des résultats (en termes de marge brute et de niveau optimal d'irrigation) relativement proches pour les sols de type 2 et 3.

Notons également que dans le cas d'un sol de type 1, c'est le système de culture B (Blé dur – Blé dur – Sorgho) qui permet d'obtenir la marge brute moyenne la plus élevée sur les années 1972-2005 alors qu'en cas de sol de type 2 ou 3 (sol moyennement profond et réserve utile intermédiaire et sol profond et réserve utile élevée), c'est le système de culture A (monoculture maïs) qui est préféré selon le même critère.

- *Une sensibilité forte de la marge brute du système de culture A à l'impact de la sécheresse*

Intéressons-nous maintenant à l'impact des années sèches sur la marge brute de l'agriculteur représentatif de la région Midi-Pyrénées et sur ses décisions optimales d'irrigation. La figure 1 donne la moyenne des marges brutes optimisées par système de culture (A, B, et C) et par type de sol (1, 2 et 3) sur l'ensemble des années de 1972 à 2005 et sur les années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003, 2005).

En terme de variation de la marge brute par rapport à la moyenne 1972-2005, c'est le système de culture A (monoculture maïs) qui enregistre les plus forts changements suite aux années sèches : –7.5% dans le cas d'un sol de type 1, –31.5% dans le cas d'un sol de type 2 et –23.0% pour un sol de type 3. L'impact des années sèches sur la marge brute moyenne dans le cas d'un système de culture C (Blé dur – Tournesol) semble relativement indépendant du type de sol. La perte moyenne de marge brute varie de –13.1% pour un sol de type 3 à –10.6% pour un sol de type 1.

Le système de culture B semble légèrement profiter des années sèches dans le cas d'un sol de type 2. Pour les sols de types 1 et 3, la perte en marge brute lors des années de sécheresse représente respectivement 8.5% et 5.3%.

- *Une irrigation importante du système de culture A en cas de sécheresse… qui peut être néanmoins réduite par l'outil tarifaire*

En terme d'impact des sécheresses sur les niveaux d'irrigation optimaux, c'est encore le système de culture A qui paraît le plus sensible. Par exemple, sur l'ensemble des années 1972-2005, l'irrigation optimale moyenne est de 145.7 mm pour le système de culture A pour le sol de type 3. Dans le cas d'années sèches, on relève une augmentation de 93.5% et l'irrigation optimale moyenne passe à 282 mm.

Il convient de relever que l'augmentation du niveau optimal d'irrigation dépend bien entendu du prix de l'eau payé par l'agriculteur. Si l'on augmente de 50% le prix de l'eau au mètre cube par rapport au cas de base (le prix de l'eau passe de 0.064 €/m^3 à 0.128 €/m^3), l'irrigation optimale moyenne en cas de sécheresse devient égale à 210 mm contre 282 mm précédemment (-25.5% en volume).

Cela traduit le fait que, même dans un système de monoculture maïs, les agriculteurs sont sensibles à des variations du coût de l'eau, variation il est vrai ici importante puisqu'elle représente une augmentation de 50% des dépenses opérationnelles en eau.

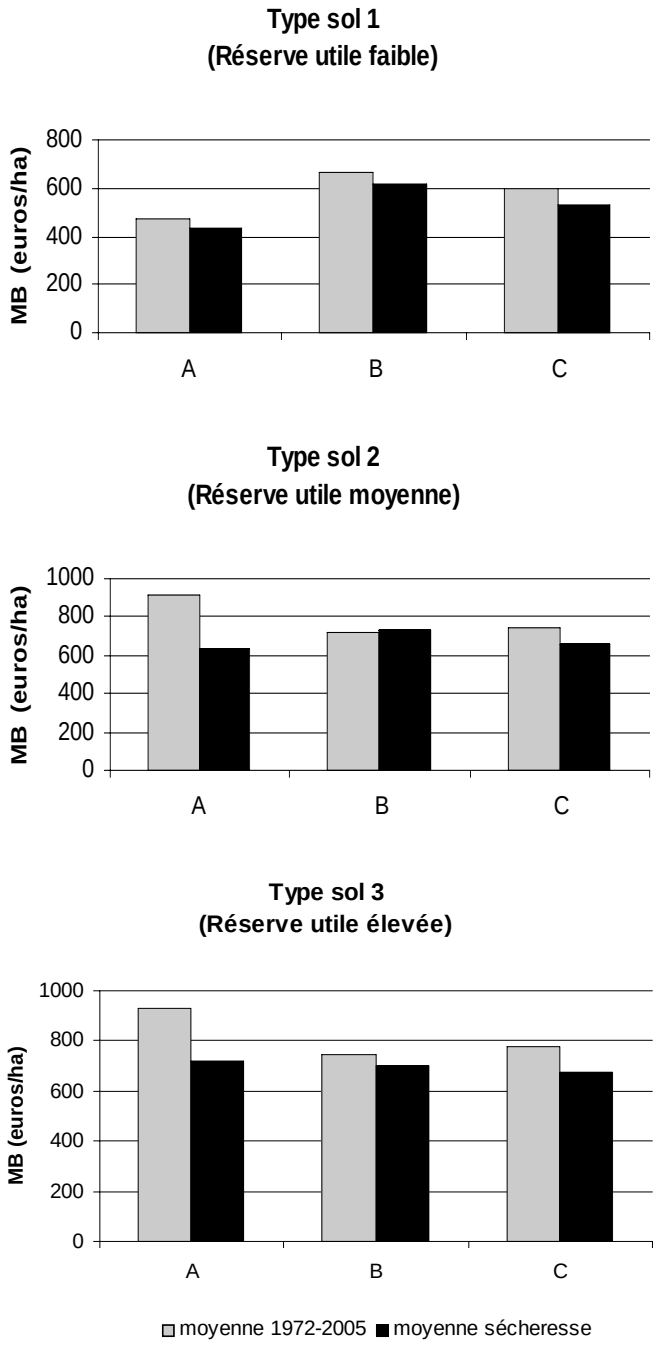
- *Synthèse des résultats dans le cadre standard*

Pour conclure, sur les résultats du tableau 2, l'impact des années sèches sur la marge brute optimisée et sur les décisions d'irrigation de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées semble :

- important dans le cas d'un système de culture A (monoculture maïs) – *perte de marge brute de 20.7% en moyenne pour les 3 sols* – ;
- très modéré dans le cas d'un système de culture B – *perte de marge brute de 4.6% en moyenne pour les 3 sols – ;*
- relativement important dans le cas d'un système de culture C – *perte de marge brute de 11.6% en moyenne pour les 3 sols* –.

Figure 1. Moyenne des marges brutes optimisées par système de culture sur l'ensemble des années et sur les années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003, 2005).

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



Ces résultats soulignent que les limitations d'irrigation déterminent de manière fondamentale l'impact des sécheresses sur la marge brute de l'agriculteur. En effet, pour le sol de type 3 et sur l'ensemble des années 1972-2005, l'irrigation optimale moyenne est de 145.7 mm pour le système de culture A. Par contre, dans le cas d'années sèches, on relève une augmentation de 93.5% et l'irrigation optimale moyenne passe à 282 mm, une valeur très proche de la limite 300 mm[8]. Il est donc vraisemblable que lors de certaines années sèches, l'agriculteur vienne heurter cette contrainte de 300 mm.

[8] Nous rappelons que nous avons limité les tactiques d'irrigation possibles pour le système de culture A à celles dont le cumul annuel est inférieur à 300 mm (valeur déjà largement supérieure à la moyenne régionale).

Cela signifie que la perte de marge brute du système de culture A en cas de sécheresse résulte de 2 effets conjoints : des conditions climatiques vraisemblablement particulières mais aussi une contrainte exprimée en terme de niveau d'irrigation. Pour aller plus loin, il est probable que si l'on supprimait toute contrainte de niveau d'irrigation maximum, l'impact de la sécheresse sur les systèmes de culture A serait bien moindre, et les niveaux optimaux d'irrigation beaucoup plus élevés.

4.2. Sensibilité des résultats à des chocs sur les prix des produits

Dans un premier temps, nous pouvons nous interroger quant à la sensibilité des marges brutes optimisées par rapport à des variations du prix des produits (prix du maïs, du blé dur, du sorgho et du tournesol). La question que l'on se pose est donc de déterminer comment les marges brutes par système de culture évoluent lorsque le prix des produits augmente ou bien baisse[9].

Pour ce faire, le modèle économique a été simulé avec des changements de prix des cultures (de +10% ou –10%). Le tableau 3 présente les résultats obtenus par type de sol et par système de culture.

Tableau 3. Impact du prix des cultures sur la marge brute et sur le niveau optimal d'irrigation

	Systèmes de culture	Variation des prix	Variation de la marge brute moyenne		Variation du niveau d'irrigation moyen	
			1972-2005	Année sèche	1972-2005	Année sèche
Type sol 1	A	+10%	+16.0%	+17.7%	0%	0%
		-10%	-16.2%	-17.8%	-3.4%	-5.7%
	B	+10%	+8.1%	+8.2%	0%	0%
		-10%	-8.3%	-8.2%	-50.5%	0%
	C	+10%	+8.0%	+8.0%	--	--
		-10%	-8.1%	-8.2%	--	--
Type sol 2	A	+10%	+13.8%	+16.5%	+2.7%	0%
		-10%	-13.9%	-16.7%	0%	0%
	B	+10%	+8.1%	+8.2%	0%	0%
		-10%	-8.7%	-8.2%	-50%	0%
	C	+10%	+8.9%	+9.1%	--	--
		-10%	-8.9%	-9.3%	--	--
Type sol 3	A	+10%	+14.0%	+16.4%	+1.2%	0%
		-10%	-14.0%	-16.4%	-0.6%	0%
	B	+10%	+8.4%	+8.4%	+0.0%	+20%
		-10%	-8.3%	-8.4%	-33.4%	+20%
	C	+10%	+9.7%	+10.3%	--	--
		-10%	-9.7%	-10.3%	--	--

Les données de ce tableau s'interprètent de la manière suivante.
Pour le sol de type 1, lorsque les prix des cultures du système de culture A (maïs) augmentent de 10%, la marge brute moyenne calculée sur l'ensemble des années augmente de 16.0% et la marge brute moyenne calculée sur les années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) augmente de 17.7%.
Pour le sol de type 1, lorsque les prix des cultures du système de culture A (maïs) augmentent de 10%, le niveau moyen d'irrigation calculé sur l'ensemble des années augmente de 0% et le niveau moyen d'irrigation calculé sur les années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) augmente de 0%.

Les principaux enseignements que l'on peut tirer de la lecture du tableau 3 sont les suivants :

- *Le système qui apparaît comme le plus sensible à des chocs exogènes sur le prix des cultures est le système de culture A* (les variations de marge brute moyenne sont proportionnellement plus élevées pour le système de culture A que pour les 2 autres systèmes de culture).
- *La variation de marge brute résultant d'un changement du prix des cultures ne dépend que très peu du type de sol.*

[9] On peut par exemple penser qu'une augmentation importante du niveau de production d'une culture peut se traduire par une baisse du prix de cette culture si la fonction de demande est relativement inélastique.

- *La variation du niveau optimal d'irrigation résultant d'un changement du prix des cultures dépend du type de sol.* Par exemple, dans le système de culture B lorsque les prix baissent de 10% on observe une réduction moyenne du niveau d'irrigation de 50% pour les sols de type 1 et 2. Pour le sol de type 3, cette réduction n'est que de 33.4%.

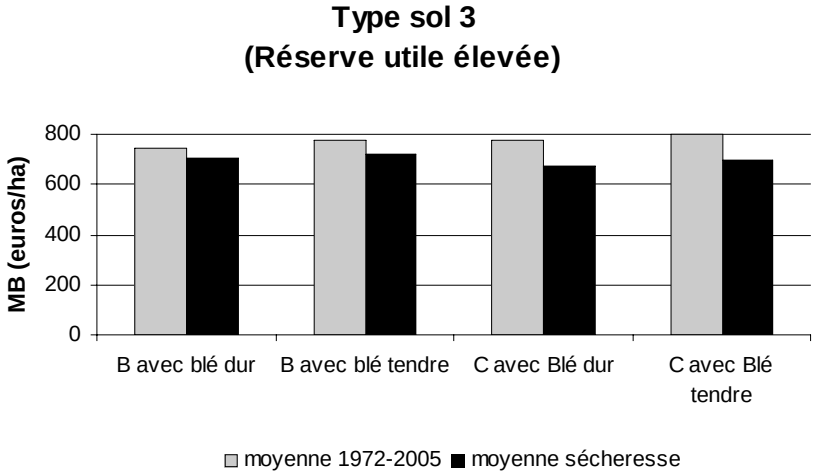
4.3. Sensibilité des résultats à des modifications de cultures

Selon les statistiques Agreste régionales 2005, le blé tendre représente plus du quart de la superficie consacrée aux céréales en Midi-Pyrénées. Il est donc important de tester la robustesse des résultats obtenus pour les 3 systèmes de culture précédents lorsque l'on introduit le blé tendre.

L'approche a consisté à remplacer dans les systèmes de culture B et C, le blé dur par du blé tendre. Ont ainsi été modifiés dans le programme d'optimisation de l'agriculteur le prix de vente du produit, le niveau de la prime compensatoire et le coût unitaire de production. Les données nécessaires à ces modifications proviennent des fiches SICOMORE de la CRA Midi-Pyrénées[10]. On suppose par contre que les rendements du blé dur et du blé tendre sont suffisamment proches pour être considérés comme identiques. Ainsi, pour le rendement obtenu pour du blé tendre, on utilise donc les sorties STICS avec les systèmes de culture initiaux A, B et C (qui incluent le blé dur). Dans ce qui suit, comparons les marges brutes optimisées en remplaçant le blé dur par du blé tendre dans les systèmes de culture B et C. Nous ne donnons que les résultats pour un sol de type 3, ceux obtenus pour les 2 autres sols étant sensiblement similaires.

Figure 2: Comparaison Blé dur / Blé tendre des moyennes des marges brutes optimisées par système de culture sur l'ensemble des années et sur les années de sécheresse.

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



On relève les résultats suivants :

- *Le passage du blé dur au blé tendre semble réduire de manière modérée les marges brutes associées aux systèmes de culture B et C, que ce soit en année moyenne ou en année de sécheresse.*
- *L'impact des années sèches (en terme de variation de la marge brute) est relativement similaire dans des systèmes avec blé dur et blé tendre.*

[10] A titre de comparaison, pour le blé dur en sol profond (type 3), en 2000, le coût unitaire de production (hors dépenses en eau et coûts fixes) était de 585.95 euros par ha avec irrigation de complément et le prix de 0.1188 euros par kg. Pour le blé tendre, ces paramètres sont respectivement égaux à 396.79 euros par ha et 0.1182 euro par kg.

4.4. Assurance du risque de sécheresse et primes de risque

Une question posée par le problème de la sécheresse, à la fois aux pouvoirs publics, aux assurances privées et aux agriculteurs eux-mêmes, est celui de l'assurabilité d'un tel risque, voir par exemple le rapport de synthèse de l'ESCo sécheresse. Dans ce paragraphe, on se propose de quantifier l'équivalent certain et la prime de risque de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées, deux éléments importants pour la mise en place éventuelle d'une assurance sécheresse.

Pour une présentation plus complète des concepts d'*équivalent certain* et de *prime de risque* (ainsi que leur calcul dans le modèle empirique), le lecteur intéressé pourra se reporter à l'annexe 3. On rappelle ici seulement que le profit réalisé par l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées est stochastique du fait de la présence de l'aléa climatique.

L'équivalent certain de cette activité agricole stochastique correspond alors au niveau certain de richesse (en euros) qui procure à l'agriculteur un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa. En d'autres termes, l'agriculteur est indifférent entre recevoir l'équivalent certain de manière sûre et exercer son activité agricole risquée.

La prime de risque est alors définie comme le montant monétaire que l'agriculteur est prêt à sacrifier pour éviter toute forme de risque dans l'exercice de son activité agricole. Autrement dit, la prime de risque est le montant monétaire que l'agriculteur est prêt à payer pour recevoir le niveau de profit espéré tout en conservant un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa.

Tableau 4. Mesure de la prime de risque (euros par ha) en fonction de la nature du sol et des préférences pour le risque de l'agriculteur représentatif

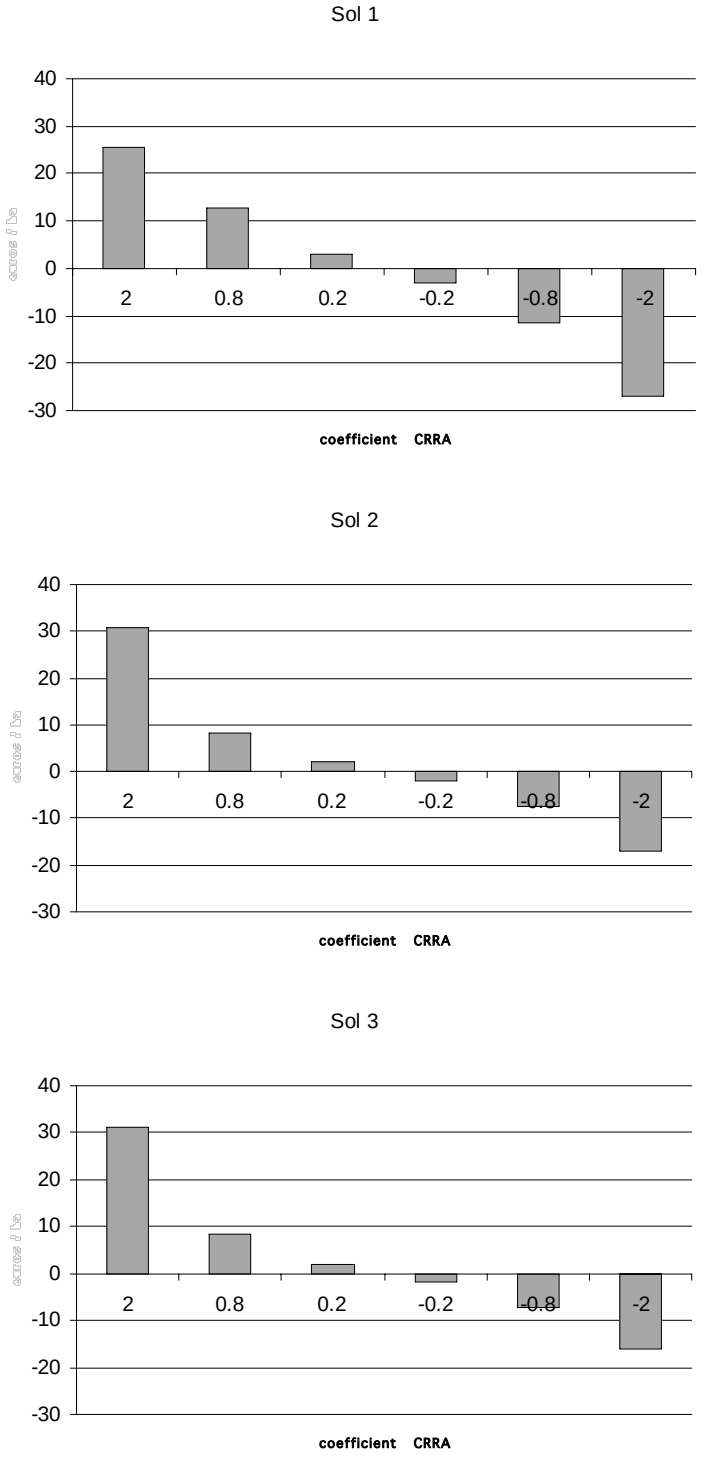
Type de sol	Préférences pour le risque	Coef. CRRA	Equivalent certain[(a)]	Prime de risque[(a)]
			Euros par ha	*Euros par ha*
Sol 1	Fortement averse au risque	2	286.97	24.17
	Modérément averse au risque	0.8	539.57	13.42
	Faiblement averse au risque	0.2	549.81	3.18
	Faiblement riscophile	-0.2	556.08	-3.08
	Modérément riscophile	-0.8	564.83	-11.83
	Fortement riscophile	-2	580.61	-27.62
Sol 2	Fortement averse au risque	2	503.15	30.84
	Modérément averse au risque	0.8	812.23	8.40
	Faiblement averse au risque	0.2	818.63	2.00
	Faiblement riscophile	-0.2	822.56	-1.93
	Modérément riscophile	-0.8	828.01	-7.39
	Fortement riscophile	-2	837.67	-17.05
Sol 3	Fortement averse au risque	2	575.08	31.26
	Modérément averse au risque	0.8	833.35	8.54
	Faiblement averse au risque	0.2	838.57	2.00
	Faiblement riscophile	-0.2	843.81	-1.91
	Modérément riscophile	-0.8	849.09	-7.20
	Fortement riscophile	-2	858.06	-16.17

[(a)] Les concepts d'*équivalent certain* et de *prime de risque* sont définis en annexe 3. On se borne ici à rappeler leur définition. L'équivalent certain du profit est le niveau certain de richesse permettant d'obtenir un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa. La prime de risque est définie comme le montant monétaire que l'agriculteur est prêt à sacrifier pour éviter toute forme de risque.
Les résultats s'interprètent de la manière suivante. Pour un agriculteur fortement averse au risque, c'est-à-dire pour qui le coefficient d'aversion au risque est égal à 2, l'équivalent certain de son activité agricole dans le cas d'un sol de type 1 s'élève à 286.97 euros par ha et sa prime de risque à 24.17 euros par ha.

Dans le Tableau 4 et la Figure 3, on mesure l'équivalent certain (euros par ha) ainsi que la prime de risque (euros par ha) en fonction de la nature du sol et des préférences pour le risque de l'agriculteur représentatif. Notons que, pour permettre une interprétation plus aisée des résultats, l'équivalent certain et la prime de risque sont calculés par unité de surface cultivée (ha).

Figure 3. Prime de risque (euros par ha) en fonction de la nature du sol et des préférences pour le risque de l'agriculteur représentatif

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



Les principaux enseignements que l'on peut tirer du Tableau 4 et de la Figure 3 sont les suivants.

- *La prime de risque décroît avec le niveau d'aversion au risque.*

Il s'agit d'un résultat que l'on attendait, bien entendu. Par exemple dans le cas d'un sol faiblement profond avec faible réserve utile (sol 1), un agriculteur fortement averse au risque est prêt à payer 24.17 euros par ha pour ne plus avoir à supporter de risque. A l'inverse, un agriculteur qui aime fortement le risque ne sera prêt à recevoir de façon certaine l'espérance de son profit que si on le dédommage de 17.62 euros par ha. Mais comme le rappellent Hassine et Thomas (2001) ou Groom et al. (2006), les agriculteurs sont caractérisés par de l'aversion au risque et les primes de risque seront donc positives.

- *La degré d'aversion au risque a un impact très important sur le niveau de la prime de risque d'un agriculteur averse au risque.*

Dans le cas d'un sol très profond avec forte réserve utile (sol 3), un agriculteur fortement averse au risque est prêt à payer 31.26 euros par ha pour ne plus avoir à supporter de risque. Il s'agit d'un montant significatif puisque la prime de risque représente un peu moins de 4% de la marge brute moyenne. Pour le même sol, un agriculteur faiblement averse au risque ne sera prêt à payer que 2.00 euros par ha, soit une somme négligeable.

- *La nature des sols n'a un impact sur la prime de risque que pour des préférences vis-à-vis du risque extrême.*

Pour des préférences de l'agriculteur vis-à-vis du risque allant de modérément averse à modérément riscophile, les niveaux des primes de risque sont assez proches pour les 3 sols considérés. Pour des préférences extrêmes, on constate des différences significatives. Un agriculteur fortement averse au risque sera prêt à payer 31.26 euros par ha dans le cas d'un sol très profond (type 3) et seulement 24.17 euros par ha dans le cas d'un sol moyennement profond (type 2).

Pour conclure, la mise en place de systèmes d'assurances sécheresse ne peut faire l'économie d'une analyse fine des préférences des agriculteurs tant ce paramètre semble avoir un impact important sur le niveau des primes de risque. Une différenciation des primes de risque en fonction de la nature du sol peut être envisagée dans le cas de préférences vis-à-vis du risque très marquées.

5. Les résultats du modèle économique – environnement modifié

Dans cette section, l'environnement dans lequel évolue l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées est modifié et l'on étudie ses réactions à ce changement. Sauf mention contraire, on se place dans le cas d'un sol de type 3 (sol profond avec réserve utile importante). Les résultats des simulations obtenus pour les sols de type 1 et 3 sont relativement proches de ceux obtenus pour le sol 3.

5.1. Impact de l'augmentation de la fréquence des années "sèches"

Dans ce qui précède, la probabilité de réalisation associée à chaque année de l'historique (1972-2005) dans le programme d'optimisation de l'agriculteur $\boldsymbol{P_{2b}}$, présenté en annexe, est la même. Cela correspond à une hypothèse d'équiprobabilité de réalisation de chaque année climatique. On peut cependant penser que le réchauffement climatique va se traduire par une augmentation de la fréquence de réalisation des années "sèches" et l'on peut donc s'interroger sur l'impact de cette augmentation sur les comportements et la fonction objectif de l'agriculteur.

Pour se faire, la méthode consiste à modifier les probabilités associées aux années climatiques en attribuant un poids plus important aux années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) puis à résoudre le programme d'optimisation de l'agriculteur ($\boldsymbol{P_1}$, $\boldsymbol{P_{2b}}$). Dans ce qui suit nous appliquons un

coefficient multiplicateur au risque de sécheresse qui varie de 1 à 2, un coefficient de 2 signifie que la fréquence de réalisation d'une année de sécheresse est 2 fois plus élevée que dans le cas équiprobable.

Comme indiqué précédemment, nous allons distinguer 2 cas de figure qui permettent d'évaluer à court et à long terme l'impact de l'augmentation de la fréquence des sécheresses sur la fonction objectif de l'agriculteur :

- A court terme, l'agriculteur ne peut pas réallouer les parts de surface qui ont été allouées aux 3 systèmes de culture (A,B et C). Son unique moyen pour limiter l'impact de l'augmentation de la fréquence des sécheresses consiste donc à ré-optimiser ses tactiques d'irrigation, c'est-à-dire à modifier les dates et les quantités d'apports d'eau.
- A long terme, au contraire, l'agriculteur est capable de modifier ses choix de tactique d'irrigation mais aussi les parts de surface allouées aux 3 systèmes de culture. Il dispose donc d'une flexibilité plus importante à long terme qu'à court terme. On cherche dont à voir si cette flexibilité accrue se traduit de manière significative par des gains de fonction objectif.

Le tableau 5 et la figure 4 permettent de voir comment l'augmentation de la fréquence des années de sécheresse modifie les décisions de choix d'allocation de surface aux 3 systèmes de culture et de mesurer le coût pour l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées de cette augmentation en terme de perte de fonction objectif (mesurée en espérance d'utilité nette des coûts spécifiques à chaque système de culture).

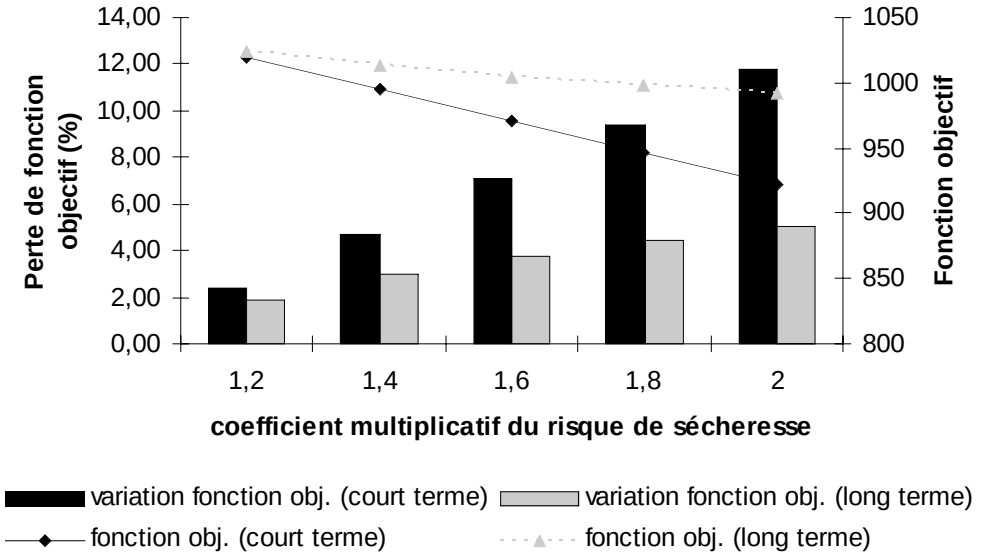
Tableau 5. Impact d'une augmentation de la fréquence des années de sécheresse sur le comportement et la fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées

Coefficient multiplicateur du risque de sécheresse	**Caractéristiques de l'optimum**			
	Court terme		**Long terme**	
	Systèmes de culture	**Fonction objectif**	**Systèmes de culture**	**Fonction objectif**
1	A : 0.459 B : 0.192 C : 0.349	1044.6	A : 0.459 B : 0.192 C : 0.349	1044.6
1.2		1020.0 (-2.36%)	A : 0.176 B : 0.516 C : 0.307	1024.7 (-1.91%)
1.4		995.4 (-4.71%)	A : 0.000 B : 0.780 C : 0.220	1013 (-3.03%)
1.6		970.8 (-7.07%)	A : 0.000 B : 0.980 C : 0.020	1005 (-3.79%)
1.8		946.2 (-9.42%)	A : 0.000 B : 1.000 C : 0.000	998.3 (-4.44%)
2		921.6 (-11.78%)	A : 0.000 B : 1.000 C : 0.000	991.6 (-5.08%)

Note : les valeurs entre parenthèses dans les colonnes *Fonction objectif* donnent le pourcentage de perte de fonction objectif par rapport au cas d'un coefficient de multiplicateur du risque de sécheresse égale à 1. Par exemple, à court terme la perte en terme de fonction objectif lorsque que l'on augmente le risque d'année sèche de 20% (coefficient égal à 1.2) représente 2.36% de la fonction objectif initiale.

Figure 4. Impact d'une augmentation de la fréquence des années de sécheresse sur le comportement et la fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



Les principaux enseignements sont les suivants.

- *A court terme, le choix de tactique d'irrigation permet de limiter l'impact sur la fonction objectif d'une augmentation de la fréquence des années sèches, seulement dans le cas où celle-ci est modérée.*

A court terme, c'est-à-dire lorsque l'agriculteur n'est pas en mesure de modifier ses choix de système de culture et qu'il ne peut donc agir que sur ses décisions de tactique d'irrigation, la perte liée à une augmentation modérée (+20%) de la fréquence des sécheresses reste elle-même modérée (perte de fonction objectif de 2.36%). Les choix de tactique d'irrigation permettent de limiter l'impact d'une augmentation modérée de la fréquence des années sèches. Par contre, lorsque le risque de sécheresse est multiplié par 2, la perte mesurée en terme de fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées devient substantielle puisqu'elle atteint 11.78%. La flexibilité à court terme offerte par les choix de tactique d'irrigation ne permet pas de limiter de manière significative la perte de fonction objectif dans le cas de très forte augmentation de la fréquence des années sèches.

- *A long terme, le choix de tactique d'irrigation combiné à une réallocation des surfaces aux systèmes de culture permet de limiter l'impact sur la fonction objectif d'une augmentation, même forte, de la fréquence des années sèches.*

A long terme, la perte liée à l'augmentation de la fréquence des sécheresse ne dépasse pas 5.08% de la fonction objectif de l'agriculteur représentatif : la réallocation des surfaces entre systèmes de culture A, B et C ainsi que les ajustements intra-annuels de tactiques d'irrigation permettent d'atténuer de manière sensible l'impact de l'augmentation du risque de sécheresse sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif (espérance d'utilité).

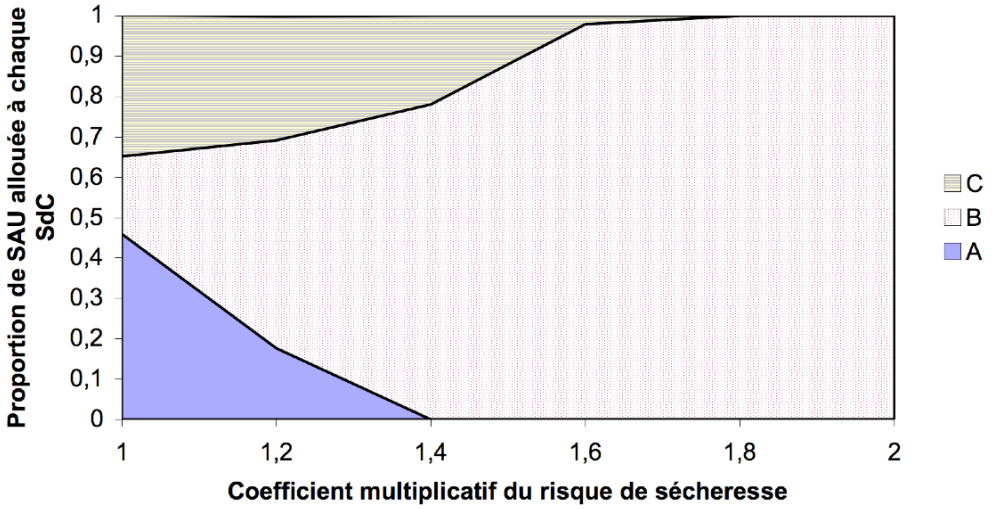
- *A long terme, une augmentation modérée de la fréquence des années sèches se traduit par une baisse de la SAU allouée au système de culture A au profit des systèmes de culture B et C. Lorsque la fréquence des années sèches devient très forte, le système de culture B tend à dominer les deux autres.*

On a vu dans le tableau 5 et sur la figure 4 que les décisions de long terme de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées lui permettent de limiter l'impact de l'augmentation du risque de sécheresse sur sa fonction objectif. On peut alors se demander comment la réallocation des surfaces

entre systèmes de culture permet d'atténuer de manière très sensible l'impact de l'augmentation de la fréquence des sécheresses sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif. La réponse est donnée par la figure 5. Lorsqu'on augmente modérément le risque de sécheresse (de 1 à 1.2), l'agriculteur augmente la proportion de surface allouée au système de culture B (qui résiste a priori mieux que les systèmes de culture A ou C au risque de sécheresse, voir les discussions dans la section 2 concernant les marges brutes par système de culture en cas d'année sèche). Au-delà d'un certain niveau de risque de sécheresse, la diminution de la proportion de surface allouée au système de culture C (cultures en sec) s'accélère pour atteindre 0% avec un coefficient multiplicateur proche de 1.8 (le risque de sécheresse est trop important pour continuer à faire des cultures en sec). Il est optimal dans ce cas pour l'agriculteur de consacrer toute sa surface agricole utile au système de culture B.

Figure 5. Impact d'une augmentation de la fréquence des années de sécheresse sur l'allocation optimale de la SAU aux systèmes de culture (choix de long terme)

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



5.2. Impact de la limitation du niveau d'irrigation en cas d'année de "sécheresse"

Une des caractéristiques des années récentes de sécheresse a été la mise en place de limitation quantitative des prélèvements en eau à usage agricole. On peut donc anticiper que les phénomènes de sécheresse soient de plus en plus accompagnés par des mesures, souvent administratives, de restriction des prélèvement agricoles en eau. Il est donc important pour la puissance publique d'évaluer les pertes (en terme de fonction objectif de l'agriculteur) induites par ce type de restrictions quantitatives.

Pour se faire, on introduit maintenant dans le programme d'optimisation $\boldsymbol{P_1}$ des contraintes de limitation du niveau d'irrigation en cas de sécheresse. Typiquement, le type de contrainte que l'on impose s'écrit :

$$\delta_s^K(t) > 0 \quad \text{si et seulement si } WAT_s^K \leq \overline{WAT}^K \quad \text{si } t \in \{sécheresse\}$$

ce qui signifie que la part de surface sur laquelle l'agriculteur utilise la tactique *s* dans le système de culture *K* au cours de l'année *t* de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) est strictement positive si et seulement si cette tactique correspond à un apport total en eau lors de la campagne d'irrigation inférieur à $\overline{WAT}^K$ mm par ha. Autrement dit, les tactiques d'irrigation qui dépassent ce seuil maximum ne peuvent pas être utilisées en cas d'année de sécheresse.

Le principe de l'exercice consiste alors à étudier comment l'introduction de ce type de contrainte modifie le comportement de l'agriculteur et impacte sur sa fonction objectif. Comme précédemment,

on distingue l'approche de court terme et de long terme selon que l'agriculteur est capable ou non de réallouer ses parts de surface aux 3 systèmes de culture (A,B et C). Les résultats de ces simulations sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6. Impact de la limitation du niveau d'irrigation en cas d'année "sèche" sur l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées

Niveau maximum d'irrigation (mm)			Caractéristiques de l'optimum					
			Court terme		Long terme			
			Systèmes de culture	Fonction objectif	Systèmes de culture			Fonction objectif
A	B	C			A	B	C	
300	120	0	A : 0.459 B : 0.192 C : 0.349	1044.65	0.459	0.192	0.349	1044.65
270	90	0		1026.79 (-1.71%)	0.484	0.516	0.000	1037.96 (-0.64%)
240	60	0		997.42 (-4.52%)	0.350	0.650	0.000	1032.15 (-1.20%)
210	30	0		983.65 (-5.84%)	0.126	0.874	0.000	1023.40 (-2.03%)

Note : les valeurs entre parenthèses dans les colonnes *Fonction objectif* donnent le pourcentage de perte de fonction objectif par rapport au cas initial (300 mm pour A, 120 mm pour B). Par exemple, la perte en terme de fonction objectif lorsque que l'on diminue de 30 mm les apports maximaux en eau les années sèches représente –1.71% de la fonction objectif initiale, à court terme.

- *A court terme, le changement de tactiques d'irrigation permet à l'agriculteur de limiter l'impact sur la fonction objectif des limitation du niveau maximal d'irrigation.*

Par exemple, lorsque le niveau maximal d'irrigation en cas de sécheresse passe de 300 mm à 240 mm pour le système de culture A et de 120 mm à 60 mm pour le système de culture B, la perte de fonction objectif représente –4.52%.

- *A long terme, la réallocation des surfaces entre systèmes de culture permet de limiter de manière très substantielle l'impact des restrictions d'irrigation.*

Passer à des irrigations maximales en cas de sécheresse égales à 210 mm/ha pour le système de culture A et à 30 mm pour le système de culture B se traduit à long terme par une perte de -2.03% de la fonction objectif de l'agriculteur (contre –5.84% à court terme). Il convient de noter que cette perte est une perte mesurée en terme d'espérance d'utilité nette des coûts spécifiques à chaque système de culture.

- *A long terme, à mesure que les contraintes d'apport maximum en eau (mm) sont de plus en plus fortes, augmenter les surfaces à allouer au système de culture B semble émerger comme une stratégie dominante.*

5.2. Impact des interdictions d'irriguer en période d'étiage lors des années de "sécheresse" avec ou sans anticipation des agriculteurs

Les sécheresses récentes les plus sévères ont souvent été accompagnées par les autorités publiques par la mise en place d'interdictions d'irrigation lors des périodes les plus critiques. On peut alors légitimement s'interroger sur le coût pour l'agriculteur induit par ces restrictions, ainsi que sur les moyens dont il dispose, à court et à long terme, pour limiter ce coût.

On introduit maintenant dans le programme d'optimisation $\boldsymbol{P_1}$ des contraintes d'interdiction d'irriguer à certaines périodes en cas de sécheresse. Typiquement, le type de contrainte que l'on impose s'écrit :

$$\delta_s^K(t) > 0 \quad \text{si et seulement si } WAT_s^K(p) = 0 \text{ pour } p \in \{T-h,...,T\} \text{ et } t \in \{sécheresse\}$$

ce qui signifie que la part de surface sur laquelle l'agriculteur utilise la tactique *s* dans le système de culture *K* au cours de l'année *t* est strictement positive si et seulement si cette tactique ne nécessite aucune irrigation pendant les *h* dernières périodes de la campagne d'irrigation et si l'année est une année de sécheresse. Le principe de l'exercice consiste alors à étudier comment l'introduction de ce type de contrainte modifie le comportement de l'agriculteur et sa fonction objectif. Plus concrètement, on rappelle qu'une tactique d'irrigation est ici un vecteur de 12 apports en eau, les dates d'apport étant réparties uniformément le long de la campagne d'irrigation. Dans le cas d'années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005), on va imposer une contrainte d'interdiction d'irriguer lors des périodes d'étiage, c'est-à-dire lors des période 9 à 12. Pour les autres périodes (1 à 8), l'agriculteur ne fait face à aucune contrainte de limitation en eau.

L'impact d'une contrainte d'interdiction d'irriguer à certaines périodes en cas de sécheresse va dépendre de manière substantielle des possibilités d'adaptation de l'agriculteur. Ici encore, on va distinguer les solutions de court terme de l'agriculteur (changement de ses tactiques d'irrigation) de ses décisions de long terme pour lesquelles l'agriculteur est en plus capable de réallouer ses surfaces entre systèmes de culture (choix inter-annuel de long terme).

a) Les résultats à court terme

A court terme, l'agriculteur ne peut modifier que ses tactiques d'irrigation. L'impact des interdictions d'irrigation va alors dépendre de la faculté qu'il a d'anticiper ou non ces interdictions. Dans le tableau 5 et la figure 5, on distingue trois cas de figure :

- Le cas de référence "pas d'interdiction d'irriguer" correspond à une situation où l'agriculteur ne fait face à aucune interdiction d'irriguer en cas de sécheresse. La fonction objectif est égale à 1044.65.
- Les cas "interdictions *anticipées*" correspondent à des situations où l'agriculteur, à différentes périodes de l'année (1 à 8), sait qu'il va faire face à une interdiction d'irriguer aux cours des périodes 9 à 12. Il peut alors ré-optimiser ses tactiques d'irrigation de manière à maximiser sa fonction objectif sous la contrainte des interdictions d'irriguer à venir. Bien entendu, plus l'agriculteur est capable d'anticiper tôt les interdictions d'irriguer à venir (autrement dit plus la puissance publique est en mesure d'annoncer tôt des interdictions d'irriguer), plus les possibilités de ré-optimisation des tactiques d'irrigation sont importantes et plus la perte de fonction objectif sera faible.
- Le cas "interdictions *non anticipées*" correspond à une situation extrême où l'agriculteur apprend en début de période 9 qu'il lui est interdit d'irriguer pour les 4 dernière périodes. Il n'a donc aucune possibilité de ré-optimisation de ses tactiques d'irrigation. La perte en terme de fonction objectif est donc maximale.

Les résultats des simulations sont présentés dans le tableau 7 et la figure 6. Les principaux enseignements que l'on peut tirer sont les suivants.

- *Une information sur le risque d'interdiction d'irriguer en période d'étiage transmise de manière précoce aux agriculteurs permet de limiter de manière significative la perte de fonction objectif.*

On constate en effet que lorsque l'agriculteur est capable d'anticiper dès la première période les interdictions à venir de manière à ré-optimiser ses tactiques d'irrigation sous la contrainte de non-irrigation en période d'étiage, la perte en terme de fonction objectif de l'agriculteur est modérée puisqu'elle représente –9.94%. Dans le cas où l'agriculteur doit attendre la deuxième période pour

savoir s'il y aura une interdiction d'irriguer, la perte de fonction objectif demeure relativement faible, –11.56%.

- *La perte de fonction objectif est d'autant plus grande que la période à laquelle l'agriculteur apprend qu'il y aura une interdiction est tardive.*

C'est un résultat attendu et intuitif. La perte varie de –9.94% en première période à –53.82% en période 8. Par contre il est intéressant de remarquer que le fait pour l'agriculteur d'apprendre même tardivement qu'il va y avoir une interdiction d'irriguer lui permet de limiter sa perte (-15.59% en période 6 et –17.67% en période 7). Il est donc important pour la puissance publique d'annoncer les interdictions d'irrigation, même tardivement. On peut alors s'attendre à des pics de consommation en eau puisque les agriculteurs auront recours à l'irrigation lors des périodes 6 et 7.

- *Lorsque l'agriculteur ne peut pas anticiper les interdictions d'irrigation en période d'étiage lors des années sèches, sa perte de fonction objectif est très importante puisqu'elle atteint –58.60% de sa fonction objectif.*

A court terme c'est-à-dire lorsque l'agriculteur ne peut pas réallouer librement ses surfaces entre les trois systèmes de culture dans le cas où il ne peut ni réallouer librement ses surfaces entre les trois système de culture et anticiper les contraintes de non-irrigation en période d'étiage, la perte de fonction objectif est très importante (-53.82%). Ce résultats suggère qu'une information disponible en début de campagne pour l'agriculteur sur le risque de sécheresse et la possibilité d'interdiction d'irrigation en période d'étiage permet de réduire de manière considérable le coût de l'interdiction d'irrigation pour l'agriculteur.

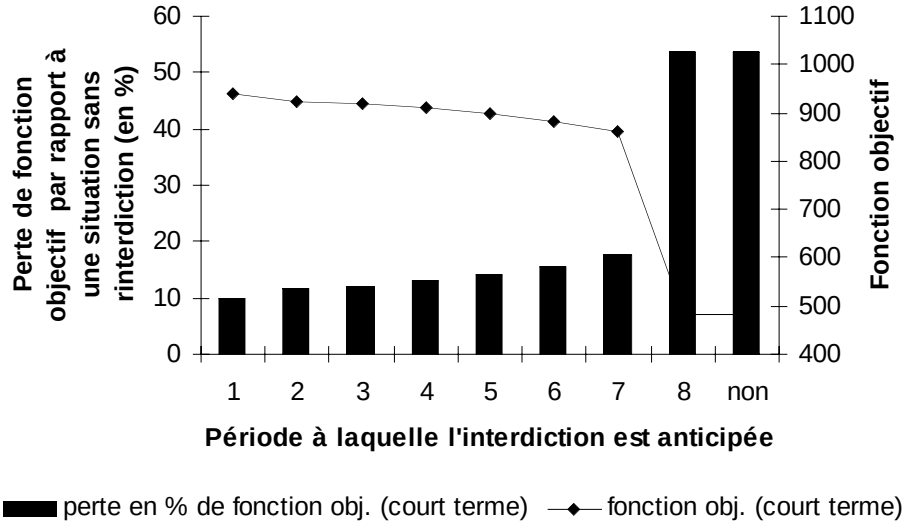
Tableau 7. Impact des interdictions d'irriguer sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées (choix de court terme)

			Fonction objectif
Pas d'interdiction d'irriguer			1044.65
Interdictions *anticipées*	Date à laquelle l'interdiction est anticipée	1	940.76 (-9.94%)
		2	923.50 (-11.60%)
		3	919.86 (-11.95%)
		4	909.89 (-12.90%)
		5	898.19 (-14.02%)
		6	881.80 (-15.59%)
		7	860.05 (-17.67%)
		8	482.43 (-53.82%)
Interdiction *non-anticipées*			482.43 (-53.82%)

Note : les valeurs entre parenthèses dans la colonne Fonction objectif donnent le pourcentage de perte de fonction objectif par rapport au cas sans restrictions d'irrigation.

Figure 6. Impact des interdictions d'irriguer sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées (choix de court terme)

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



b) Les résultats à long terme

A long terme, l'agriculteur peut modifier les parts de SAU qu'il alloue à chaque système de culture. Cela lui permet de disposer de plus de flexibilité de manière à essayer d'atténuer l'impact des épisodes de sécheresse. Il peut bien entendu toujours modifier ses tactiques d'irrigation, lorsqu'il anticipe l'interdiction à venir.

Dans un premier temps, il est utile de rappeler les caractéristiques de l'optimum en l'absence de toute contrainte d'interdiction d'irriguer. A l'optimum, la fonction objectif est égal à 1044.65 (pas d'unité car espérance d'utilité) et les parts de surface allouées aux systèmes de culture A, B et C sont respectivement égales à 0.459, 0.192 et 0.349. On va alors comparer ce cas de référence à la situation où la puissance publique instaure des interdictions d'irriguer lors des périodes d'étiage (périodes 9-12) dans le cas d'années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005).

Il est possible que, même à long terme, les possibilités de ré-allocation des surfaces entre systèmes de culture soient limitées du fait par exemple de contraintes techniques non modélisées ici. On peut penser que des surfaces sur lesquelles ont été réalisés des investissements lourds en matériel d'irrigation ne seront pas aisément converties en culture en sec. Pour capturer ce type de phénomène, on va imposer dans le programme de l'agriculteur une contrainte supplémentaire de restriction des possibilités de réallocation des surfaces aux systèmes de culture par rapport à l'optimum sans interdiction d'irriguer. De façon plus précise, on va dans certains cas supposer que lorsque l'agriculteur fait face à une contrainte d'interdiction d'irriguer en période d'étiage, il ne peut augmenter ou réduire les parts de SAU qu'il alloue à chaque système de culture que de + ou – 20% par rapport à son optimum sans interdiction d'irriguer. Cela correspond à une situation où l'agriculteur est contraint dans ces choix de réallocations de surfaces entre systèmes de culture. On s'attend à une perte de fonction objectif plus importante dans ce cas.

Les résultats des simulations sont présentés dans le tableau 8 et la figure 7. Les principaux enseignements que l'on peut tirer sont les suivants.

- *La perte de fonction objectif est d'autant plus grande que la période à laquelle l'agriculteur apprend qu'il y aura une interdiction est tardive.* C'est un résultat ici encore attendu et intuitif.
- A long terme (l'agriculteur est capable de réallouer ses surfaces entre les trois systèmes de culture) et sans contrainte sur les possibilités de réallocation des surfaces aux systèmes de culture, la perte

résultant des interdictions d'irriguer lors des périodes d'étiage, perte mesurée en terme de fonction objectif de l'agriculteur, est modérée (-1.87%) que l'agriculteur anticipe ces interdictions dès la première période ou non.

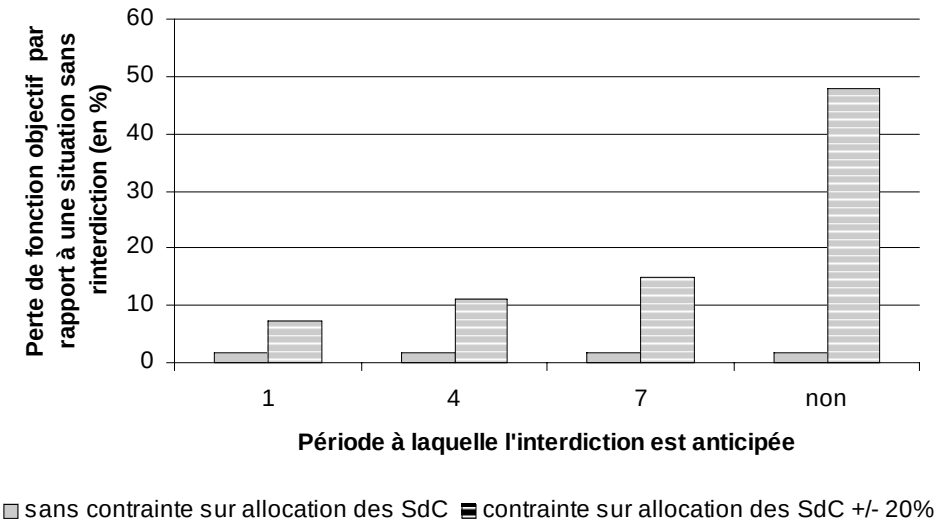
Tableau 8. Impact des interdictions d'irriguer sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées (choix de long terme)

			Restriction sur les possibilités de réallocation des surfaces[a]	Part de surface allouée au système de culture			Fonction obj. [b]
				A	B	C	
Pas d'interdiction d'irriguer	--		non	0.459	0.192	0.349	1044.65
Interdictions *anticipées*	Date à laquelle l'interdiction est anticipée	1	non	0.000	0.991	0.009	1025.10 (-1.87%)
		1	oui	0.368	0.230	0.402	968.88 (-7.25%)
		4	non	0.000	0.991	0.009	1025.10 (-1.87%)
		4	oui	0.368	0.230	0.402	928.59 (-11.11%)
		7	non	0.000	0.991	0.009	1025.10 (-1.87%)
		7	oui	0.368	0.230	0.402	889.05 (-14.89%)
Interdiction *non-anticipées*			non	0.000	0.991	0.009	1025.10 (-1.87%)
			oui	0.368	0.230	0.402	495.94 (-52.52%)

Notes :
[a] "non" correspond à la situation où aucune contrainte sur la ré-allocation des parts de surface n'est imposée a priori à l'agriculteur ; "oui" correspond à une situation où l'agriculteur peut augmenter ou réduire ses parts de surface au maximum de + ou – 20% par rapport à son optimum sans interdiction d'irriguer.
[b] Les valeurs entre parenthèses dans la colonne Fonction obj. donnent le pourcentage de perte de fonction objectif par rapport au cas sans restrictions d'irrigation.

Figure 7. Impact des interdictions d'irriguer sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées (choix de long terme)

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



- *A long terme, le fait de ne pas pouvoir réallouer librement les surfaces entre systèmes de culture a un impact sur la fonction objectif, modéré dans le cas où les restrictions sont anticipées (de –7.25% à –14.89%) et très négatif dans le cas où les restrictions ne sont pas anticipées (-52.82%).*

- *Les décisions de long terme de l'agriculteur permettent d'atténuer de manière très importante le coût des restrictions d'irrigation en période d'étiage.*
  Par exemple, à court terme la perte de fonction objectif induite par une interdiction anticipée dès la première période représente –7.25%. Dans les mêmes conditions mais à long terme, la perte représente seulement –1.87%. Lorsque l'interdiction d'irriguer ne peut pas être anticipée, la perte de fonction objectif représente respectivement à court et à long terme –53.82% et –1.84%

6. Remarques conclusives et discussion

Dans les paragraphes précédents, nous avons essayé d'appréhender l'impact de la sécheresse sur les décisions optimales de court terme (choix des tactiques d'irrigation) et de long terme (choix des systèmes de culture) de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées. Nous nous sommes également attachés à quantifier l'impact de la sécheresse sur la fonction objectif de cet l'agriculteur.

La méthode développée a consisté à utiliser des sorties de simulations d'un modèle agronomique (STICS) dans un modèle d'optimisation économique du comportement de l'agriculteur.

6.1. Limites et hypothèses de modélisation

Avant de résumer les principaux résultats que nous avons obtenus, il convient de souligner un certain nombre d'hypothèses que nous avons été amenés à faire, ainsi que certaines limites de l'approche de couplage modèle biophysique / modèle économique développée ici.

Tout d'abord, les variables de décision de l'agriculteur se limitent ici aux tactiques d'irrigation et aux systèmes de culture. Dans la pratique, l'agriculteur dispose d'un panel de choix possibles beaucoup plus important. Ces choix non modélisés peuvent correspondre à des itinéraires techniques particuliers (choix de variétés précoces, changement de la date des semis, substitutions entre les différents facteurs de production, etc.), à des décisions d'investissement à long terme (développement de nouvelles capacités de stockage d'eau par exemple) ou bien à des tactiques de couverture contre le risque de sécheresse (recours à des formes d'assurance par exemple). Il est vraisemblable que dans un modèle qui intégrerait ces différents choix possibles, le coût pour l'agriculteur des sécheresses serait moindre.

Nous avons d'autre part supposé que l'agriculteur est capable de calculer, pour chaque année et chaque tactique d'irrigation possible, le rendement associé à chacune des cultures (à l'exception du paragraphe traitant des interdictions d'irriguer anticipées ou non par l'agriculteur). Cela signifie qu'au moment de choisir la tactique optimale d'irrigation pour une année donnée, l'agriculteur connaît l'ensemble des éléments qui vont affecter le rendement. Cela revient à faire une hypothèse forte d'anticipations rationnelles du climat. On sait que relâcher cette hypothèse se traduirait par une augmentation du coût pour l'agriculteur des sécheresses, toutes choses étant égales par ailleurs.

En terme de spécification de la fonction d'utilité de l'agriculteur, nous avons retenu une spécification de type CRRA en arguant du fait que c'est une forme fonctionnelle très couramment utilisée en économie de l'incertain dont les paramètres s'interprètent très aisément. Il est clair que des tests de spécification devraient être conduits. Des exercices de statique comparative sur le niveau du coefficient d'aversion au risque devraient être également réalisés.

D'un point de vue empirique, pour des raisons de temps et de contraintes matérielles nous avons limiter l'analyse au cas de la région Midi-Pyrénées. Il est clair que l'étude des autres régions pilotes de l'étude de Brisson et al. permettrait d'apporter un éclairage intéressant sur l'impact de la sécheresse sur l'agriculture en France.

6.2. Quelques enseignements des simulations économiques

Sensibilité "économique" des systèmes de culture aux années sèches

Lorsqu'on s'intéresse uniquement à l'impact des années sèches sur la marge brute et sur les décisions d'irrigation de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées, on constate *des niveaux de pertes importants dans le cas d'un système de culture A (monoculture de maïs), très modérés dans le cas d'un système de culture B (Blé dur – Blé dur – Sorgho) et relativement importants dans le cas d'un système de culture C (Blé dur – Tournesol).* Une partie de la sensibilité économique du système de culture A s'explique par le fait qu'en année de sécheresse il nécessite des niveaux d'irrigation très élevés, souvent incompatibles avec la limitation du niveau d'irrigation à 300 mm que nous avons imposée a priori. Cette contrainte s'explique par le fait que l'on peut s'attendre à ce que, lors d'épisodes de sécheresse, les agriculteurs soient de plus en plus confrontés à des restrictions quantitatives d'irrigation. Il est important de l'intégrer dans une modélisation du comportement de l'agriculteur.

Assurance sécheresse et prime de risque

La mise en place de systèmes d'assurance sécheresse ne peut faire l'économie d'une analyse fine des préférences des agriculteurs tant ce paramètre semble avoir un impact important sur le niveau des primes de risque. Les primes de risque pour l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées sont estimées de quelques euros par hectare dans le cas d'une aversion au risque faible à plus de 30 euros par hectare pour un agriculteur fortement averse au risque. On a également montré qu'une différenciation des primes de risque en fonction de la nature du sol pourra être envisagée dans le cas de préférences vis-à-vis du risque très marquées.

Capacités d'adaptation de l'agriculteur face au risque de sécheresse, à court et à long terme

A court terme, c'est-à-dire à système de culture donné, il apparaît que les capacités d'adaptation des agriculteurs (via le choix des tactiques d'irrigation) semblent assez limitées et donc que le coût économique induit par les épisodes de sécheresse peut être élevé pour l'agriculteur. Par exemple, multiplier par 2 le risque de réalisation d'une année sèche se traduit par une perte de 11.78% de la fonction objectif de l'agriculteur (voir tableau 5). Imposer des interdictions d'irrigation en période d'étiage lors d'une année de sécheresse et lorsque l'agriculteur n'est pas à même de les anticiper se traduit par une perte de sa fonction objectif supérieure à 50%.

Il convient de relever, que *même à court terme et dans le système de culture A (monoculture maïs irrigué), l'agriculteur apparaît comme sensible à l'outil tarifaire.* Un doublement du prix unitaire de l'eau se traduirait par une baisse de l'irrigation de 25.5% en cas de sécheresse (voir les résultats du modèle économique – cadre standard).

A *long terme, c'est-à-dire lorsque l'agriculteur peut modifier ses systèmes de culture, les résultats des simulations économiques suggèrent une situation assez différente. Il apparaît en effet que l'adaptation des systèmes de culture permet de limiter de manière très sensible le coût privé pour l'agriculteur d'épisodes de sécheresse*. Par exemple, la perte résultant du doublement de la fréquence des sécheresses est divisée par deux dans le cas où des réallocations des surfaces entre systèmes de culture sont possibles (5.08% contre 11.78%, voir tableau 5). La réallocation des surfaces entre systèmes de culture combinée aux ajustements intra-annuels de tactiques d'irrigation permettent d'atténuer de manière sensible l'impact de l'augmentation du risque de sécheresse sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif (critère d'espérance d'utilité).

De l'importance pour l'agriculteur d'anticiper le risque de sécheresse et les interdictions d'irriguer à venir

On sait que l'impact du risque de sécheresse sur la fonction objectif de l'agriculteur dépend de manière cruciale des possibilités qu'il a d'anticiper, ou non, les éventuelles limitations ou interdictions d'irriguer dans le cas d'un épisode de sécheresse avéré. Le modèle économique que nous avons développé permet de déterminer le coût des sécheresses pour l'agriculteur en fonction de la date à

partir de laquelle il sait que l'irrigation en période d'étiage sera rationnée ou interdite. Cela permet à la puissance publique de mesurer les gains privés qui peuvent être associés à la mise en place de systèmes d'alerte précoce des sécheresses.

A court terme, une information sur le risque d'interdiction d'irriguer en période d'étiage transmise de manière précoce aux agriculteurs permet de limiter de manière significative la perte de fonction objectif (voir tableau 7). De plus, la perte de fonction objectif est d'autant plus grande que la période à laquelle l'agriculteur apprend qu'il y aura une interdiction est tardive (voir tableau 7). Par contre, toujours à court terme, *lorsque l'agriculteur ne peut pas anticiper les interdictions d'irrigation en période d'étiage lors des années sèches, sa perte de fonction objectif est très importante (*elle atteint –53.82% de sa fonction objectif).

A long terme (l'agriculteur est capable de réallouer librement ses surfaces entre les trois systèmes de culture), la perte résultant des interdictions d'irriguer lors des périodes d'étiage, est modérée, que l'agriculteur anticipe ces interdictions dès la première période ou non (perte de –1.80%). Les décisions de long terme de l'agriculteur permettent d'atténuer de manière très importante le coût des restrictions d'irrigation en période d'étiage. Par exemple, à court terme la perte de fonction objectif induite par une interdiction anticipée dès la première période représente –9.94%. Dans les mêmes conditions mais à long terme, la perte représente seulement –1.87%. Il semble également qu'*une information disponible en début de campagne pour l'agriculteur sur le risque de sécheresse et la possibilité d'interdiction d'irrigation en période d'étiage permette de réduire de manière considérable le coût privé de l'interdiction d'irrigation pour l'agriculteur en cas de sécheresse.* Lorsque cette information est disponible, la perte pour l'agriculteur mesurée en terme de fonction objectif représente 9.94% à court terme contre plus de 50% sans information (voir tableau 7). Ce résultat nécessite toutefois des travaux supplémentaires de validation.

En terme de recommandation de politique économique, ces résultats suggèrent qu'il est important pour le décideur public de faciliter les changements de système de culture, via la mise en place de mécanismes incitatifs, d'aide technique, de transmission d'information, par exemple. Ces résultats suggèrent également que des mécanismes d'alerte précoce des sécheresses peuvent générer des gains substantiels pour l'agriculture (on ne tient cependant pas compte ici que la puissance publique peut se tromper en annonçant une sécheresse et que cette erreur d'annonce peut se traduire par un coût pour l'agriculture). De multiples pistes d'extensions du modèle présenté permettait d'améliorer le modèle présenté dans cette étude.

6.3. Conclusion

Le modèle d'optimisation du comportement de l'agriculteur que nous avons développé permet de répondre à un certain nombre de questions qui apparaissent, pour l'économiste, fondamentales pour appréhender de manière pertinente l'impact de la sécheresse sur l'agriculteur en France. Le modèle nous a en particulier permis de mesurer les marges de manœuvre dont dispose l'agriculteur à court et à long terme et de voir comment les anticipations des épisodes de sécheresse permettaient d'atténuer le coût de celles-ci pour l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées.

Ce travail ouvre la porte à de multiples extensions qui nécessiteraient de plus amples travaux de recherche en économie agricole.

1. On pourrait tout d'abord s'intéresser aux systèmes de culture représentatifs des 9 autres régions pilotes de l'étude de Brisson et al. (2006). Cela permettrait d'avoir une vision plus complète de l'impact de la sécheresse au niveau français.
2. On pourrait ensuite travailler de manière beaucoup plus précise sur l'impact de l'aversion au risque de l'agriculteur sur ces décisions optimales, de court et de long terme.
3. On pourrait élargir dans le modèle d'optimisation les décisions que peut prendre l'agriculteur (tactiques d'irrigation et surfaces allouées aux systèmes de culture) à d'autres choix jugés

pertinents : modifications des dates de semis, décision d'investissement dans des ouvrages hydrauliques de type retenue collinaire, etc.

4. On pourrait s'intéresser de manière plus précise à la mise en place de mécanismes d'annonce précoce des sécheresses par la puissance publique et de définition de la date optimale d'annonce. Par exemple, on pourrait construire un modèle dans lequel la puissance publique annonce de manière précoce les sécheresses à venir, mais avec une certaine probabilité d'erreur. La date optimale d'annonce de la sécheresse par la puissance publique mettrait alors en balance le gain pour l'agriculteur résultant des adaptations en terme de stratégies d'irrigation rendues possibles par une annonce précoce de la sécheresse à venir avec la perte résultant d'un comportement trop précautionneux dans le cas où la sécheresse annoncée ne se produit pas.
5. On pourrait enfin étendre la mesure des primes de risque à des probabilités d'occurrence des sécheresses plus élevées de manière à évaluer la viabilité d'un système d'assurance dans un cadre de risque de sécheresse accru. D'une manière plus générale, la problématique de la mise en place d'assurances sécheresse nécessiterait d'approfondir certaines pistes de recherche qui n'ont pu être qu'effleurées dans le cadre de l'expertise scientifique collective "Sécheresse et agriculture" (préférences pour le risque, comportement d'auto-protection ou d'auto-assurance, etc.).

Références

Antle J.M., 1987. "Econometric Estimation of Producers' Risk Attitudes", *American Journal of Agricultural Economics* 69, 509-522.

Belhaj Hassine N., Thomas A., 2001. "Aversion au risque des agriculteurs et décisions de production : le cas de l'agriculture irriguée en Tunisie". *Economie Rurale*, 266, 91-108, 2001.

Bouzaher A., Cae R., Johnson S., Manale A., Shogren F.J., 1995. CEEPES: An evolving system for agroenvironmental policy. Dans : *Integrating Economic and Ecological indicators. Practical Methods for Environmental Policy Analysis.* Chapter 5, Prager, 67-89.

Brisson N., Huard F., Graux A.I., Lebas C. et P. Debaeke. 2006. Impacts de la variabilité des facteurs responsables de la sécheresse agricole à l'échelle du territoire par une approche de modélisation biophysique. Miméo INRA Avignon.

Couture S., 2000. "Aspects dynamiques et aléatoires de la demande en eau d'irrigation". Thèse de l'Université des Sciences Sociales de Toulouse. 386 p.

Dudley N.J, Howell D.T., Musgrave W.F., 1971. "Optimal intraseasonal irrigation water allocation", *Water Resources Research*, 7(4), 770-788.

Flichman G., Jacquet F., 2003. "Le couplage des modèles agronomiques et économiques : intérêt pour l'analyse des politiques", *Cahiers d'Economie et de Sociologie Rurales*, 67, 51-69.

Groom B., Koundouri P., Nauges C., Thomas A., 2006. "The story of the moment: risk averse Cypriot farmers respond to drought management". *Applied Economics*, A paraître.

Howitt R.E., 1995-a. Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics* 77(2): 329-342.

Howitt R.E., 1995-b. "Calibration methods for Agricultural Economic Production Models". *Journal of Agricultural Economics* 46(2): 147-159.

Howitt R.E., Reynaud A., 2003. "Spatial Disaggregation of Agricultural Production Data Using Maximum Entropy", *European Review of Agricultural Economics*, 30(3), 1-29.

Mapp H.P., Bernardo D. J., Sabbagh G.J., Geleta S., Watkins K. B., 1994. Economic and Environmental Impacts of Limiting Nitrogen Use to Protect Water Quality: A Stochastic Regional Analysis. *American Journal of Agricultural Economics* 76(4): 889-903.

Plantinga A., 1996. The Effect of Agricultural Policies on Land Use and Environmental Quality. *American Journal of Agricultural Economics* 78(November): 1033-1047.

Poupa J.C., 2006. "Rétro-ingéniérie de programmes Fortran . Application au modèle de simulation STICS", miméo INRA Rennes.

Prato T., Fulcher C., Wu S., Ma J., 1996. Multiple-Objective Decision Making for Agro-ecosystem Management. *Agricultural and Resource Economics Review* 25(October): 200-212.

Rao N.H., Sarma P.B.S., Chander S., 1990. "Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal water", *Water Resources Research*, 26(4), 551-559.

Von Neuman J., Morgenstern O., 1944. Theory of Games and Economic Behavior, Princeton, University Press.

Wu J., Segerson K., 1995. The Impact of policies and land CharacteriSTICS on Potential Groundwater Pollution in Wisconsin. *American Journal of Agricultural Economics*, 77(November): 1033-1047.

Yaron D., Dinar A., 1982. "Optimal allocation of farm irrigation water during peak seasons", *American Journal of Agricultural Economics*, 64: 681-689.

Annexe 1. Ecriture formalisée du modèle d'optimisation économique du comportement de l'agriculteur

Le problème de l'agriculteur consiste à allouer sa SAU aux 3 systèmes de culture possibles, tout en optimisant le choix des tactiques d'irrigation.

On fait l'hypothèse que le choix de systèmes de culture (c'est-à-dire de part de SAU à allouer à chaque culture) est un choix de long terme qui ne peut pas être modifié chaque année. Cela paraît raisonnable pour le maïs irrigué qui peut nécessiter des équipements en irrigation lourds. Au contraire, le choix de la tactique d'irrigation est un choix de court terme qui dépend des conditions climatiques au cours de chaque année.
Autrement dit, le choix d'allocation de la SAU entre les 3 systèmes de culture possibles est un choix *inter-annuel* (on recherche une allocation stationnaire qui ne varie pas avec l'année) alors que le choix de tactiques d'irrigation est une décision *intra-annuelle* qui varie d'année en année en fonction de la réalisation du climat, notamment.

Dans ce qui suit, nous présentons le programme d'optimisation de l'agriculteur représentatif en faisant la distinction entre ses choix de court terme (tactique d'irrigation) et ses choix de long terme (parts de surface à allouer aux différents systèmes de culture).

Le choix intra-annuel des tactiques d'irrigation

Supposons dans un premier temps que l'agriculteur ait alloué une proportion $\delta^K \in [0,1]$ à chaque système de culture K, $K \in \{A,B,C\}$, avec bien entendu $\sum_{K\in\{A,B,C\}} \delta^K = 1$. La question consiste alors à déterminer pour chaque système de culture et chaque année, les tactiques d'irrigation qui devront être utilisées, c'est-à-dire les tactiques qui maximisent la fonction objectif de l'agriculteur (marge brut totale, ici en l'occurrence).

Le problème $\boldsymbol{P_1}$ intra-annuel de l'agriculteur pour l'année t s'écrit :

$$\underset{\begin{Bmatrix}\delta_1^A(t),\ldots,\delta_s^A(t),\ldots,\delta_{S_A}^A(t)\\ \delta_1^B(t),\ldots,\delta_s^B(t),\ldots,\delta_{S_B}^B(t)\\ \delta_1^C(t),\ldots,\delta_s^C(t),\ldots,\delta_{S_C}^C(t)\end{Bmatrix}}{Max} SAU \times \left\{ \sum_{s=1}^{S_K} \delta_s^K(t) \times \left[p^K(t) \times Y_s^K(t) + PAC^K(t) - C^K(t) - w(t) \times WAT_s^K \right] \right\}$$

s.l.c. $\sum_{s=1}^{S_K} \delta_s^K(t) = \delta^K \quad \forall K \in \{A,B,C\} \quad \forall t \in \{1,\ldots,T\}$

où :

$\delta_s^K(t)$ est la part de SAU allouée à la stratégie d'irrigation s l'année t dans le SdC K

SAU est la surface agricole utile de l'exploitation représentative

$p^K(t)$ est le prix unitaire de la culture produite l'année t dans le SdC K (euros / kg)

$Y_s^K(t)$ est le rendement de la culture produite l'année t dans le SdC K (kg / ha)

$PAC^K(t)$ est le montant des primes compensatoires de la culture produite l'année t dans le SdC K (euros / ha)

$C^K(t)$ est le coût unitaire de production (hors dépenses en eau) de la culture produite l'année t dans le SdC K (euros / ha)

$w(t)$ est coût unitaire de l'eau (euros / m3)

WAT_s^K est la quantité totale d'eau associée à la stratégie d'irrigation s dans le SdC K (euros / ha)

Autrement dit, pour une année donnée, on recherche pour chaque système de culture et chaque tactique d'irrigation la part de SAU (qui peut être nulle à l'optimum) sur laquelle l'agriculteur doit

mettre en œuvre cette tactique d'irrigation de manière à maximiser sa fonction objectif. Dans le programme $\boldsymbol{P_1}$, la fonction objectif de l'agriculteur est simplement sa marge brute c'est-à-dire la différence entre sa recette (prix de la culture multiplié par le rendement correspondant à la tactique d'irrigation augmenté des primes compensatoires) et ses coûts (coût variable de production plus dépenses spécifiques en eau qui dépendent de la tactique d'irrigation).

La solution du problème d'optimisation $\boldsymbol{P_1}$ permet de déterminer les parts optimales de SAU à allouer à chaque tactique d'irrigation pour chaque année et chaque système de culture, conditionnellement à la surface totale allouée à chaque système de culture. On en déduit alors :

$$MB^K(t|\delta^K)$$

c'est-à-dire la marge brute optimisée de l'agriculteur pour l'année *t* et le système de culture *K* sachant qu'une proportion $\delta^K \in [0,1]$ a été allouée au système de culture *K*.

On doit, à ce stade, souligner un certain nombre d'hypothèses sous-jacentes à l'écriture de ce programme. Premièrement, l'agriculteur connaît parfaitement sa fonction de production et est à même de calculer pour chaque tactique d'irrigation le rendement de chaque culture. Une autre hypothèse sous-jacente du programme $\boldsymbol{P_1}$ de l'agriculteur est qu'il connaît en début de sa campagne d'irrigation toutes les réalisations à venir concernant les variables climatiques du modèle. Autrement dit, l'agriculteur forme des anticipations rationnelles par rapport à l'ensemble des variables climatiques. Ainsi il ne subit aucun risque intra-annuel et aucun comportement de précaution (retreindre l'irrigation aujourd'hui pour un usage demain) n'est présent. Enfin, dans le programme $\boldsymbol{P_1}$ l'agriculteur peut utiliser n'importe quelle tactique faisant partie de l'ensemble des possibles. En pratique, il se peut que l'agriculteur soit contraint dans ses choix d'irrigation. Le type de contraintes que l'on va modéliser dans ce qui suit incluent typiquement des quotas maximum d'irrigation (en mm) ou bien des interdictions ou des limitations d'irrigation à certaines périodes de l'année dans le cas de sécheresse.

Le choix inter-annuel des systèmes de culture

Etant donnée la marge brute optimale de l'agriculteur pour l'année *t* et pour chaque système de culture *K*, $MB^K(t|\delta^K)$, il s'agit maintenant de déterminer la part optimale de SAU qui devrait être allouée à chaque système de culture. Deux approches sont possibles selon que l'on adopte une perspective "historique" ou bien de "gestion de risque".

Perspective historique

Le programme d'optimisation de l'agriculteur $\boldsymbol{P_{2a}}$ s'écrit :

$$\underset{\delta^A,\delta^B,\delta^C}{Max}\left\{\sum_{t=1}^{T}\beta^t \times \left[U\left(\delta^A \times MB^A(t|\delta^A) + \delta^B \times MB^B(t|\delta^B) + \delta^C \times MB^C(t|\delta^C)\right)\right] - \sum_{K=A,B,C}\delta^K \times C^K\right\}$$

$$s.l.c \quad \delta^A + \delta^B + \delta^C = 1$$

où β représente le facteur d'escompte et *U(.)* la fonction d'utilité de l'agriculteur représentatif.

Dans le programme précédent, le terme C^K représente un coût spécifique à chaque système de culture. On peut interpréter le terme C^K comme l'ensemble des coûts non observés (dépenses d'amortissement, contraintes techniques non modélisées, etc.) qui font que l'agriculteur ne choisit pas nécessairement d'allouer toute sa SAU au système de culture qui lui procure une utilité actualisée de la marge brute la plus élevée. Le calibrage de ce paramètre sera discuté dans la section suivante. Dans cette perspective "historique", les parts de surface à allouer à chaque système de culture maximisent la somme actualisée des marges brutes sur l'ensemble des périodes considérées, nettes de la somme des coûts spécifiques à chaque système de culture.

Perspective "risque"

Le programme d'optimisation de l'agriculteur $\boldsymbol{P_{2b}}$ s'écrit :

$$\underset{\delta^A,\delta^B,\delta^C}{Max}\left\{\sum_{t=1}^{T} p(t)\times\left[U\left(\delta^A\times MB^A(t|\delta^A)+\delta^B\times MB^B(t|\delta^B)+\delta^C\times MB^C(t|\delta^C)\right)\right]-\sum_{K=A,B,C}\delta^K\times C^K\right\}$$

$$s.l.c \quad \delta^A+\delta^B+\delta^C=1$$

où *p(t)* représente la probabilité de réalisation de l'année climatique *t* et U(.) la fonction d'utilité de l'agriculteur représentatif.

Il est évident que, dans un premier temps, nous considérerons chaque année comme étant équiprobable. Par contre, dans un deuxième temps, il sera possible d'attribuer un poids plus élevé aux années sèches de manière à caractériser l'allocation optimale des surfaces à chaque système de culture dans un contexte de risque de sécheresse plus élevé. Dans cette perspective "risque", les parts de surface à allouer à chaque système de culture maximisent l'espérance de profit brut, nette de la somme des coûts spécifiques à chaque système de culture.

Annexe 2. Paramétrisation du modèle biophysique STICS

Nous décrivons les principales caractéristiques des sols, des itinéraires techniques et des climats retenus pour caractériser la région Midi-Pyrénées, voir Brisson et al. (2006). Pour plus de détails sur le modèle STICS, le lecteur intéressé pourra se référer à Brisson et al. (1998) ou bien Brisson et al. (2003).

Paramétrisation des sols

Le choix des sols s'est fait à partir de la carte pédologique au 1/1 000 000e sur la base de leur réserve utile, caractérisant leur capacité de stockage l'eau, et de leur représentativité significative dans la région Midi-Pyrénées. Ainsi, ont été retenus un sol à faible réserve utile (entre 40 et 100 mm), un sol à forte réserve utile (supérieure à 160 mm) et un sol intermédiaire (réserve utile entre 100 et 160 mm).

	Sol	RU[1] (mm)	Profondeur (cm)	MO[2] (%)	Mulch[3]
Type 1	brun calcaire argileux	85	50	0.8	*
Type 2	alluvial calcaire	116	80	1.5	**
Type 3	brun calcaire	182	110	1.3	*

[1] RU : Réserve utile.
[2] MO : Matière organique. Une bonne fertilité des sols correspond à une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en calcaire actif qui bloque la minéralisation.
[3] Selon les propriétés de surface du sol, se formera plus ou moins rapidement une couche sèche, appelée mulch naturel, protectrice vis-à-vis de l'évaporation

Tableau A.1. Principales caractéristiques des sols retenus en Midi-Pyrénées

Paramétrisation des itinéraires techniques

Les itinéraires techniques correspondant aux trois systèmes de culture retenus sont synthétisés dans le tableau A.2. Les itinéraires techniques sont identiques pour les trois types de sol. Les précédents culturaux jouent un rôle sur l'état hydrique et minéral du sol au semis et fournissent des résidus qui sont enfouis lors des opérations de travail du sol supposées conventionnelles (déchaumage, labour, façons superficielles avant semis). A chaque variété de culture est associé un fichier de données qui décrit les caractéristiques physiques.

Région	Système de culture	Culture (variété)	Date de semis	Fertilisation KgN ha^{-1}
Midi Pyrénées	A Maïs	Maïs (Cécilia)	15/04	250 (2)
	B Blé dur	Blé dur (Nefer)	10/11	210 (3)
	Blé dur	Blé dur (Nefer)	01/10	170 (2)
	Sorgho	Sorgho (DK18)	25/04	120 (2)
	C Blé dur	Blé dur (Nefer)	10/11	170 (2)
	Tournesol	Tournesol (Mélody)	15/04	60 (1)

Tableau A.2. Principales caractéristiques des itinéraires techniques retenus en Midi-Pyrénées.

A.3 Paramétrisation du climat

Les données climatiques, présentées dans le tableau A.3, proviennent de la station météorologique de Toulouse pour laquelle nous disposons de 33 années d'historiques journaliers (de 1972 à 2005) pour lesquelles on observe :

- la température minimale moyenne (T° min),
- la température maximale moyenne (T° max),
- le rayonnement cumulé (R),
- l'ETP Penman cumulé (Etp),
- la pluie cumulée.

Station	Année	Mois	Jour/mois	Jour/année	T° min	T° max	R	ETP	Pluie
Toulouse	1979	1	1	1	1	11.8	2.1	0.6	9
Toulouse	1979	1	2	2	-5	0.3	9.1	0	0
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
Toulouse	1979	12	29	363	4.2	9.8	3.5	0.9	0
Toulouse	1979	12	30	364	10.0	11.5	2.1	1.3	3

Tableau A.3. Extrait du fichier climatique pour l'année 1979 en Midi-Pyrénées.

Annexe 3. Calcul de la prime de risque

Définition et interprétation d'une prime de risque

Supposons que le profit stochastique d'un exploitant agricole (stochastique du fait par exemple d'un aléa climatique) puisse être représenté par une variable aléatoire $\tilde{x}$. Cet exploitant agricole valorise ce profit aléatoire via une fonction d'utilité strictement croissante, notée *U(.)*.

On définit alors l'*équivalent certain* du profit, $\overline{W}$, comme le niveau certain de richesse permettant d'obtenir un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa. Par définition, l'équivalent certain est défini par :

$$U\left(\overline{W}\right) = EU\left(\tilde{x}\right)$$

L'agriculteur est alors indifférent entre recevoir le profit $\overline{W}$ avec certitude et la situation risquée caractérisée par la variable aléatoire $\tilde{x}$.

La *prime de risque* découle très naturellement de l'équivalent certain. La prime de risque est définie comme le montant monétaire, *P*, que l'agriculteur est prêt à sacrifier pour éviter toute forme de risque. La prime de risque est définie par la condition suivante :

$$U\left(E\left(\tilde{x}\right) - P\right) = EU\left(x\right)$$

En d'autres termes, la prime de risque est le montant monétaire que l'agriculteur est prêt à payer pour recevoir le niveau de profit espéré tout en conservant un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa. Le lien entre la prime de risque et l'équivalent certain est immédiat :

$$P = E\left(\tilde{x}\right) - \overline{W}$$

On a alors une relation entre les préférences de l'agriculteur vis-à-vis du risque et le signe de la prime de risque. Lorsque l'agriculteur est neutre, averse ou aime le risque, la prime de risque est respectivement nulle, positive et négative.

Calcul de la prime de risque dans le modèle empirique

En utilisant la forme CRRA de la fonction d'utilité de l'agriculteur représentatif et les programmes d'optimisation $\boldsymbol{P_1}$ et $\boldsymbol{P_{2b}}$, on obtient après quelques calculs :

$$\overline{W} = \left\{(1-\alpha)\times\left[EU\left(\delta^A \times MB^A(t|\delta^A) + \delta^B \times MB^B(t|\delta^B) + \delta^C \times MB^C(t|\delta^C)\right) + \sum_{K=A,B,C} \delta^K \times C^K\right]\right\}^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

Le calcul de la prime de risque est alors immédiat en utilisant les formules précédentes. Pour plus de lisibilité, on reporte dans le texte la prime de risque et l'équivalent certain par ha qui sont simplement obtenus en divisant P et $\overline{W}$ par la surface agricole utile (SAU).