

## **Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires**

Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques

# **Partie II. Etude par simulations**

7. Problématique, méthodes et plan de simulation
8. Simulation de la levée des cultures intermédiaires avec le modèle SIMPLE
9. Evaluation par simulation des jours potentiellement disponibles pour la destruction mécanique des cultures intermédiaires à l'automne
10. Impacts de la gestion de l'interculture sur les bilans d'azote et d'eau, et sur le rendement de la culture suivante, simulés avec le modèle de culture STICS
11. Conclusions



## Introduction

La seconde partie de ce rapport concerne trois études par simulations au moyen de modèles dynamiques. Ces études ont pour but de pallier l'incomplétude des informations rassemblées dans l'analyse bibliographique présentée dans la première partie, notamment en vue de l'extrapolation à la diversité des conditions pédoclimatiques françaises. Cette partie concerne plus particulièrement l'analyse et la quantification de la fonction de "piège à nitrate" produite *via* divers modes de gestion de l'interculture, à savoir par i) les résidus de récolte, ii) les repousses de colza et de blé, et iii) les cultures intermédiaires.

Ces travaux de simulation sont basés sur les éléments suivants : i) les questions posées par les commanditaires, ii) les pratiques actuelles (en date de 2006) de gestion de l'interculture, et iii) l'incomplétude de références concernant l'efficacité des cultures intermédiaires et des repousses en fonction de leur conduite et des conditions pédoclimatiques très contrastées rencontrées en France.

Les commanditaires ont sollicité l'INRA afin de fournir des données quantitatives et un avis scientifique sur l'efficacité des cultures intermédiaires pour réduire la pollution nitrique par rapport à d'autres techniques de gestion de l'interculture. Les simulations réalisées permettent d'analyser la plupart des situations rencontrées en France, y compris celles qui posent le plus de problème (notamment les situations de sols argileux, de récolte tardive). En effet pour ces situations des dérogations ont été demandées par les agriculteurs ou leurs représentants auprès des préfets, suite à la circulaire de 2008 imposant la couverture des sols à l'automne en "zones vulnérables Nitrate" qui posent question vis-à-vis de la pollution nitrique des eaux souterraines.

L'analyse de l'état des lieux des pratiques de cultures intermédiaires a pour but de cadrer les gammes de variation et donc de s'assurer que les simulations sont réalistes vis-à-vis de la diversité des pratiques, des conditions et des systèmes de culture français.

Enfin cette étude par simulations a pour objectif de compléter les références et les connaissances sur l'efficacité de divers modes de gestion de l'interculture pour réduire la lixiviation d'azote nitrique dans les différentes situations de systèmes de type "grandes cultures" en France. En effet, compte tenu de la variabilité des effets identifiés dans la recherche bibliographique, il était difficile d'extrapoler de façon simple et robuste les résultats de cette analyse à la diversité des sols et climats et des systèmes de culture français. L'étude par simulation doit permettre d'identifier les conditions pour lesquelles les cultures intermédiaires et les repousses de colza et de blé sont efficaces pour réduire les pertes d'azote nitrique par lixiviation dans les conditions françaises, mais aussi les situations où elles ne le seraient pas. Ainsi, cette étude a pour but principal de quantifier les effets des cultures intermédiaires dans leur fonction "piège à nitrate", sans toutefois négliger l'évaluation des effets potentiellement indésirables sur les bilans d'eau et d'azote et sur la culture principale suivante. Les effets biotiques ou l'impact sur les conditions de l'implantation de la culture suivante en termes d'état structural du sol n'ont pas été analysés dans ce volet de l'étude.

L'évaluation de l'efficacité pour réduire la lixiviation d'azote nitrique s'appuie sur l'analyse i) du niveau de réussite de l'implantation des cultures intermédiaires durant la phase semis-levée, ii) de l'efficacité du piégeage du nitrate durant leur croissance, et iii) des difficultés possibles liées à leur destruction en fonction des types de sol (texture argileuse notamment) et de la date de travail du sol. Ces trois points ont été analysés au travers de 3 études complémentaires.

La première étude a eu pour objectif d'analyser les conditions de réussite de la levée des cultures intermédiaires en fonction de leur date de semis, du climat au sein du lit de semences (température et humidité), et des conditions physiques de celui-ci (état structural du lit de semences et profil de répartition des graines). Cette première étude réalisée avec le modèle SIMPLE (Dürr et al., 2001) doit permettre de quantifier les taux et la durée de la levée des cultures intermédiaires pour un échantillon de pédoclimats français décrivant une large variabilité climatique.

La deuxième étude a pour objectif d'évaluer les jours potentiellement disponibles pour la destruction des cultures intermédiaires à l'automne en fonction du type de sol (différentes textures allant de sol sableux à argileux). Cette étude s'appuie sur des simulations de l'humidité du sol avec le modèle de culture STICS (Brisson et al., 1998,

2002, 2003, 2008), et le calcul de jours potentiellement disponibles basés sur la portance du sol pour réaliser une opération mécanique, qui est fonction de l'humidité des premiers horizons du sol.

La dernière étude, qui est la plus conséquente en terme de nombre de simulations, a été réalisée avec le modèle de culture STICS afin d'analyser la dynamique des bilans d'eau et d'azote en période d'interculture pour divers modes de gestion (cultures intermédiaires, repousses, gestion des résidus). Au-delà de l'aide à la compréhension de la dynamique des processus en interaction avec les conditions pédoclimatiques, les simulations ont pour but de quantifier les effets de divers modes de gestion de l'interculture sur la lixiviation de nitrate et d'analyser leur variabilité, dans une large gamme de conditions pédoclimatiques françaises. L'étude doit permettre de quantifier et donc de comparer l'efficacité des cultures intermédiaires, des repousses et des modes de gestion des résidus pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage sous la parcelle agricole (c'est-à-dire sous la zone explorée par les racines des cultures principales). Elle doit permettre d'identifier les dates de levée et de destruction les plus favorables, ainsi que les conditions pédoclimatiques où l'efficacité serait forte ou au contraire faible. Enfin, cette étude a pour objectif d'analyser les éventuels effets indésirables de ces divers modes de gestion pour le bilan hydrique et pour le rendement de la culture principale suivante.

## **Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires**

Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques

# **7. Problématique, méthodes et plan de simulation**

**Auteurs :**

**Julie Constantin**

**Christine Le Bas**

**Catherine Mignolet**

**Eric Justes**

Juin 2012

## Sommaire

7.1. Contexte .....	269
7.2. Les justifications des dérogations à l'implantation de CIPAN.....	270
7.3. Objectifs de l'étude par simulation au moyen d'un modèle dynamique de culture .....	271
7.4. Le modèle de culture choisi : STICS .....	272
7.5. Echelle spatiale et représentativité des simulations.....	274
7.6. Echelle temporelle des simulations .....	274
7.7. Choix des situations climatiques, pédologiques et techniques.....	275
7.8. Choix des successions et itinéraires techniques des cultures principales .....	279
7.9. Modalités de gestion de l'interculture .....	279
7.10. Evaluation des performances du modèle STICS .....	285
7.11. Analyse des simulations et présentation des résultats.....	287
Références bibliographiques citées .....	289

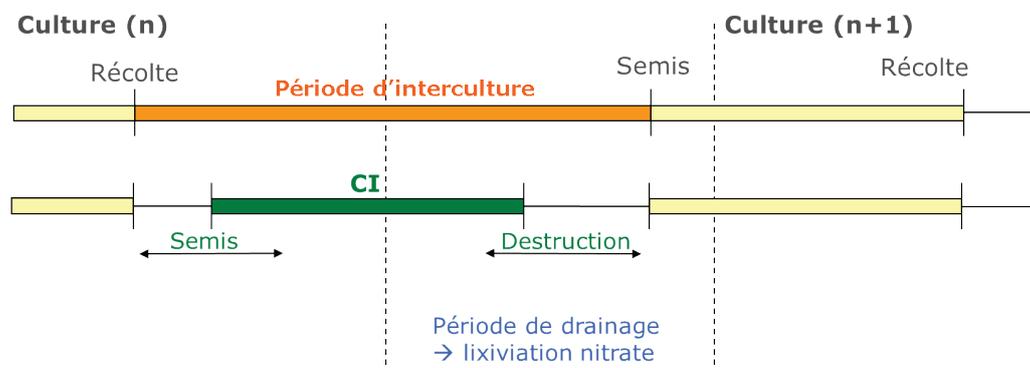
Relecteurs du chapitre membres du groupe d'experts : Nicolas Beaudoin, Patrick Bertuzzi et Laurent Ruiz.

Relecteurs externes du chapitre : Bernard Itier, Marie Launay et Bernard Nicolardot.

Le plan de simulation et les résultats préliminaires ont été discutés par les membres du groupe technique composé de : Jean-Pierre Cohan (Arvalis - Institut du végétal), Rémy Duval (Institut Technique de la Betterave), Tanegmart Redjala-Ounnas (CETIOM - Centre technique interprofessionnel des oléagineux et du chanvre), Sébastien Minette (Chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes), Alain Lecat (Chambre régionale d'agriculture du Nord Pas-de-Calais et Institut Technique de l'Agriculture Biologique), Nathael Leclech (Chambre régionale d'agriculture de Lorraine), Damien Ronget (Chambre d'agriculture de Côte d'Or), Frédérique Hupin (Nitrawal, Belgique).

## 7.1. Contexte

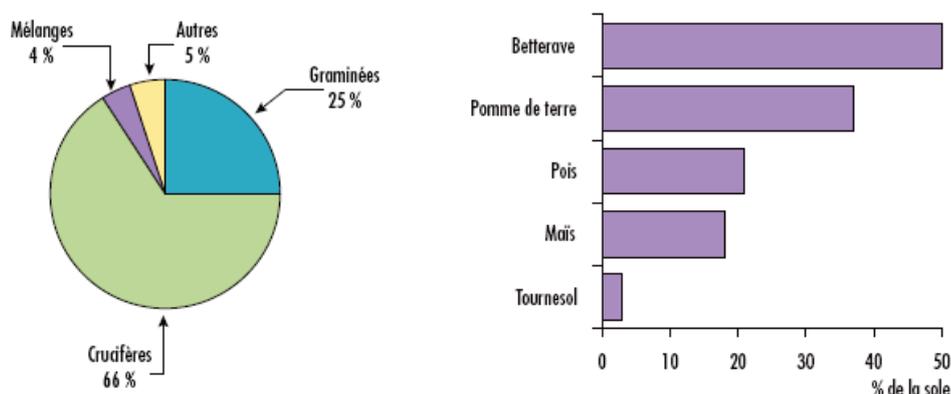
L'interculture est la période, dans la rotation culturale, qui se situe entre la récolte d'une culture principale de vente ou de rente et le semis de la suivante (Figure 7-1). Sa durée varie selon les dates de récolte et de semis des cultures principales, de quelques jours dans le cas d'une récolte tardive du précédent suivie d'une culture d'hiver, à plusieurs mois dans le cas d'une culture de printemps. Durant cette période, un sol laissé sans plante ou "nu", en particulier dans le cas d'interculture longue, peut fortement augmenter le risque de lixiviation d'ions nitrate vers les aquifères. L'implantation d'une culture intermédiaire dite "piège à nitrate" (CI ou CIPAN) permet de réduire ce phénomène, dans des proportions variées selon le contexte pédoclimatique et le système de culture, de 20 à 90% par rapport à un sol nu (par ex. Aksegaard et al., 2005 ; Beaudoin et al., 2006) ; cette large gamme d'efficacité doit être analysée en regard des facteurs déterminant le drainage et la lixiviation nitrrique.



**Figure 7-1.** Représentation schématique de l'interculture dans une succession de cultures annuelles (en haut) et de l'implantation de culture intermédiaire durant cette période (en bas).

Ces cultures peuvent être semées sous couvert ou, plus communément, après la récolte de la culture principale. En post-récolte, les CI sont généralement semées en août ou début septembre, pour une destruction allant de novembre à février de l'année calendaire suivante. Leur durée d'implantation varie donc de 2 à 6 mois, selon les successions culturales et les régions. Leur destruction peut se faire mécaniquement (broyage, labour, déchaumage) ou, parfois, chimiquement par application d'un herbicide foliaire systémique (glyphosate par exemple), selon les espèces et la maturité du couvert végétal, mais aussi selon la réglementation en vigueur, qui interdit dans de nombreux cas le recours à une destruction chimique; en France ces CI sont donc principalement détruites par broyage et/ou enfouissement mécanique.

D'après l'enquête "Pratiques culturales" 2006, les cultures intermédiaires sont essentiellement implantées avant des cultures de printemps, et en particulier avant la betterave et la pomme de terre ; et dans une moindre mesure avant le pois, le maïs ou encore le tournesol (Figure 7-2). Ce sont majoritairement des crucifères, à 66% contre 25% de graminées ; l'usage de mélange d'espèces ou d'autres familles est peu répandu (4 à 5%).



**Figure 7-2.** Proportion de la sole d'une culture donnée précédée d'une culture intermédiaire, à gauche, et proportion d'espèces semées comme culture intermédiaire (% des surfaces), à droite (Source : Agreste 2006).

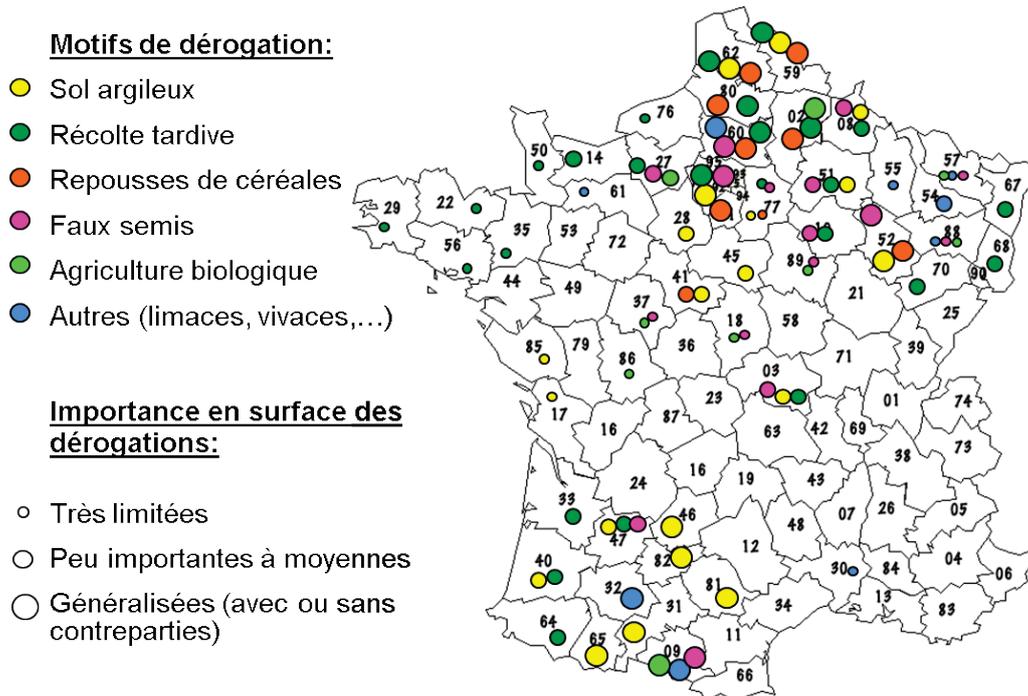
L'étude bibliographique portant sur l'impact des cultures intermédiaires (CI) sur la lixiviation des ions nitrate, dans les systèmes de cultures annuelles, démontre un manque de références régionales en France. Il en va de même concernant leur impact sur d'autres variables telles que le bilan hydrique ou le rendement de la culture suivante. Or l'implantation des cultures intermédiaires devenant obligatoire sur la totalité des zones vulnérables à partir de 2012, il est nécessaire d'évaluer *a priori* leur degré d'efficacité pour réduire la concentration en nitrate des eaux de drainage selon le contexte pédoclimatique dans une large gamme de conditions françaises, afin de pouvoir adapter au mieux leur itinéraire technique, et identifier les situations où leur usage peut induire des conséquences négatives sur la culture suivante et potentiellement sur la recharge des nappes.

## 7.2. Les justifications des dérogations à l'implantation de CIPAN

Les arguments sous-jacents aux demandes de dérogations ont été analysés afin d'apporter autant que possible des éléments d'analyse pour comprendre et hiérarchiser les risques motivant ces demandes auprès des pouvoirs publics. En conséquence, les scénarios qui seront simulés auront pour objectif de couvrir les principaux cas "types" pour lesquels des dérogations à l'implantation des CI ont été demandées.

Un premier type de demande de dérogation concerne des situations de sol à fort taux d'argile. Toutefois, il convient de préciser que la texture des sols qualifiés d'argileux dans ces demandes de dérogation est très hétérogène, puisque les seuils indiqués par les demandeurs varient de 22 à 40% d'argile selon les départements. Si l'on se réfère à la qualification *ad hoc* des textures des sols français, un sol est considéré comme argileux lorsque sa teneur en argile (fraction < 2 µm) est supérieure à 37% selon le triangle de texture GEPPA largement utilisé en France (Richer de Forges et al., 2008). Un sol est considéré comme argilo-limoneux lorsque sa teneur en argile est comprise entre 27,5% et 37%. Les demandes de dérogation s'appuient sur l'argument selon lequel les sols argileux nécessitent un travail précoce à l'automne difficilement compatible avec l'implantation de CI.

D'autres demandes de dérogation sont argumentées par : i) de faibles reliquats d'azote minéral dans le sol à la récolte, ii) une récolte tardive de la culture principale (avec des dates de dérogations du 1<sup>er</sup> septembre au 31 octobre selon les départements) ne permettant pas l'installation de CI, iii) une substitution des CI par des repousses de céréales, iv) la nécessité de réaliser de faux semis, notamment en Agriculture biologique, et enfin v) l'impact négatif des CI sur le bilan d'eau ou les facteurs biotiques (Figure 7-3).



**Figure 7-3.** Localisation et importance (en surface) des différents motifs de dérogations à l'implantation des cultures intermédiaires par département (source: arrêtés préfectoraux régionaux et départementaux)

### 7.3. Objectifs de l'étude par simulation au moyen d'un modèle dynamique de culture

L'étude par simulation menée en complément de l'analyse bibliographique est réalisée dans des contextes pédoclimatiques français diversifiés et comporte 3 volets (Figure 7-4) :

- 1- Une étude centrale portant sur les impacts des modes de gestion de l'interculture sur l'azote (la lixiviation de l'azote nitrique en particulier), le bilan d'eau et les effets sur la culture suivante (Chapitre 10).
- 2- Une étude portant sur la phase de semis-levée des cultures intermédiaires, afin d'identifier d'éventuels problèmes pendant cette phase d'installation de la CI, dont dépend son efficacité de "piège à nitrate" par la suite (Chapitre 8).
- 3- Une étude spécifique sur la phase de destruction automnale des cultures intermédiaires et les risques de tassement du sol lié à cette destruction, selon les types de sol considérés (Chapitre 9).

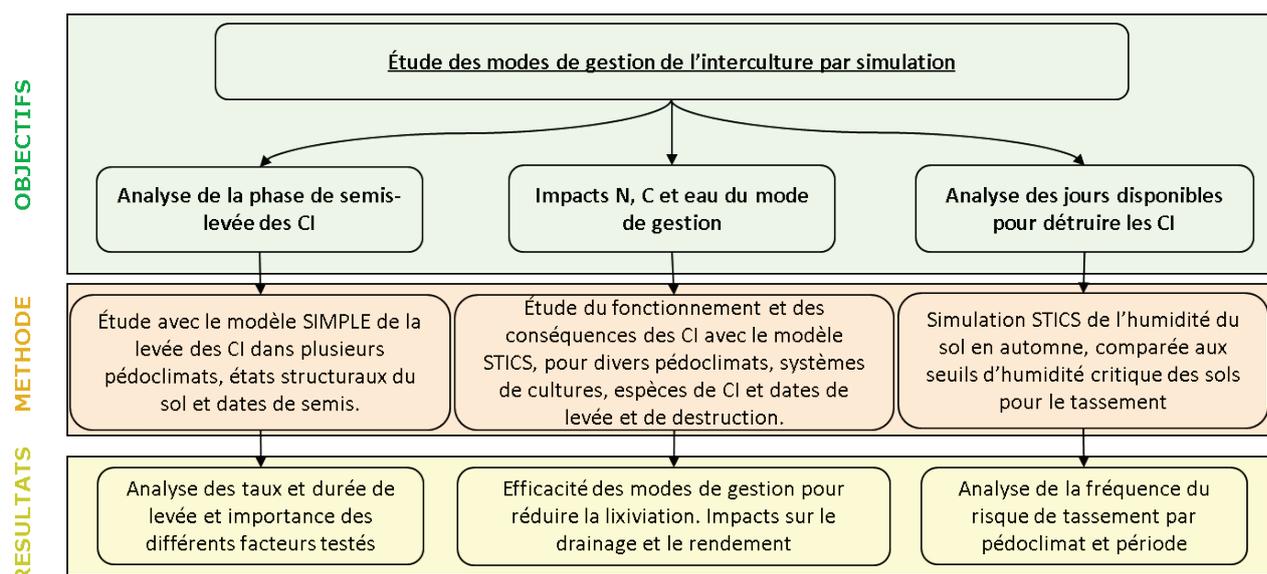
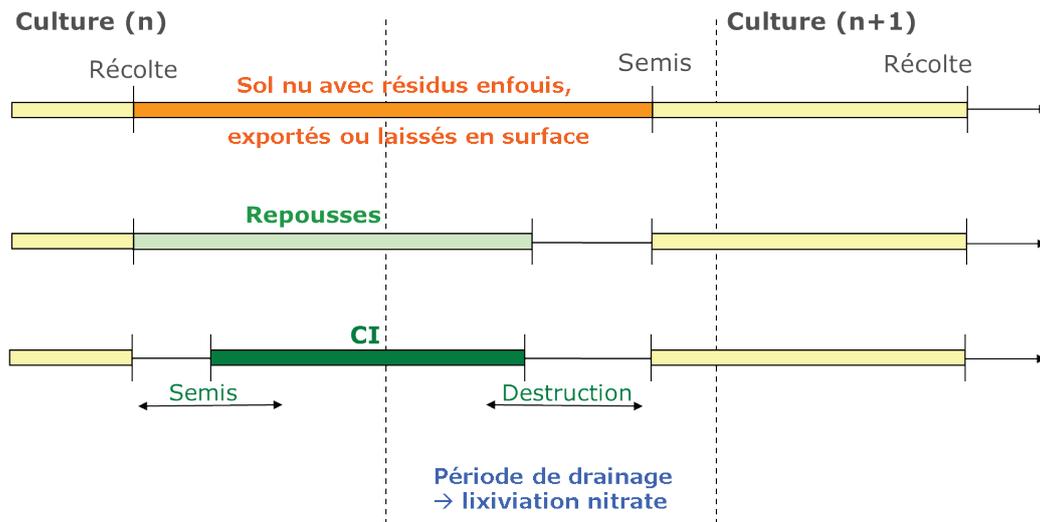


Figure 7-4. Récapitulatif des différents volets de l'étude par simulation, de leurs objectifs, méthodes générales et résultats attendus.

Un premier objectif de ce volet "modélisation" est d'obtenir des ordres de grandeur réalistes en termes d'efficacité des cultures intermédiaires pour réduire les fuites de nitrate dans différents pédoclimats et systèmes de culture. Cette efficacité nécessite d'être évaluée par rapport à une situation de référence qui est l'interculture laissée en sol nu, mais également comparée à des pratiques alternatives telles que les repousses de céréales ou de colza, ou l'enfouissement des résidus de culture. Différentes modalités de gestion de ces cultures intermédiaires sont également testées, et les grands déterminants de l'efficacité des CI sont mis en évidence et hiérarchisés par le biais d'analyses statistiques des résultats des simulations.

Ainsi, ce travail de simulation vise à évaluer l'impact de ces cultures intermédiaires en fonction des espèces utilisées, de leurs modalités de gestion (dates de semis et de destruction) et de leur durée d'implantation, dépendant notamment des précédents cultureux et des cultures suivantes, semées en hiver ou au printemps (Figure 7-5). En revanche, certaines pratiques ne sont pas abordées directement par le biais de la modélisation ; c'est le cas du semis sous couvert des CI et du mélange d'espèces dans la composition de ces CI. En effet, ces situations sont très difficiles à représenter d'un point de vue technique puisqu'il s'agit de simuler avec le modèle de culture choisi, le fonctionnement de plusieurs cultures en même temps et sur une même parcelle tout en considérant leur compétition. Cependant, ces techniques peuvent présenter des avantages qu'il serait intéressant d'analyser plus en détail par expérimentation de terrain et numérique. Un deuxième objectif est d'appréhender, conjointement au piégeage des nitrates par le couvert, l'effet des CI sur le bilan hydrique, en particulier dans des régions à faible pluviométrie, fréquemment soumises à des déficits hydriques, et sur la culture suivante. Les simulations permettront donc de déterminer les impacts sur les profils hydriques du sol et le drainage ainsi que

l'impact sur la culture suivante. Cette étude aidera à identifier des risques potentiels de stress hydrique pour la culture suivante, ou de recharge de nappe réduite. L'impact des CI sur la disponibilité en eau pour la culture suivante, sur l'absorption d'azote et le rendement sera également analysé. Cette étude sera menée sur la base des résultats des simulations de scénarios de gestion de l'interculture réalisées avec le modèle de culture STICS.



**Figure 7-5.** Représentation schématique des différentes modalités de gestion de l'interculture dans une succession de cultures annuelles ayant un impact sur les bilans d'azote, d'eau et de carbone.

L'étude de la phase de semis-levée permettra de déterminer les taux et les durées de levée des cultures intermédiaires dans différents contextes pédoclimatiques et pour différentes conditions de semis, en termes de date de semis et d'état structural du lit de semence. Il s'agira notamment d'identifier les causes potentielles de non-levée et leurs importances respectives. Cette étude sera réalisée avec le modèle SIMPLE qui simule la germination et la levée des cultures en fonction des conditions climatiques et pédologiques ainsi que des caractéristiques spécifiques de la culture considérée.

L'étude de la phase de destruction des cultures intermédiaires et du risque de tassement du sol sera abordée par le biais de simulations des profils hydriques journaliers sur les deux premiers horizons de sol (0-10 et 10-30 cm) par le modèle STICS. Ces simulations permettront de prévoir les jours potentiellement disponibles pour la destruction de la CI en place, en fonction de la portance du sol à l'automne. Des seuils de risque de tassement en fonction de l'état hydrique du sol seront donc déterminés pour chaque type de sol afin de décider quels jours sont disponibles pour ces opérations sans risque de tassement du sol.

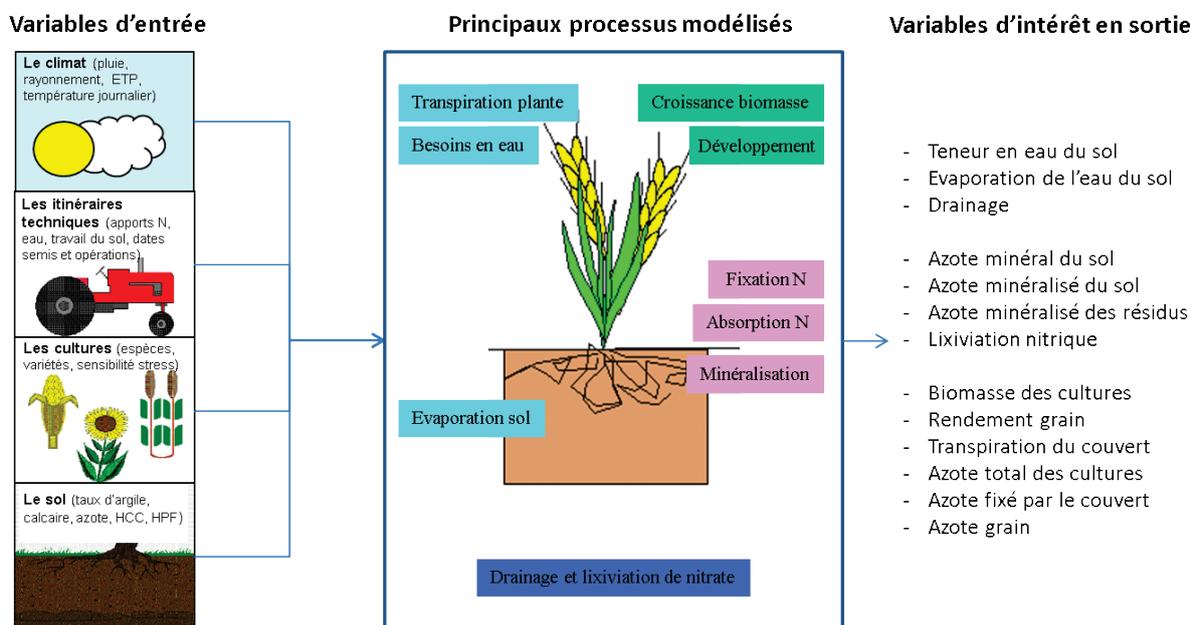
## 7.4. Le modèle de culture choisi : STICS

L'étude est réalisée à l'échelle de la parcelle à l'aide du modèle de culture sol-plante-atmosphère STICS (Brisson et al., 1998, 2002, 2003, 2008) dans sa version 6.9. Le modèle STICS est un modèle monodimensionnel intégrant les variabilités et la diversité du climat, du sol et des modalités techniques. Il simule leurs effets sur le fonctionnement des cultures et l'évolution de caractéristiques environnementales à l'échelle de la parcelle. Il restitue les bilans d'eau, de carbone et d'azote à un pas de temps journalier (Figure 7-6). Il gère les effets simples ou combinés des stress hydrique et azoté sur la culture. Les stress biotiques ou abiotiques autres qu'hydrique et azoté ne sont pas pris en compte par le modèle.

STICS calcule principalement des variables caractérisant la production végétale, telles que le rendement de la culture, ainsi que des variables environnementales telles que la quantité de nitrate lixivié et la restitution d'eau au milieu (ruissellement et percolation) durant le cycle cultural et l'interculture, voire durant une rotation culturale.

La culture est appréhendée globalement par sa biomasse aérienne et sa teneur en azote, son indice foliaire ainsi que le nombre, la biomasse et la teneur en azote des organes récoltés ; les organes végétatifs ne sont donc pas individualisés. Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales, chaque couche étant caractérisée

par sa réserve en eau, et ses teneurs en azote minéral et organique. Les interactions entre le sol et la culture sont assurées par les racines, définies par une distribution de densité racinaire dans le profil de sol. La croissance de la culture est pilotée par le bilan de carbone, où le rayonnement solaire intercepté par le feuillage (moteur énergétique) est transformé en biomasse aérienne *via* la photosynthèse (assimilation de carbone représentée par une efficacité de conversion de l'énergie en biomasse). Le bilan azoté de la culture est simulé parallèlement au bilan de carbone, dont il dépend en partie, la croissance en biomasse dépendant en partie du statut azoté de la plante et de la disponibilité en azote minéral du sol.



**Figure 7-6.** Représentation schématique des données d'entrée du modèle STICS (à gauche), des principaux processus simulés et des variables de sorties d'intérêt pour l'étude (à droite).

La minéralisation nette d'azote du sol est la somme de la minéralisation de la matière organique du sol, et de la minéralisation nette des résidus de culture ou des amendements organiques apportés au sol. La vitesse de minéralisation de l'azote de la matière organique du sol dépend de son stock, de la texture (taux d'argile et de calcaire), de l'humidité et de la température du sol. La vitesse de décomposition des résidus dépend de la nature des résidus organiques (caractérisés par leur rapport C/N), de leur profondeur d'incorporation dans le sol, de la température et de l'humidité du sol, ainsi que de la disponibilité en azote minéral dans la couche de sol où se situent les résidus.

Le modèle STICS présente l'avantage d'être déjà paramétré pour plusieurs cultures principales (blé tendre, blé dur, maïs, colza) et intermédiaires (moutarde, ray-grass) (Dorsainvil, 2002). La fonction de décomposition des résidus de cultures, mures ou non, a déjà été testée et améliorée à plusieurs reprises (Justes et al., 2009 ; Nicolardot et al., 2001). De plus, ce modèle a été paramétré dans des contextes pédoclimatiques français diversifiés ; l'étude se situe donc dans une gamme de situations proches de celles pour laquelle le modèle a été paramétré et validé. Enfin, le modèle simule des variables de sortie environnementales telles que la lixiviation d'azote nitrique et le drainage, qui sont indispensables dans l'évaluation de l'impact de la gestion de l'interculture.

Dans le cadre de l'étude de la phase semis-levée des cultures intermédiaires, le modèle SIMPLE, est spécifiquement utilisé. Il s'agit d'un modèle stochastique qui simule la germination et la levée de cultures en fonction des propriétés des graines, du sol et du climat. Il est présenté de manière plus détaillée dans la partie consacrée à cette étude (Chapitre 8).

## 7.5. Echelle spatiale et représentativité des simulations

La stratégie choisie afin d'évaluer l'impact des cultures intermédiaires, ou d'autres modes de gestion de l'interculture, en France est de réaliser une analyse de sensibilité dans une large gamme de conditions pédoclimatiques représentant la gamme observée en zones de grandes cultures, et notamment en "zones vulnérables Nitrate" du territoire. Notre ambition n'est pas d'avoir une représentation spatialement pondérée de la "ferme France", mais de couvrir une large gamme de situations pédoclimatiques et de systèmes de culture existants, pour une analyse multi-locale et sans chercher l'exhaustivité. Ainsi, les simulations réalisées ne prétendent pas représenter l'ensemble des pédoclimats de toutes les petites régions agricoles françaises, ou des cas très particuliers de sols, climats ou systèmes de culture mais permettent de simuler l'impact des différents modes de gestion de l'interculture sur les fuites de nitrate et les bilans d'eau et d'azote, en fonction de facteurs climatiques, pédologiques et de systèmes de culture contrastés, rencontrés en France.

Cette étude est donc fondée sur une sélection de points climatiques sur le territoire français, pour le climat actuel, représenté par les années 1988 à 2008 (données SAFRAN de Météo-France). Nous avons choisi de considérer différents types de sol en cohérence avec le positionnement géographique des points de grille de données climatiques, ces points de grille climatique correspondant à des climats ayant une bonne représentativité régionale, hormis des situations topographiques particulières.

Des systèmes communs de succession culturale sont testés sur chacun de ces points climatiques. Les itinéraires techniques des différentes cultures simulées (date de semis et de récolte, dose d'azote apportée...) sont adaptés régionalement afin de simuler des situations qui ont une certaine représentativité par rapport aux situations réelles, selon les enquêtes et informations des services statistiques français.

Les scénarios sélectionnés permettent donc de simuler une gamme variée de gestions de l'interculture dans des systèmes de culture, des climats et des sols cohérents régionalement, permettant ainsi de couvrir une large gamme des possibles, mais sans avoir l'ambition d'être exhaustif.

## 7.6. Echelle temporelle des simulations

Les simulations sont réalisées sur une période allant de la récolte d'une culture principale jusqu'au début de la période de drainage suivante, c'est-à-dire le 15 novembre de l'année suivante (Figure 7-7). Elles comprennent donc la simulation d'une interculture et de la culture suivante et sont sur deux années calendaires, allant de 1988-1989 à 2007-2008.

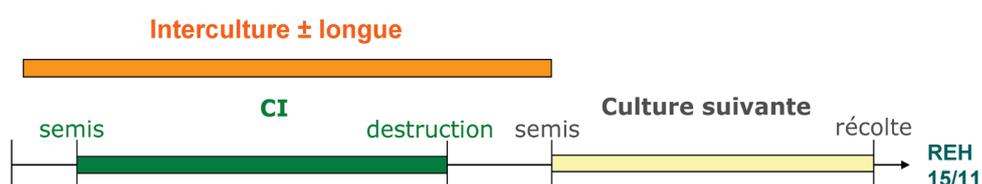


Figure 7-7. Echelle temporelle des simulations

La période de simulation s'étend jusqu'au 15 novembre afin de simuler le reliquat d'azote minéral dans le profil du sol au début de la période de drainage suivante (REH). L'intérêt est de vérifier si la minéralisation des résidus de CI n'entraîne pas une augmentation de ce reliquat et donc du risque de lixiviation d'azote pendant l'hiver suivant, si le sol est laissé nu, comme cela a déjà été observé dans d'autres études (Hansen et al., 2000 ; Thomsen et Christensen, 1999).

Les simulations ont aussi pour objectif de faire une analyse de sensibilité prenant en compte l'effet de la variabilité interannuelle du climat. Elles sont initialisées avec des teneurs en azote minéral et en eau du sol imposées chaque année ; 3 niveaux différents sont testés pour l'azote minéral et une initialisation par site, type de sol et précédent cultural est utilisée pour la teneur en eau, correspondant à la valeur moyenne post-récolte sur 20 ans. Ainsi, l'effet des modes de gestion de l'interculture sera analysé sur 20 campagnes climatiques avec des

simulations indépendantes, correspondant au même état initial de la simulation et non à une simulation en continu des successions de culture. Le choix de faire des simulations indépendantes chaque année plutôt qu'une simulation continue sur 20 ans permet de distinguer les effets annuels du mode de gestion étudié d'effet cumulatif lié en particulier à l'enfouissement successif de CI.

## 7.7. Choix des situations climatiques, pédologiques et techniques

Le choix des stations climatiques, des types de sols et des systèmes de culture à modéliser a été réalisé à partir de bases de données disponibles à l'échelle du territoire français en considérant les "zones vulnérables Nitrate". D'une part, des systèmes de culture représentatifs ont été identifiés sur la base d'une carte de France des régions agricoles, basée sur une typologie des systèmes de culture français réalisée lors du projet ANR Popsy (Marcuola et al., 2009). Cette répartition spatiale a été réalisée à partir des données de l'enquête Teruti-Lucas 2006-2009 ; elle a permis d'identifier des régions agricoles comportant des systèmes de culture homogènes selon des critères statistiques de représentativité significative (Figure 7-8). A partir de cette enquête, il est possible d'associer à chaque type d'assolement des successions culturales et donc des couples "précédent-suivant" représentatifs de la zone considérée. En croisant cette carte avec celle des zones vulnérables définies par la directive "Nitrate", nous avons constaté que les zones vulnérables couvrent l'essentiel des grandes régions agricoles françaises. Nous avons donc décidé de nous concentrer sur les grandes régions agricoles françaises concernées par les zones vulnérables, donc soumises aux obligations d'implantation de couverts végétaux pendant la période automne-hiver.

### 7.7.1. Etapes suivies

Les étapes suivies pour déterminer les sites pédoclimatiques et les systèmes de culture sont les suivantes :

- 1- Sélection des régions agricoles (RA) et zones vulnérables "Nitrate" (ZV) du territoire français ; identification des systèmes de culture majoritaires
- 2- Etablissement de cartes des différences entre pluie (P) et évapotranspiration (ETP), représentatives de la lame drainante, et de la température moyenne mensuelle sur 11 ans, par mailles de 12 km sur 12 km pour ces RA\*ZV sur les périodes de :
  - i. août à novembre, correspondant à la période de croissance des CI,
  - ii. décembre à mars, correspondant à la période de drainage ;
- 3- Choix des points climatiques SAFRAN (Vidal et al., 2003) pour la récupération des données climatiques journalières sur la période de 1988-2008. Les points sont choisis de manière à être représentatifs des combinaisons de classes de température et P-ETP sur le territoire français, dans la limite des RA\*ZV ;
- 4- Délimitation d'une zone autour de chaque point SAFRAN pour la sélection des sols, de manière à couvrir l'ensemble des zones en RA\*ZV déterminées précédemment ;
- 5- Choix des sols représentatifs de la zone considérée basé sur 3 critères pédologiques : texture de surface, réserve utile et profondeur, selon leur représentativité en terme de surface, déterminée à partir de la base de données géographique des sols de France à 1/1 000 000<sup>e</sup> (INRA, 1998).

### 7.7.2. Détails de certaines étapes

#### 7.7.2.1. Les systèmes de culture majoritaires

Afin de déterminer les cultures majoritaires en France dans les zones de grandes cultures classées zones vulnérables "Nitrate", nous nous sommes basés sur une typologie de grandes régions agricoles déterminée dans le cadre du projet ANR Popsy (Marcuola et al., 2009). A partir de cette typologie basée sur les données de l'enquête Teruti-Lucas (Figure 7-8), il était possible de déterminer la proportion des cultures majoritaires ainsi que les successions de cultures de 2006 à 2009.

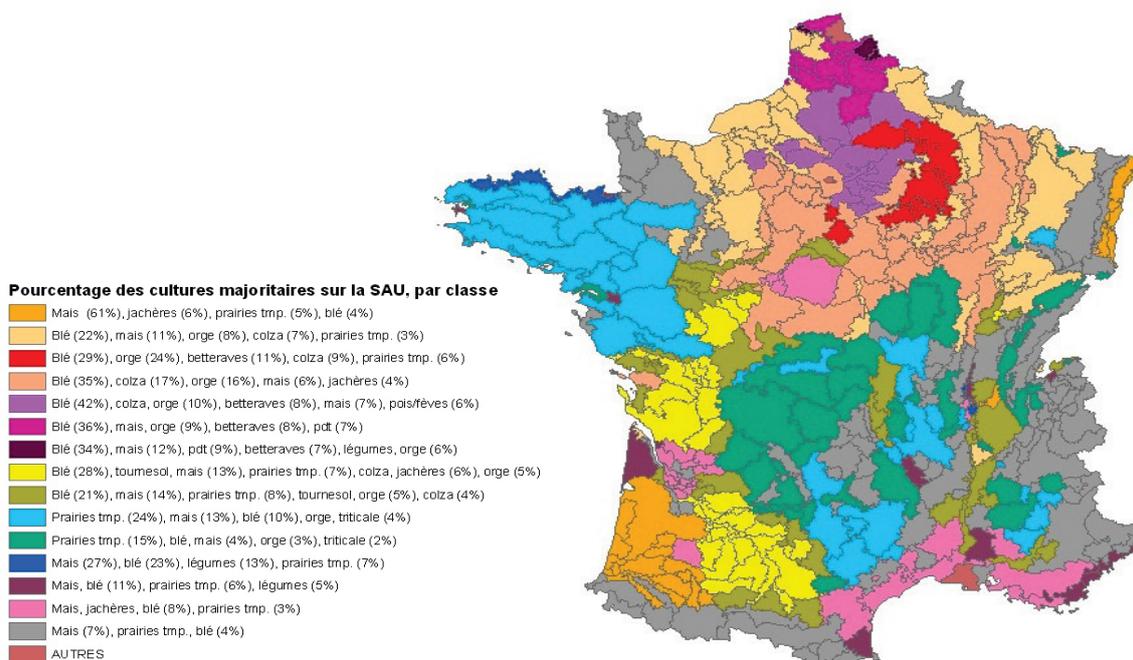


Figure 7-8. Typologie des cultures majoritaires sur la SAU en France 2006-2009.

### 7.7.2.2. La sélection des points climatiques

Un zonage climatique basé sur des données mensuelles (météo-France) sur la période 1993-2004 et sur des mailles de 12 km sur 12 km environ sur l'ensemble du territoire français a été réalisé afin de caractériser la variabilité climatique française et de déterminer des points climatiques contrastés qu'il serait intéressant de sélectionner pour avoir une large gamme de conditions climatiques en interculture.

Les variations de la température moyenne ayant un gradient Nord-Sud en été et Est-Ouest en hiver bien marqué, une représentativité de ces contrastes est assurée par la répartition des stations climatiques sur l'ensemble du territoire. Les variations de somme de (P-ETP) sur la période d'août à mars sont beaucoup plus variables régionalement (Figure 7-9).

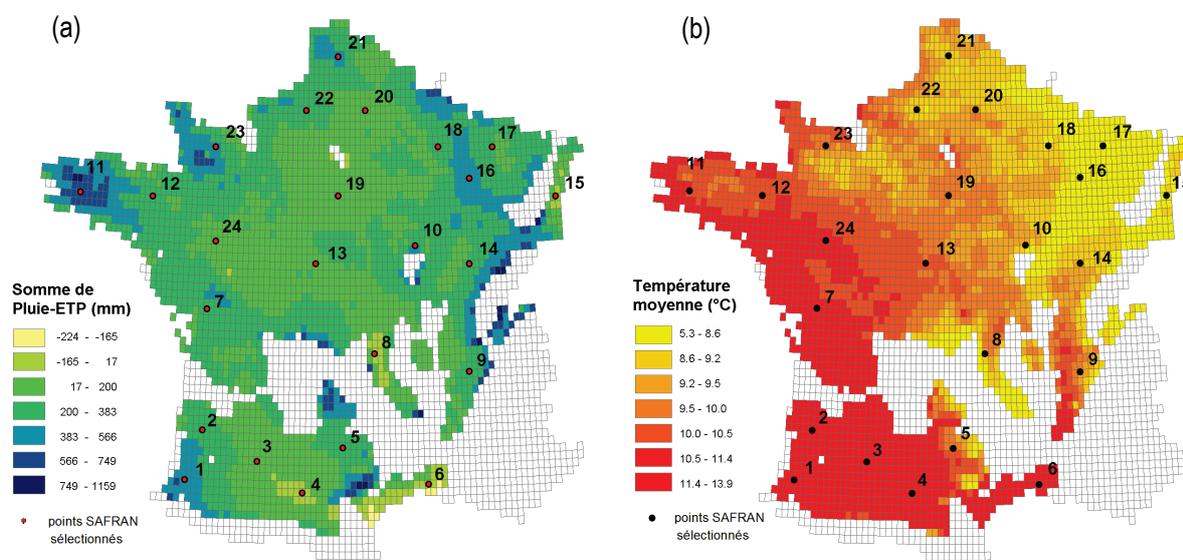


Figure 7-9. Zonage par (a) classes de somme (P-ETP) et (b) températures moyennes sur la période d'août à mars des mailles météorologiques situées dans les grandes régions agricoles concernées par les zones vulnérables "nitrate" et localisation des points climatiques sélectionnés.

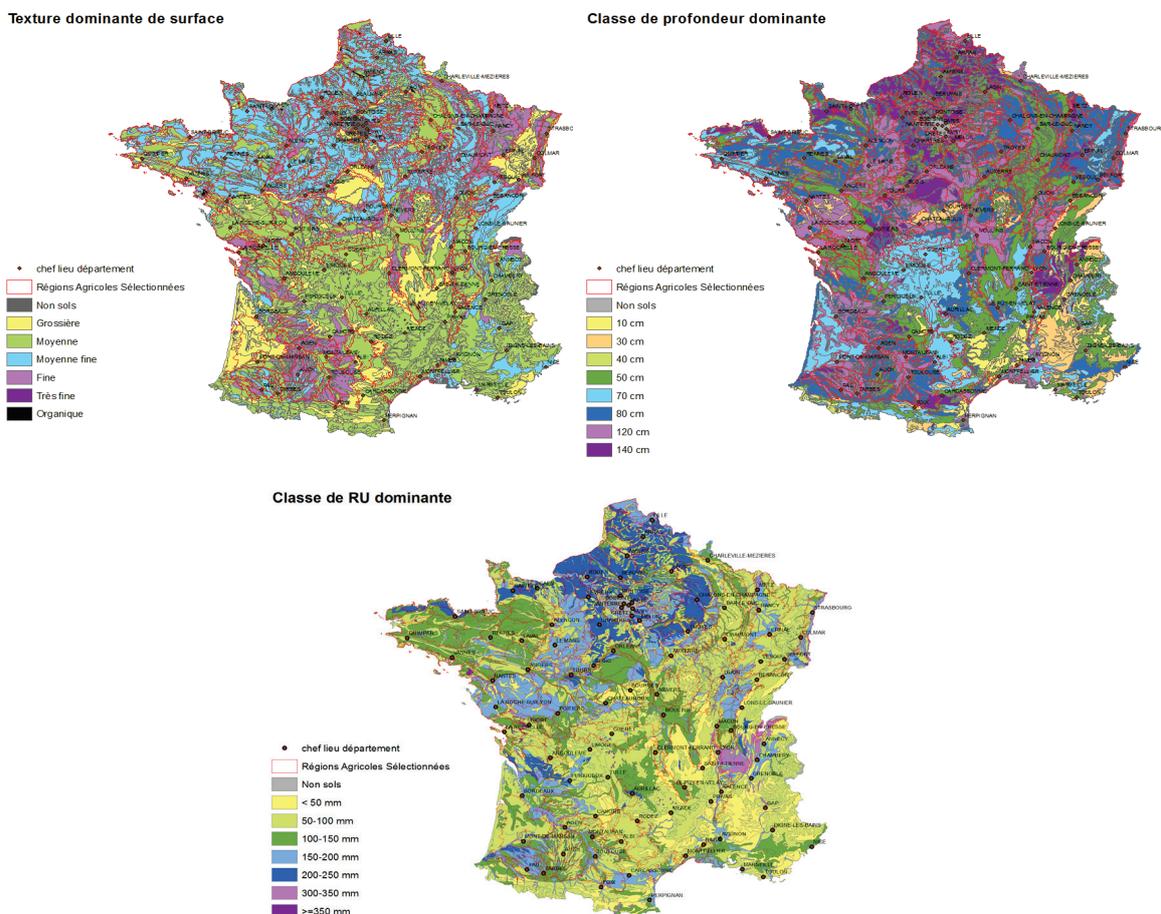
L'indicateur P-ETP est analysé sur deux périodes, allant d'août à novembre et de décembre à mars, puis sur ces deux périodes réunies. Après avoir sélectionné suffisamment de points pour représenter la variabilité climatique du territoire français, les données climatiques SAFRAN (maille de 8 km sur 8 km) associées à chaque point ont été récupérées sur 20 ans (1988-2008) afin de représenter la variabilité des climats français.

Des classes équidistantes sont définies pour déterminer des zones climatiquement contrastées qu'il est souhaitable de prendre en compte pour les simulations. Le croisement des indicateurs climatiques utilisés, des grandes régions agricoles et des zones vulnérables, nous a amené à sélectionner 24 points climatiques SAFRAN, représentés en rouge sur la carte (Figure 7-9).

### 7.7.2.3. La sélection des sols

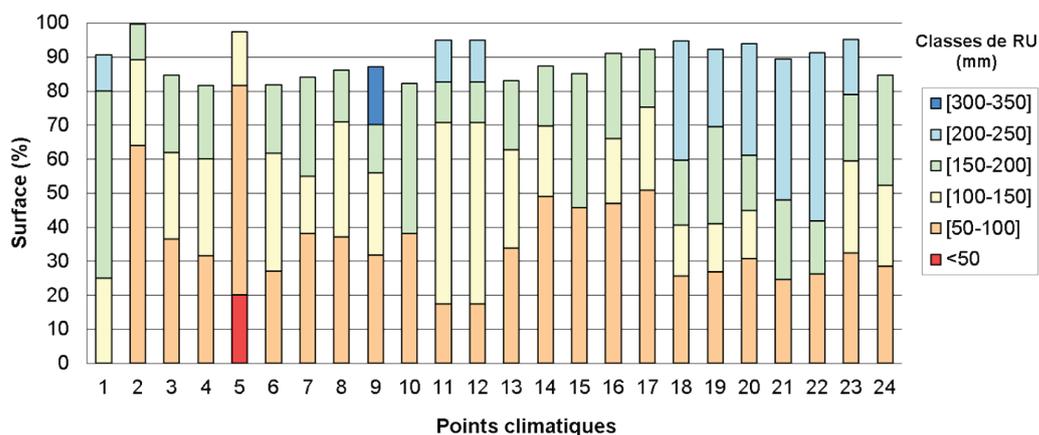
Pour chaque point climatique et sa région agricole environnante, 2 à 4 sols représentatifs en termes de réserve utile en eau, profondeur et texture de surface ont été choisis à partir de la base de données géographique des sols de France à 1/1 000 000<sup>e</sup> (INRA, 1998) (Figure 7-10).

Premièrement, des classes de RU sont déterminées et les classes dominantes (> 10% de la surface de la zone) sont sélectionnées, de manière à couvrir 80% de la surface de la zone considérée. Pour chacune de ces classes, le ou les couple(s) profondeur - texture de surface dominants sont choisis, puis l'unité typologique de sol dominante correspondant à ces combinaisons de critères est sélectionnée.



**Figure 7-10.** Zonage des classes de texture de surface, de profondeur de sol et de réserve utile (RU) dominante pour les sols français (INRA, 1998).

La représentativité de ce sol en termes de surface de la zone considérée est calculée. Ainsi, 2 à 4 sols, correspondant à différents niveaux de réserve utile, ont été sélectionnés (Figure 7-11). Cette sélection n'a pas visé l'exhaustivité des sols mais une gamme assez large de types de sol réels caractérisés par des profondeurs et des réserves utiles contrastées.



**Figure 7-11.** Surface cumulée des types de sols français, représentés par leur classe de RU (exprimée en mm), associés à chaque site climatique de la Figure 7-9.

La caractérisation complète des unités typologiques de sol retenues a ensuite été réalisée en vue d'assurer leur paramétrage dans le cadre de l'utilisation du modèle STICS. La méthode de paramétrage employée est celle développée par Le Bas et al. (2005) pour le modèle STICS.

Les sols pour chaque site climatique sont donc définis selon 3 caractéristiques : leur réserve utile, leur texture de surface et leur profondeur. Ainsi, différentes combinaisons de ces 3 critères sont présentes pour les 24 sites climatiques sélectionnés (Tableau 7-1).

Site	Texture de surface et classe de RU (mm)												
	Grossière		Moyenne					Moyenne fine				Fine	
	[50-100]	[100-150]	[50-100]	[100-150]	[150-200]	[200-250]	[300-350]	[50-100]	[100-150]	[150-200]	[200-250]	[50-100]	[100-150]
1			80	120	150				120				
2	70	120			120								
3			120	120								80	
4			120	120								80	
5	70		70	80									
6			50	80	120								
7			50	120									120
8			50	120	120								
9			50	120	120		150						
10				120				50					80
11			70	120	150			50	80				
12			70	120	150			50	80				
13		150											
14			120					50		120			
15				120									80
16				120				50				80	120
17			80	120				50					80
18		120	50	120	80								80
19		120		120						120	150		80
20		120	50	120							150		
21			50	120							150		
22				120							150		80
23								50	80	120	150		
24				120				50	80	120			

**Tableau 7-1.** Profondeur des sols (cm) par site climatique, en fonction de la texture et de la classe de réserve utile (RU) considérées.

## 7.8. Choix des successions et itinéraires techniques des cultures principales

Trois successions-types, présentes dans la grande majorité des régions agricoles françaises de la Figure 7-8, basées sur les données Teruti-Lucas 2006-2009, ont été sélectionnées pour représenter des caractéristiques d'interculture contrastées et qui pourront être déterminantes dans l'impact sur les fuites de nitrate :

- Une succession blé d'hiver - maïs avec une récolte estivale du blé suivie d'une longue période d'interculture et un semis du maïs au printemps. Le blé est du blé tendre ou blé dur selon les régions considérées ; de même pour le choix du maïs, grain ou fourrage (ensilage) en fonction des régions. Cette succession "type" permet aussi d'appréhender la dynamique des bilans d'eau et d'azote en interculture pour des cultures suivantes semées également au printemps, comme la betterave sucrière, la pomme de terre, l'orge de printemps ou encore le pois de printemps. Elle peut prétendre représenter de façon satisfaisante un précédent céréale à paille autre que le blé, comme l'escourgeon, l'orge de printemps, le triticale...
- Une succession colza – blé qui présente une interculture courte avec un semis du blé à l'automne. Comme pour la succession blé - maïs, le blé est, selon les cas, du blé dur ou du blé tendre d'hiver. Cette succession "type" permet aussi d'appréhender la dynamique des bilans d'eau et d'azote en interculture dans le cas d'une succession courte du type pois ou fêverole – blé en considérant une quantité d'azote minéral du sol résiduel supérieure à celle du colza à la récolte.
- Une succession maïs – maïs, en grain ou fourrage selon les régions, qui permet d'étudier des cas de récolte tardive, à l'automne (de fin septembre à fin octobre), suivie d'une longue période d'interculture jusqu'au printemps. Cette succession-type permet aussi d'appréhender la dynamique des bilans d'eau et d'azote en interculture des successions avec une récolte à l'automne suivie d'un semis au printemps, comme dans le cas de successions betterave - pois ou tournesol - orge de printemps.

Ces successions ne peuvent prétendre représenter de façon satisfaisante des successions avec des durées d'interculture très courtes comme la succession orge ou blé – colza, tournesol – blé, ou betterave – blé pour lesquelles les durées d'interculture sont trop courtes pour implanter une CI après récolte.

Les itinéraires techniques des cultures de vente (fertilisation azotée, irrigation, date de semis et de récolte, travail du sol) sont déterminés à partir des données régionales de l'enquête "Pratiques culturelles" Agreste 2006.

Les apports d'azote sont fractionnés et quantifiés par culture et région française, selon l'enquête "Pratiques culturelles" 2006. Les apports sont réalisés à stades phénologiques fixes, selon les cultures. Le type d'engrais utilisé (ammonitrate, solution azotée ou urée) est déterminé en fonction de la forme majoritairement employée régionalement selon les données de l'UNIFA sur les livraisons d'engrais azotés en 2009/2010.

L'irrigation est simulée sur maïs uniquement, en mode automatique dans le modèle STICS, de manière à satisfaire 95% des besoins en eau de la plante, dans les régions où l'irrigation est pratiquée sur au moins 50% des surfaces en maïs. Généralement, l'irrigation du maïs est un marqueur régional assez fort des stratégies de conduite de cette culture.

Le travail du sol, dans le cas du semis du blé à l'automne, est réalisé sur 10 cm, 3 jours avant le semis dans le cas d'une interculture en sol nu ou à la destruction de la CI ou des repousses. Dans le cas d'un semis au printemps, le labour est effectué sur 25 cm de profondeur, dans le cas où il est représentatif de la région considérée (surface en labour > 50%) ; dans le cas contraire, un travail superficiel sur 7 cm est réalisé. La période de ce travail du sol dépend du taux d'argile du sol : si celui-ci est inférieur à 30% dans l'horizon 0-30 cm, le travail du sol est réalisé 3 jours avant le semis ; dans le cas contraire, il est réalisé à l'automne, le 15 octobre en sol nu, ou à la destruction des repousses ou de la culture intermédiaire.

## 7.9. Modalités de gestion de l'interculture

Trois grandes modalités de gestion de l'interculture sont étudiées dans ce volet simulation :

- L'implantation de cultures intermédiaires,
- Des repousses de colza ou de blé,
- La gestion des résidus de la culture précédente.

Succession	Résidus du précédent	Détruite Levée	Moutarde blanche						Ray-grass italien						Vesce						Repousses				Sol nu						
			1/10	20/10	10/11	10/12	10/2	10/3	1/10	20/10	10/11	10/12	10/2	10/3	1/10	20/10	10/11	10/12	10/2	10/3	1/10	20/10	10/11	10/2							
Blé – Maïs	Enfouis	25/7	x	x	X	x				x	x	X	x	X	x				x	x	X	x	X	x							
		10/8	x	x	X	x				x	x	X	x	X	x				x	x	X	x	X	x							
		25/8	x	x	x	x				x	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x	x							
		10/9		x	x	x					x	x	x	x	x					x	x	x	x	x							
		25/9			x	x						x	x	x	x						x	x	x	x							
	-	Exportés																									X	X			T
-	Surface																													x	
-																														x	
Colza – Blé	Enfouis	25/7	X	X						X	X								X	X											
		10/8	X	X						X	X								X	X											
		-																								X				T	
Maïs – Maïs Grain	Surface	25/10					X					X								X											
	Enfouis	-																												T	
	Exportés	-																												x	
Maïs – Maïs Fourrage	Exportés	25/9					X					X								X											
		-																												T	
Blé - Maïs + Lisier	Enfouis	10/8			x	x						x	x	x																	
		10/9			x	x						x	x	x																x	

- X Simulations pour comparer les effets des CI et des repousses, pour les différentes successions.
- Simulations pour tester les effets des dates de levée et destruction dans la succession blé-maïs.
- Simulations avec 3 types de gestion de résidus de CI : laissés en surface, enfouis ou exportés.
- Simulations pour analyser les effets d'apports de lisier.
- T Situation de référence en sol nu

Tableau 7-2. Plan synoptique des conditions évaluées dans le protocole de simulations.

### 7.9.1. Gestion des cultures intermédiaires

Les paramètres des cultures intermédiaires (choix des espèces, dates de semis et de destruction) sont modulés afin de déterminer leur niveau d'efficacité, selon leurs itinéraires techniques et le type de succession dans laquelle elles sont implantées.

Trois types d'espèces de cultures intermédiaires sont simulés afin de prendre en compte des caractéristiques biologiques différentes :

- une crucifère, la moutarde blanche (*Sinapsis alba*) ;
- une graminée, le ray-grass italien (*Lolium multiflorum*) ;
- une légumineuse, la vesce (*Vicia sativa*).

Ces 3 espèces ne peuvent prétendre représenter l'ensemble des espèces potentiellement utilisables en CI. Le choix de ces espèces est en partie contraint par la nécessité de disposer des paramètres spécifiques de fonctionnement des plantes pour calibrer le modèle de simulation STICS.

Ces 3 espèces de culture intermédiaire (moutarde, ray-grass et vesce) sont testées sur l'ensemble des sites avec plusieurs combinaisons de dates de levée et de destruction (Tableau 7-2). Ces combinaisons de dates sont déterminées selon la succession dans laquelle la culture intermédiaire s'insère, de manière à ce que celle-ci soit maintenue en place pendant au minimum 45 jours.

Les résidus de cultures intermédiaires sont enfouis afin de libérer de l'azote pour la culture principale suivante. Toutefois, quelques simulations ont été réalisées pour évaluer, sur quelques combinaisons de dates, l'impact de la gestion des résidus de CI sur la culture suivante selon que leurs résidus sont enfouis, exportés ou laissés en surface.

Afin d'évaluer l'impact des différents modes de gestion de l'interculture (CI, repousses, résidus de récolte), une situation de référence pour chaque succession est définie. Cette situation dite "témoin" est une interculture en sol "nu" (ou plus précisément sans plante) avec des résidus de culture précédente enfouis pour le blé et le colza, exportés pour le maïs fourrage, et laissés en surface pour le maïs grain.

### 7.9.2. Gestion des repousses de blé et de colza

Dans le cas des repousses, deux types de répartition spatiale ont été sélectionnés, afin de représenter un effet de densité de plantes et de répartition spatiale qui peut être induit par le type de moissonneuse, son réglage et la présence ou pas d'éparpilleur de paille. Ainsi, dans un premier cas, les repousses sont considérées comme étant homogènes sur la parcelle, avec un taux de couverture optimal de 100%. Dans un second cas, pour prendre en compte des effets d'hétérogénéité des repousses, un taux de 50% de la couverture du sol est également calculé, en considérant la moitié de la zone couverte à 100% par les repousses et l'autre moitié en sol nu. Cette représentation de l'hétérogénéité des repousses permet de prendre en compte une répartition des repousses en bandes, notamment pour les céréales et donc de représenter une situation post-récolte où des bandes de repousses assez homogènes alternent avec des bandes de sol qui reste quasiment nu.

Contrairement aux cultures intermédiaires, les dates de levée des repousses ne sont pas imposées, mais on considère que leur "semis" se fait au lendemain de la récolte, suite à un déchaumage. Elles sont détruites en octobre, avant le semis du blé (1 ou 20/10) pour les repousses de colza, et le 10 décembre ou le 10 février pour les repousses de blé.

### 7.9.3. Gestion des résidus de culture

Dans le cas de la succession blé-maïs et de la monoculture de maïs grain, différentes gestions des résidus de récolte (exportés, enfouis ou laissés en mulch en surface) sont simulées, afin d'évaluer les impacts de cette gestion sur les fuites de nitrate, quand l'interculture est laissée en sol nu par la suite. *A contrario*, les résidus de maïs fourrage sont systématiquement exportés, considérant une récolte de type maïs ensilage, tandis que ceux de colza ne le sont jamais, afin de représenter les pratiques agricoles actuelles.

Les quantités et le rapport C/N des résidus considérés pour chaque situation de gestion des résidus de récolte sont indiqués dans le Tableau 7-3. Dans le cas de résidus de culture exportés, la biomasse racinaire et les chaumes sont cependant pris en compte et enfouis.

Culture précédente	Gestion des résidus	Profondeur de déchaumage (cm)	Quantité de résidus (t/ha)	Rapport C/N
Colza	enfouis	7	5	50
Blé	enfouis	7	7	80
	surface	1	7	80
	exportés	7	1	80
Maïs	enfouis	7	9	60
	surface	1	9	60
	exportés	7	1	60

Tableau 7-3. Quantités de résidus et rapport C/N considérés dans les simulations et profondeurs d'incorporation.

#### 7.9.4. Cas spécifique de l'apport de lisier

Pour la succession blé - maïs, deux niveaux d'apport de lisier de porc sont simulés en situation de sol nu ou au semis de la moutarde et du ray-grass, avec un apport de 15 m<sup>3</sup>/ha équivalent d'azote total de à 75 kgN/ha (correspondant à environ 50 kgN sous forme ammoniacale), et un second apport double de 30 m<sup>3</sup>/ha correspondant à environ 150 kgN/ha. Ces apports sont testés pour une sélection de sites climatiques se trouvant dans des régions françaises où les apports de fertilisants organiques concernent une part importante de la sole en maïs. Ainsi, 11 sites ont été retenus pour simuler des apports de lisier avec ou sans cultures intermédiaires ; il s'agit des sites 5 et 7 pour le Sud-Ouest, des sites 11, 12, 23 et 24 pour l'Ouest, des sites 14, 17 et 18 pour le Nord-Est et des sites 21 et 22 pour le Nord. Des apports de lisier à deux doses différentes sont donc simulés sur ces sites, majoritairement en maïs fourrage (sites 5, 11, 12, 17 et 21 à 24), ou en maïs grain (7, 14 et 18).

#### 7.9.5. Niveaux initiaux d'eau et d'azote minéral dans le sol

De nombreux auteurs ont montré que le reliquat d'azote minéral du sol à la récolte pouvait être un facteur significatif déterminant le niveau des fuites en nitrate (Fauvel et Morvan, 1998; Laurent, 1999 ; Zhu et al., 2003). Nous avons donc choisi de réaliser une analyse de sensibilité afin d'analyser l'effet de l'état initial (reliquat) en azote minéral du sol à la récolte du précédent sur la gestion de l'azote en interculture. Trois niveaux de reliquat d'azote minéral dans le sol à la récolte du précédent ont été simulés correspondant à des quantités croissantes d'azote nitrique dans le profil initial.

- Le niveau 1 est considéré comme le reliquat d'azote minimal à la récolte incompressible en situation de gestion adaptée de l'azote et de fertilisation azotée optimale ; selon la culture précédente, nous avons considéré une quantité de 20 à 35 kgN/ha sur 90 cm de profondeur ;
- Le niveau 2 correspond à une situation où la gestion de l'azote s'est avérée non optimale *a posteriori*, en raison de facteurs climatiques ou biotiques non contrôlés, malgré la mise en œuvre du bilan prévisionnel ; nous avons considéré une quantité de 60 kgN/ha sur 90 cm de profondeur après culture d'hiver. Elle peut aussi représenter un niveau de reliquat de culture autre que les céréales à paille ou le colza comme précédent qui n'aurait pas la capacité à épuiser le profil de sol (cas des légumineuses à graines par ex.) ;
- Le niveau 3 correspond à une gestion à moyen terme inadaptée de l'azote et à une fertilisation minérale excessive. Selon la culture précédente, nous avons considéré une quantité de 100 à 115 kgN/ha sur 90 cm de profondeur.

Ces 3 situations correspondent à une large gamme des possibles, observés dans les mesures *in situ* (Beaudoin et al., 2005 ; Constantin et al., 2010 ; Ferchaud et al., 2006) mais n'ont pas la vocation de représenter en proportion les situations réelles. L'objectif est d'analyser l'effet des modes de gestion et notamment l'utilité et l'efficacité des CI pour réduire les fuites de nitrate en fonction de la situation initiale du reliquat d'azote minéral. Pour le niveau 3, il s'agit d'évaluer la capacité des CI à "récupérer" une situation temporairement dégradée pour la gestion de l'azote.

Au final, les 3 niveaux d'azote minéral initial sont les suivants : 20, 60 et 100 kgN/ha sur 90 cm après blé et colza. Dans le cas des précédents en maïs, ces initialisations ont été ajustées à 25, 65, 105 kgN/ha pour le fourrage, et 35, 75 et 115 kgN/ha pour le grain, afin de prendre en compte la minéralisation du sol après la fin de la phase d'absorption du maïs. Nous avons choisi de répartir l'azote minéral sur la profondeur de sol de la façon suivante : 60% de l'azote minéral dans les 30 premiers centimètres du sol, et ensuite 20% sur 30-60 cm et 20% sur 60-90 cm. Les quantités d'azote minéral ont été ajustées en fonction de la profondeur de sol de façon à avoir la même quantité d'azote minéral et donc une concentration en nitrate proche par couche de 10 cm (Tableau 7-4).

N minéral initial	Horizons de sol (cm)	Quantité d'azote minéral (kgN/ha)		
		Colza-Blé ou Blé- Maïs	Maïs-Maïs fourrage	Maïs-Maïs grain
1	0-30	12	15	24
	30-60	4	5	6
	60-90	4	5	5
	90-120 (150)	3 (6)	5 (10)	5 (10)
2	0-30	39	39	48
	30-60	11	13	14
	60-90	10	13	13
	90-120 (150)	9 (18)	13 (26)	13 (26)
3	0-30	65	66	75
	30-60	18	20	20
	60-90	17	19	20
	90-120 (150)	15 (30)	19 (38)	20 (40)

**Tableau 7-4.** Etats initiaux d'azote minéral par horizon du sol en fonction du précédent cultural

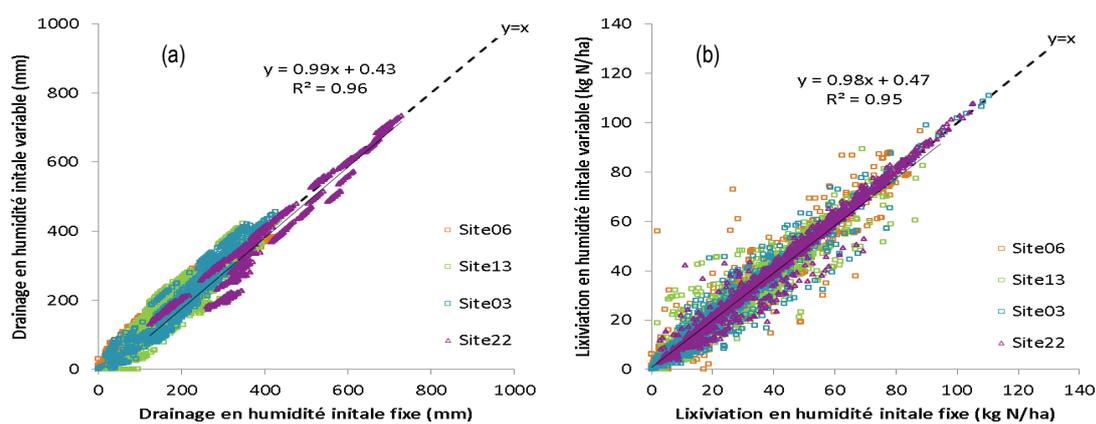
La teneur en eau du sol qui a été utilisée pour initialiser les simulations a été déterminée par précédent cultural, site climatique et sol (Tableau 7-5). Un profil hydrique initial a été défini à partir de simulations réalisées avec le modèle STICS sur 20 ans, pour chaque précédent cultural (blé, maïs et colza). La moyenne des humidités simulées à la récolte a été retenue pour chaque horizon de sol et a été utilisée pour initialiser le profil hydrique.

		Site sec : 6		Site intermédiaire : 18		Site humide : 21	
		Sol 1	Sol 2	Sol 1	Sol 2	Sol 1	Sol 2
Profondeur du sol (cm)		90	120	90	120	120	150
Réserve utile (mm)		124	173	98	178	173	218
Taux d'argile (%)		18	20	40	23	20	25
<b>Blé-Maïs</b>	0-30 cm	12.0 (±4.2)	11.3 (±4.3)	24.3 (±3.0)	18.8 (±3.2)	19.9 (±2.6)	22.0 (±3.2)
	30-60 cm	12.0 (±2.8)	10.9 (±2.6)	25.9 (±2.6)	14.9 (±3.0)	20.2 (±2.9)	22.1 (±2.6)
	60-90 cm	14.3 (±0.7)	11.0 (±0.4)	27.4 (±2.4)	15.4 (±2.4)	18.9 (±2.3)	20.9 (±2.0)
	90-120(150) cm	-	12.2 (±0.3)	-	17.1 (±1.7)	18.9 (±1.7)	21.3 (±1.0)
	% de la RU	19%	6%	52%	56%	87%	91%
<b>Colza-Blé</b>	0-30 cm	12.6 (±4.0)	12.6 (±4.6)	25.0 (±2.9)	19.8 (±3.4)	19.5 (±2.6)	21.4 (±2.9)
	30-60 cm	14.7 (±3.6)	15.6 (±3.4)	29.1 (±2.3)	17.7 (±2.7)	20.4 (±1.9)	22.1 (±1.5)
	60-90 cm	14.6 (±1.1)	12.1 (±1.9)	27.7 (±2.0)	16.7 (±2.1)	20.4 (±1.7)	22.1 (±1.3)
	90-120(150) cm	-	11.5 (±1.5)	-	16.3 (±2.0)	20.1 (±1.9)	22.1 (±1.2)
	% de la RU	31%	22%	70%	67%	94%	95%
<b>Maïs-Maïs</b>	Type de maïs	Grain	Grain	Grain	Grain	Fourrage	Fourrage
	0-30 cm	19.7 (±2.0)	20.6 (±1.7)	25.5 (±2.4)	19.6 (±3.0)	21.6 (±1.8)	23.1 (±2.5)
	30-60 cm	20.4 (±1.6)	20.4 (±1.8)	25.0 (±2.9)	15.0 (±2.8)	20.0 (±2.1)	21.7 (±2.3)
	60-90 cm	20.4 (±0.0)	20.4 (±0.1)	30.7 (±0.2)	20.4 (±0.0)	20.4 (±0.0)	22.1 (±0.0)
	90-120(150) cm	-	20.4 (±0.0)	-	20.4 (±0.0)	20.4 (±0.0)	22.1 (±0.0)
	% de la RU	96%	97%	67%	79%	99%	98%

**Tableau 7-5.** Etats initiaux du profil hydrique du sol en fonction du précédent cultural (exemple des moyennes (écart-type entre parenthèses) de 3 sites climatiques contrastés).

La variabilité des humidités post-récolte du sol simulées avec STICS correspond à des coefficients de variation en moyenne de 13%. Ces coefficients de variation (ou les écart-types) sont très peu variables en profondeur mais sont plus variables entre années pour les horizons superficiels. L'impact de ces variations d'humidité a été testé sur quelques situations climatiques. Ainsi, l'effet du choix de considérer une humidité initiale du sol fixe chaque année (correspondant à la moyenne des 20 années) mais variable selon le site climatique, le précédent cultural et le type de sol plutôt que d'initialiser avec une humidité variable chaque année, a été testé sur 5 sites au climat contrasté (du plus sec au plus pluvieux : sites 6, 13, 3, 22). Ce test a été réalisé dans le cas de la succession blé-mais, avec plusieurs modes de gestion de l'interculture : i) en sol nu, ii) avec CI (moutarde, ray-grass et vesce) ou iii) repousses de blé pour plusieurs dates de levée (25/7, 10/8, 25/9) et de destruction (1/10, 10/12, 10/3).

Cette analyse montre que, quel que soit le type d'initialisation de l'humidité du sol (fixe ou variable chaque année), les quantités d'eau drainée et d'azote lixivié sont proches, bien qu'ils ne soient pas identiques (Figure 7-12). La régression linéaire est très proche de 1 pour ces deux variables, de 0.99 pour le drainage et de 0.98 pour la lixiviation, et des  $R^2$  de 0.96 et 0.95 respectivement, ce qui indique qu'il n'y a pas de biais systématique.



**Figure 7-12.** Drainage (a) et lixiviation (b) entre un profil hydrique initial du sol identique sur 20 ans (en abscisse) et un profil hydrique initial variable d'une année à l'autre (en ordonnée).

L'effet des CI ou des repousses par rapport au sol nu en interculture reste cependant très proche dans les deux cas, avec des écarts d'effets de quelques kilos d'azote en moyenne (Tableau 7-6). En effet, quel que soit le site considéré, il n'y a pas de différence significative de différentiel (ou delta) de lixiviation des CI par rapport au sol nu entre les simulations réalisées avec une humidité initiale unique ou une humidité différente pour chaque année. Le même constat est fait en ce qui concerne le taux d'abattement de la concentration nitrique de l'eau de drainage. Seules les repousses montrent des différences significatives selon le type d'initialisation hydrique du sol pour le différentiel d'azote lixivié par rapport au sol nu dans le cas du site 6 et pour les taux d'abattement de la concentration nitrique sur l'ensemble des sites testées.

		Site06		Site13		Site03		Site22	
		HR fixe	HR var						
Delta de lixiviation (kgN/ha)	Moutarde	-14	-16	-24	-22	-34	-32	-38	-36
	Ray-grass	-12	-14	-24	-22	-34	-31	-31	-29
	Vesce	-7	-8	-15	-14	-22	-20	-14	-13
	Repousses	-7	-11*	-28	-24	-37	-31	-51	-48
Taux d'abattement de $[NO_3^-]$ (%)	Moutarde	46%	50%	50%	47%	63%	59%	58%	56%
	Ray-grass	40%	45%	49%	47%	63%	59%	47%	45%
	Vesce	23%	27%	30%	30%	40%	37%	20%	20%
	Repousses	21%	31%*	62%	54%*	72%	57%**	79%	75%*

**Tableau 7-6.** Différentiel (ou delta) de lixiviation et taux d'abattement de concentration moyen par rapport à une interculture laissée en sol nu par site et type de couvert selon l'initialisation en eau du sol (fixe ou variable sur 20 ans).

\* $p < 0.05$  ; \*\* $p < 0.01$  = différence significative des comparaisons de moyennes avec les 2 types d'initialisation hydrique : HR fixe (identique sur 20 ans) et HR var (différente chaque année).

Cette analyse méthodologique indique que l'effet des cultures intermédiaires est sensiblement identique selon que l'on considère une initialisation identique en eau du sol sur 20 ans ou une initialisation variable chaque année en fonction du climat en interaction avec la culture précédente pour déterminer l'humidité initiale de la simulation. Dans le cas des repousses, les écarts sont significatifs mais très faibles en quantité d'eau et ne remettent pas en cause les résultats obtenus par la suite car les différences, bien que significatives, ne sont pas très importantes.

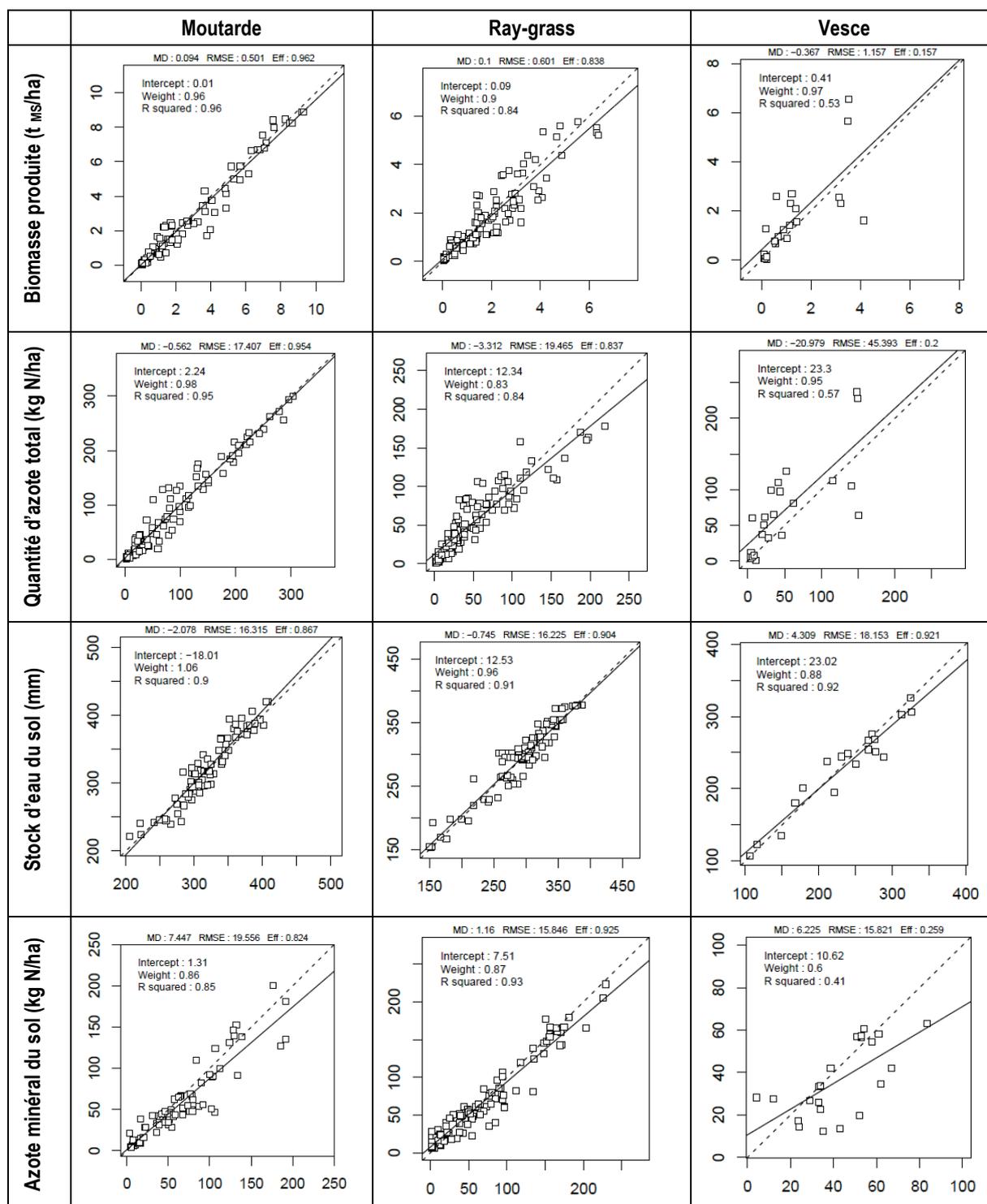
En conclusion les hypothèses faites pour l'initialisation de l'humidité du sol, afin de simplifier le travail déjà très lourd de simulation, ne devraient pas remettre en cause la pertinence des résultats. Cela indique que c'est le climat post-récolte du précédent cultural qui détermine en grande partie l'état hydrique du sol en interculture.

## 7.10. Evaluation des performances du modèle STICS

L'ensemble des simulations a été réalisé avec le modèle STICS dont le paramétrage pour les espèces moutarde et ray-grass a été préalablement évalué, sur la base de données expérimentale disponible (Dorsainvil F., 2002). En ce qui concerne la moutarde, nous avons également utilisé pour cette évaluation une base de données complémentaire pour le Sud de la France, réalisée à partir de 7 ans d'expérimentation à l'INRA de Toulouse. Cette évaluation a consisté à s'assurer que le modèle pouvait simuler correctement la biomasse des CI et l'azote absorbé, la minéralisation des résidus ainsi que les teneurs en azote nitrique et en eau sur le profil du sol. Une mise à jour du paramétrage des espèces moutarde et ray-grass avec la dernière version du modèle STICS s'est avérée nécessaire, car les paramètres pour ces 2 CI avaient été optimisés pour une version antérieure du modèle (version 6.95). Ce travail a été réalisé avec l'outil OptimiSTICS (Wallach et al., 2011). En ce qui concerne l'espèce vesce, un paramétrage a été réalisé sur la base de données disponibles dans le sud et le nord de la France (avec des données provenant d'ARVALIS, du CETIOM et de la Chambre Régionale d'Agriculture Poitou-Charentes) sur un ensemble de 9 sites expérimentaux. Les résultats obtenus sont globalement satisfaisants (Figure 7-13), ce qui permet d'envisager l'utilisation du modèle STICS pour simuler la croissance et l'absorption d'azote ainsi que les effets sur le bilan hydrique et en azote minéral du sol. Un paramétrage complémentaire a été réalisé pour simuler correctement les repousses de colza et de blé à partir du paramétrage initial de ces deux cultures principales.

Concernant une validation plus globale du modèle, une synthèse bibliographique ainsi que les résultats d'évaluation dans sa version 6.9 sont disponibles sur le site Internet [http://www.avignon.inra.fr/agroclim\\_stics](http://www.avignon.inra.fr/agroclim_stics). Le niveau de précision des simulations est globalement de l'ordre de 15 à 20% d'erreur sur les variables d'azote absorbé, de biomasse et de rendement. La précision est généralement meilleure sur le bilan hydrique et le stock d'eau du sol (souvent moins de 10% d'erreur), mais elle est plus faible pour le stock d'azote minéral du sol (généralement entre 15 et 25%) car de nombreux processus (physiques, chimiques et biologiques) se produisent simultanément.

Pour les cultures principales simulées dans le cadre de l'expertise, une calibration avec l'outil OptimiSTICS a été effectuée pour améliorer la qualité de prédiction du modèle. Les résultats bien qu'imparfaits sont satisfaisants pour réaliser une analyse de sensibilité de la réponse des modes de gestion de l'azote sur le niveau de production de la culture principale suivante et en particulier pour identifier des effets positifs ou négatifs systématiques. De plus, il est important de bien définir et illustrer quelle est la gamme de variabilité des situations sur laquelle a été réalisée la validation du modèle STICS et ainsi définir son domaine de validité. Les scénarios de gestion de l'interculture explorés dans la simulation devront se situer dans ce domaine de validité. Une analyse des bases de données utilisées pour évaluer la qualité prédictive du modèle STICS a donc été réalisée. Cette qualification des situations de la base de données a permis, d'une part, de déterminer le domaine de validité du modèle STICS pour les CI (croissance et décomposition des résidus), et d'autre part, de vérifier la sensibilité du modèle aux itinéraires techniques pratiqués, grâce à la présence de situations contrastées en termes de gestion d'interculture pour un même site sur une même année. Nous avons ainsi vérifié que la gamme des situations simulées était bien représentée dans les données expérimentales qui ont servi à paramétrer et à évaluer le modèle STICS. Cela permet de s'assurer que le modèle n'est pas utilisé pour réaliser des simulations en dehors de la gamme dans laquelle il a été validé.



**Figure 7-13.** Comparaison des biomasses, quantités d'azote absorbé par les 3 espèces de CI et teneurs en eau et azote minéral du sol (valeurs simulées en ordonnée et mesurées en abscisse).

MD = Déviation moyenne, EF = Efficacité du modèle, RMSE = Erreur-type

Les performances étant satisfaisantes, le modèle a pu être utilisé avec confiance pour réaliser des "expérimentations numériques". Toutefois, la modélisation de certaines conditions étant insuffisamment validée, celles-ci n'ont pas fait l'objet de simulations : c'est le cas des semis de CIPAN sous couvert de la culture précédente, de mélanges d'espèces de CIPAN (légumineuse et non-légumineuse), ou encore des sols à argile lourde (> 45% d'argile).

## 7.11. Analyse des simulations et présentation des résultats

### 7.11.1. Analyse des simulations

Les simulations sont analysées dans une logique d'évaluation de la sensibilité d'une variable de sortie (simulée) aux variations d'un paramètre d'entrée (climat, type d'interculture, modalité de gestion...). L'objectif est d'identifier les facteurs prépondérants de l'effet de divers modes de gestion de l'interculture (dont les cultures intermédiaires) sur les bilans d'eau et d'azote depuis la récolte du précédent jusqu'à la récolte de la culture suivante. Les simulations ne prennent pas en compte les effets cumulatifs de l'insertion "systématique" des CIPAN à long terme ; ces effets ne sont traités que par l'analyse bibliographique.

Les nombreuses répétitions de simulation, notamment sur les 20 années climatiques, permettent de considérer la fréquence de survenue d'un résultat (un taux de levée des graines > 75%, une réduction de lixiviation < 25 kgN/ha, par exemple) comme une probabilité d'obtenir ce résultat, et donc de quantifier des risques de faible efficacité des CIPAN en fonction des conditions ou des pratiques.

Les situations simulées sont sélectionnées pour être représentatives de la diversité des conditions sur le territoire métropolitain et donc de la gamme des conditions françaises, mais non de leur fréquence d'occurrence. La moyenne des valeurs obtenues sur les 24 sites (9 sites pour les simulations de la phase semis-levée) n'est ainsi pas une moyenne "France", dont le calcul supposerait de connaître le "poids" de chaque situation (climatique, pédologique...); les résultats ne sont donc pas exprimés en moyenne sur les 24 sites, mais la variabilité entre sites est analysée afin d'évaluer la variabilité de réponse de l'effet des cultures intermédiaires. Les simulations ne permettent pas non plus de réaliser un zonage sur la seule base des 24 sites, qui impliquerait de tracer des "frontières" et de réaliser des apparentements d'un site climatique simulé à une région donnée.

### 7.11.2. Représentation de la variabilité

Etant donnée l'importance de la variabilité des phénomènes, liée notamment à celle du climat, des résultats des simulations font l'objet d'une représentation en "box plot" ou "boîte à moustaches", ce qui permet de représenter la majeure partie de la population des résultats obtenus, et est donc plus informatif que la moyenne associée à sa variance.

Les box plots représentent 99,3% de la distribution de la variable d'intérêt, entre les 2 tirets min et max. Les ronds ou points situés en dehors de la boîte et de ses "moustaches" représentent des valeurs extrêmes. La médiane (*i.e.*, la quantité telle que la moitié des valeurs étudiées sont inférieures à cette quantité et l'autre moitié supérieure) est identifiée par le trait en gras à l'intérieur du rectangle (Figure 7-14). La boîte rectangle représente 50% de la population, entre le premier et le troisième quartile. Ainsi, la quantité située entre la médiane et l'une des extrémités de la boîte correspond à 25% de la population. Les traits en pointillés qui prolongent la boîte en haut et en bas représentent donc un peu plus de 49,7% de la population, et les valeurs extrêmes, en dehors du box plot, figurées ici par des ronds, représentent moins de 0,7% des cas.

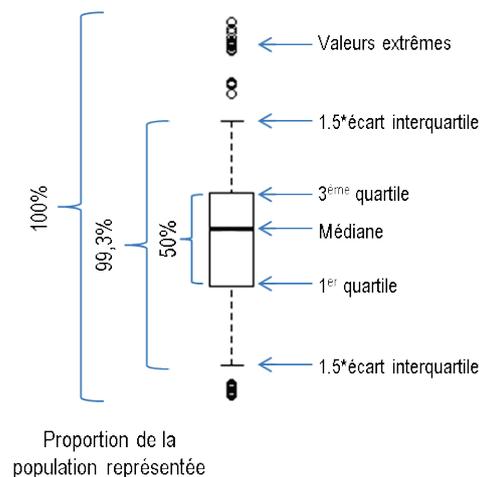


Figure 7-14. Répartition des valeurs dans une représentation en box plot

Cette représentation permet ainsi de visualiser la distribution et donc la variabilité de réponse de la variable, pour un ensemble de conditions données. Elle présente l'avantage de montrer la tendance centrale, mais aussi la variabilité et les dissymétries des valeurs extrêmes, en fonction des modalités étudiées. En revanche, elle ne permet pas de faire un test statistique rigoureux de comparaison des tendances centrales. Des tests de comparaisons de moyennes de type Student ont été effectués afin d'obtenir ces informations complémentaires

de significativité des différences obtenues. Le résultat de ces analyses a été ajouté dans le texte, quand cela s'avérait utile.

### **Contrôle de la qualité des simulations et précautions d'usage**

La qualité prédictive et le domaine de validité des modèles utilisés ont été précisés avant la mise en œuvre des simulations proprement dites. Néanmoins, les simulations ne se substituent pas complètement à des données expérimentales, mais les complètent en précisant les ordres de grandeur et les sens de variation de l'effet des CIPAN avec une précision de l'ordre de 5 à 10% pour le bilan hydrique et de 15 à 20% pour le bilan en azote. Même si, par commodité de langage, les résultats des simulations sont présentés de façon affirmative, il faut garder à l'esprit que ces résultats correspondent à des estimations de la réalité, certes suffisamment précises et cohérentes pour être présentées dans ce rapport. Ces résultats numériques constituent des références nouvelles. La situation idéale aurait été de pouvoir confronter ces résultats de simulation à des situations réelles, ce qui nécessiterait un travail complémentaire extrêmement lourd mais utile.

## Références bibliographiques citées

- Askegaard M., Olesen J.E., Kristensen K. (2005). Nitrate leaching in organic arable crop rotations: Effects of location, manure and catch crop. *Soil Use and Management* 21: 181-188.
- Beaudoin N., Saad J.K., Van Laethem C., Machet J.M., Maucorps J., Mary B. (2005). Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture Ecosystem & Environment* 111: 292-310.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M-H., Ruguey F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R, Dürr C, 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 balances. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311-346.
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeau J., Nicoulaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M. H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E. (2002). STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22: 69-92.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussiere F., Cabidoche Y. M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillere J. P., Henault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18: 309-332.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N. (2008). Conceptual basis, formalisations and parameterisation of the STICS crop model. Editions QUAE, INRA, 78026 Versailles cedex.
- Constantin J., Mary B., Laurent F., Aubrion G., Fontaine A., Kerveillant P., Beaudoin N. (2010). Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture Ecosystem & Environment* 135: 268-278.
- Dorsainvil F. (2002). Evaluation par modélisation de l'impact environnemental des modes de conduite des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote dans les systèmes de culture. Thèse Docteur Ingénieur INAPG. 124 p.
- Dürr C., Aubertot J.N., Richard G., Dubrulle P., Duval Y., Boiffin J. (2001). SIMPLE: a model for SIMulation of PLant Emergence predicting the effects of soil tillage and sowing operations. *Soil Science Society of America Journal* 65: 414-423.
- Fauvel Y., Morvan T. (1998). Management of pig slurry for nitrogen fertilization of corn. In Ramiran 1998, 8th international conference on management strategies for organic waste use in agriculture, 26-29 may 1998, Rennes, Martinez J et Maudet MN. (Eds.), Cemagref Editions, 97-105.
- Ferchaud F., Ballu S., Leterme P. (2006). Pratiques agricoles, fuites de nitrates et qualité de l'eau dans les bassins versants : synthèse des références applicables au contexte breton. Programme Prolittoral. CEVA et Agrocampus Rennes. 126 p.
- Hansen E.M., Kristensen K., Djurhuus J. (2000). Yield parameters as affected by introduction or discontinuation of catch crop use. *Agronomy Journal* 92: 909-914.
- INRA, 1998 - Base de données Géographique des Sols de France à l'échelle du 1/1.000.000, version 1 du 21/12/1998. INRA, US 1106 Infosol, Orléans, France.
- Justes E., Mary B., Nicolardot B. (2009). Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant Soil* 325 : 171-185.
- Laurent F. (1999). Fertilisation azotée : points de repère en matière d'environnement. *Perspectives Agricoles*, 244: 85-87.
- Le Bas C., King D., Daroussin J., Arrouays D. (2005). Estimation des paramètres sols pour STICS à partir d'une base de données spatialisée sur les sols à petite échelle. Séminaire STICS, Carry-le-Rouet, 17-18 mars 2005.
- Marcuola F., Mignolet C., Schott C., Mari J.F. (2010). Organisation spatiale des successions culturales en France entre 1992 et 2009. Livrable du projet ANR-08-STRA-12 POPS - 39 pages.
- Nicolardot B., Recous S., Mary B. (2001). Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant Soil* 228: 83-103.
- Richer de Forges A., Feller C., Jamagne M., Arrouays D. (2008). Perdus dans le triangle des textures. *Etude et Gestion des Sols* : 15, 97-111.
- Thomsen I.K., Christensen B.T. (1999). Nitrogen conserving potential of successive ryegrass catch crops in continuous spring barley. *Soil Use Management* 15: 195-200.
- Wallach D., Buis S., Lecharpentier P., Bourges J., Clastre P., Launay M., Bergez J.-E., Guerif M., Soudais J., Justes E. (2011). A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. *Environmental Modelling & Software* 26: 386-394.
- Zhu Y., Fox R.H., Toth J.D. (2003). Tillage effects on nitrate leaching measured by pan and wick lysimeters. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1517-1523.