

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

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

# 11. Conclusions

**Auteur :**

**Eric Justes**

avec la participation de :

Nicolas Beaudoin, Patrick Bertuzzi, Raphaël Charles,  
Julie Constantin, Carolyne Dürr, Carole Hermon,  
Alexandre Joannon, Christine Le Bas, Bruno Mary,  
Catherine Mignolet, Françoise Montfort, Laurent  
Ruiz, Jean-Pierre Sarthou, Véronique Souchère,  
Julien Tournebize

Juin 2012

## Sommaire

11.1. Les enseignements génériques et spécifiques de l'étude par simulation .....	401
11.2. Discussion des résultats de l'étude .....	408
11.2.1. Quel domaine de validité des successions types simulées ? .....	408
11.2.2. Les CIPAN peuvent-elles corriger des situations d'excédent d'azote minéral à la récolte ? .....	409
11.2.3. Une approche pour définir des dates "optimales" de levée et de destruction des CIPAN par analyse multicritère des résultats de simulation .....	410
11.2.4. Cultures intermédiaires : quels autres services écosystémiques rendus ? .....	412
11.2.5. Quelle adaptation locale des CIPAN pour une insertion la plus large possible dans les systèmes de culture actuels ? .....	414
11.3. Conclusions et perspectives .....	415

Relecteur externe du chapitre : Jean Boiffin.

## 11.1. Les enseignements génériques et spécifiques de l'étude par simulation

Ce chapitre regroupe les conclusions ou éléments de synthèse qui, d'une part, s'appliquent à un grand nombre de situations agro-pédoclimatiques et ont donc une certaine généralité, et d'autre part, concernent des situations plus spécifiques d'insertion des CIPAN dans les systèmes de culture ou des conduites particulières. Douze enseignements principaux peuvent être tirés de cette étude par simulation.

### 1. L'implantation de la CIPAN peut s'opérer avec succès dans une large gamme de situations, à condition d'adapter la date de semis en fonction de la situation pédoclimatique

L'étude par simulation de l'implantation des CIPAN a été réalisée séquentiellement, en utilisant le modèle STICS pour prédire la teneur en eau du sol dans le lit de semences sur la base du climat "actuel", puis le modèle SIMPLE pour prédire la levée (date et taux). D'une manière générale, les résultats des simulations indiquent que la levée des CIPAN est potentiellement suffisante pour avoir une implantation correcte en conditions estivales actuelles (taux de levée > 75%), en cas de techniques très simplifiées d'implantation (sous mulch de paille) comme dans un lit de semences après travail du sol.

Les cas de mauvaise levée (taux de levée < 50% des graines) ont lieu sous les différents climats mais avec une fréquence moyenne assez faible, de l'ordre : de moins d'une année sur dix pour les sites septentrionaux français, et de deux années sur dix pour le climat du Sud-Ouest. Dans ce dernier cas, les semis du 15 août et du 15 septembre permettent de réduire les risques de non-levée par rapport au semis précoce du 15 juillet. En climat méditerranéen, la levée présente une forte variabilité interannuelle avec des levées faibles (taux < 25%) environ deux années sur dix, voire quasi nulles (taux de levée < 10%) dans 2% des simulations, et ce, quelle que soit la technique de semis (avec ou sans travail du sol). Ces échecs se produisent particulièrement en semis précoce (semis du 15 juillet) ; cette date est donc globalement inadaptée en climat "sec" au Sud de la France, où des semis tardifs sont plus efficaces (semis du 15 septembre).

D'un point de vue pratique, au-delà de la nécessité d'adapter la technique d'implantation (ce qui relève notamment du machinisme agricole) en fonction du précédent cultural et des états physiques et hydriques du sol, il serait envisageable de s'appuyer sur les prévisions météorologiques à 10 jours (qui deviennent de plus en plus fiables) pour adapter la date et le mode de semis (type d'outil et profondeur de semis) aux conditions d'humidité de l'horizon superficiel du sol, afin de maximiser les chances de succès de l'implantation de la CIPAN.

Il est important de rappeler que les modèles utilisés pour l'étude par simulation ne tiennent pas compte des pertes éventuelles dues à des facteurs biotiques comme les bioagresseurs (maladies fongiques, dégâts d'oiseaux ou de mollusques). Or des pertes ponctuellement importantes peuvent se produire en cas de forte attaque de ravageurs ou de pathogènes (d'autant que les semences de CIPAN ne sont généralement pas traitées). Il resterait donc à évaluer en conditions réelles, et pour une large gamme de situations en parcelles d'agriculteurs, les pertes de levée dues aux bioagresseurs, car peu de références existent.

### 2. Les CIPAN réduisent le drainage mais n'ont pas d'impact sur l'alimentation hydrique de la culture suivante si la date de destruction est adaptée

Le drainage (transfert d'eau au-delà du sol) est le moteur de la recharge en eau des nappes phréatiques et de la lixiviation (entraînement des solutés comme le nitrate par transfert vertical) et donc des pertes d'azote nitrique sous l'horizon d'enracinement des cultures principales.

Les CIPAN induisent quasi systématiquement une réduction du drainage annuel (quantité d'eau transférée vers le sous-sol). Cette réduction varie en médiane de 20 à 50 mm, selon les pédoclimats et le niveau de croissance du couvert. Elle correspond à une consommation supplémentaire d'eau par rapport à un sol nu, de 5 à 15 mm par tonne de biomasse de CIPAN, variable selon l'évapotranspiration potentielle journalière et la répartition de la pluviométrie. Cette transpiration du couvert est supérieure à la réduction de l'évaporation du sol due aux plantes. Au final, les CIPAN induisent un supplément d'évapotranspiration réelle médian de 20 à 50 mm, qui correspond au niveau de réduction du drainage.

Pour les dates de destruction de début octobre à début mars, cette réduction du drainage ne s'accompagne généralement pas d'une réduction du stock d'eau du sol en fin d'automne ou au début du printemps (mi-avril) car la pluviométrie hivernale couvre largement l'évapotranspiration du couvert et permet de reconstituer, sous tous les pédoclimats simulés, la réserve en eau du sol entre la destruction de la CIPAN et le semis de la culture principale suivante. Le niveau de réserve en eau étant peu ou pas affecté, il n'apparaît généralement pas d'impact négatif sur la culture suivante du fait de cette consommation d'eau supplémentaire de la CIPAN. Toutefois si la date de destruction de la CIPAN devait être très tardive (fin mars à mi-avril) ou en cas de très faibles précipitations hivernales, il est probable que la recharge en eau du profil ne se produirait pas, car la reprise de croissance de la CIPAN au printemps induirait alors une forte évapotranspiration qui pourrait être supérieure à la pluviométrie et donc ne pas permettre la recharge en eau du profil de sol pour la culture suivante.

Cette réduction du drainage représente en général moins de 10% de l'eau drainée pour la grande majorité des sites pédoclimatiques, mais elle peut représenter jusqu'à 25% certaines années pour les sites à pluviométrie faible en hiver. En conséquence, si leur usage est généralisé sur un territoire donné, les CIPAN peuvent potentiellement réduire la recharge des nappes dans les situations hydrogéologiques où le drainage sous cultures détermine le volume de cette recharge. Dans ce cas, une évaluation de l'impact qu'aurait la généralisation locale des CIPAN sur la recharge des nappes est nécessaire afin d'analyser le bénéfice de réduction attendue sur la concentration nitrique en regard du coût ou du risque sur la recharge.

### **3. Les CIPAN sont efficaces pour réduire la teneur en nitrate de l'eau de drainage, sauf pour les cas d'interculture longue à récolte tardive**

Pour qualifier le niveau d'efficacité des cultures intermédiaires sur la base du taux d'abattement de la concentration en nitrate de l'eau de drainage par rapport à une situation sous "sol nu", les seuils suivants ont été retenus : 1) taux d'abattement > 25% : les cultures intermédiaires sont utiles, 2) taux > 50% : elles sont efficaces, 3) taux > 75% : elles sont très efficaces. Cette évaluation peut être complétée par un critère d'atteinte, ou non, d'un niveau de concentration inférieur au seuil de potabilité de 50 mgNO<sub>3</sub>/l. Toutefois, comme la teneur en nitrate de l'eau de drainage dépend de la quantité d'azote minéral du sol initial (à la récolte du précédent cultural), les CIPAN peuvent être efficaces, voire très efficaces, sans toujours garantir le respect de la potabilité pour l'eau drainée ; en d'autres termes, les CIPAN ne permettent pas d'annuler l'impact polluant d'un excès d'azote minéral du sol et donc n'exonèrent pas le praticien de mettre en œuvre une gestion stricte et adaptée de la fertilisation azotée des cultures.

Globalement, si la levée est correcte et le couvert suffisamment dense et homogène spatialement, l'efficacité des CIPAN non-légumineuses est incontestable pour réduire la lixiviation (quantité d'azote nitrique perdu) et la concentration nitrique de l'eau de drainage, aussi bien en situation d'interculture courte (succession de type colza-blé) qu'en interculture longue (succession de type blé-maïs) ; cette conclusion n'est en revanche pas valable pour les intercultures longues à récolte tardive (succession de type maïs-maïs, cf. point 5 ci-après).

Ainsi, l'étude indique une efficacité des CIPAN non-légumineuses pour l'ensemble des sites climatiques français testés : le taux d'abattement de la concentration nitrique de l'eau de drainage est généralement supérieur à 50% (et peut dépasser 75% dans un grand nombre de situations pluvieuses) pour les dates optimales de levée et de destruction, qui peuvent différer selon le pédoclimat. Cette conclusion vaut même si la croissance ou le niveau de nutrition hydrique et azotée de la CIPAN ne sont pas optimaux, puisque les niveaux de biomasse produite et d'azote absorbé dépendent de la disponibilité en eau et azote minéral durant l'interculture.

Si à l'échelle pluriannuelle les CIPAN sont toujours utiles et, dans une très grande majorité des situations, sont efficaces pour réduire les pertes d'azote nitrique, même dans les sites pédoclimatiques où le drainage est faible en valeur médiane, il est évident que si aucun drainage ne se produit une année donnée (y compris sous "sol nu"), la CIPAN n'aura pas été utile. Il est donc nécessaire d'analyser l'impact des CIPAN à l'échelle de plusieurs années pour évaluer leur efficacité ; cette évaluation a été réalisée en prenant en compte le climat de chaque site sur les 20 dernières années.

Plus spécifiquement, il est possible de formuler les conclusions suivantes :

- Le niveau d'efficacité pour réduire la quantité de nitrate lixiviée, et en conséquence la concentration nitrique de l'eau de drainage, dépend du climat : plus le site est pluvieux, plus les CIPAN sont efficaces pour piéger

de l'azote minéral et ainsi réduire la quantité d'azote nitrrique transférée vers le sous-sol, alors que la réduction du volume de drainage est faible.

- L'efficacité des CIPAN est renforcée en situation d'interculture longue car la durée de croissance des couverts peut être supérieure, ce qui permet de maximiser le piégeage de l'azote. En interculture longue, le taux médian d'abattement de la concentration nitrrique de l'eau de drainage est le plus faible (de l'ordre de 50%) en sites climatiques à faible drainage (zone méditerranéenne ou sites du centre de la France) qui constituent les situations les moins favorables en termes d'efficacité des CIPAN. Ce taux médian peut s'élever jusqu'à 90% pour les sites les plus pluvieux (sites océaniques, du Sud-Ouest au Nord-Ouest).
- L'efficacité des CIPAN, simulée aussi bien en situation d'interculture courte que longue, pour réduire la concentration nitrrique de l'eau de drainage est avérée pour les trois niveaux d'azote minéral initial, donc même lorsque le reliquat d'azote minéral initial est faible (état initial N1 de la simulation correspondant au reliquat "incompressible" de 20 kgN/ha sur 90 cm de profondeur). Ce résultat s'explique par le fait que les sols minéralisent les matières organiques humifiées et produisent "naturellement" de l'azote minéral durant l'été et l'automne, ce qui accroît le niveau d'azote minéral du sol entre la récolte du précédent et le début de la période de drainage. En absorbant de l'azote durant l'automne, les CIPAN permettent de réduire le reliquat d'azote minéral au début de la période de drainage (en novembre), et donc *in fine* la concentration nitrrique de l'eau de drainage.
- L'efficacité des CIPAN est renforcée en sol superficiel et à texture grossière (sols sableux ou limono-sableux), car plus la réserve en eau et la profondeur du sol sont faibles, plus le début du drainage est précoce à l'automne. Ainsi, le volume de drainage et la lixiviation de nitrate seront d'autant plus élevés que la quantité d'eau stockée dans le sol sera faible, et son taux de renouvellement élevé ; ceci explique pourquoi en sols sableux la sensibilité à la lixiviation est plus élevée. Les CIPAN développées précocement pourront piéger rapidement l'azote minéral du sol et auront une forte efficacité pour réduire la lixiviation.
- Le niveau d'efficacité dépend plus de l'optimisation de la date de levée (et donc de la date de semis) que de la date de destruction, sauf si la durée de croissance post-levée est très faible (inférieure à 2 mois de croissance). Ainsi, mis à part le cas des légumineuses (cf. point 6), une CIPAN dont la croissance aura été d'au moins 2 mois peut être très efficace pour réduire les fuites de nitrate, dans le cas d'une levée de fin juillet à début septembre selon le site climatique considéré. L'efficacité des CIPAN en interculture courte tient à leur capacité d'absorber de l'azote durant les mois de septembre et d'octobre durant lesquels la minéralisation du sol est élevée (sols chauds et suffisamment humides).

#### **4. Les légumineuses peuvent être utiles pour réduire les fuites de nitrate même si leur efficacité est environ moitié moindre que celle des espèces non légumineuses (crucifères et graminées)**

Globalement, les simulations indiquent que la moutarde (crucifère) et le ray-grass d'Italie (graminée) présentent des niveaux d'efficacité comparables pour réduire la lixiviation et la concentration nitrrique de l'eau de drainage, pour des dates de levée identiques. Toutefois, dans certaines conditions, la moutarde est plus efficace que le ray-grass pour piéger l'azote. Cette meilleure efficacité s'exprime notamment lorsque la durée de croissance est réduite (interculture courte ou semis tardif en septembre) ou que le sol est profond (> 90 cm et avec réserve utile élevée) ; dans ces situations, en raison de leur développement plus rapide et leur meilleure capacité d'enracinement en profondeur, les crucifères présentent la meilleure efficacité de réduction des fuites de nitrate.

Les simulations indiquent que la vesce présente une efficacité médiane environ deux fois plus faible que celles de la moutarde et du ray-grass, pour réduire la lixiviation et la concentration nitrrique de l'eau de drainage. L'azote qu'elle acquiert provenant en majeure partie de la fixation symbiotique, la légumineuse n'absorbe qu'une partie de l'azote minéral disponible dans le sol, contrairement aux espèces non-légumineuses comme la moutarde ou le ray-grass. Ce résultat confirme que les légumineuses ne sont pas les plus efficaces pour réduire la concentration nitrrique, mais il démontre toutefois qu'elles sont utiles puisqu'elles permettent de réduire la concentration nitrrique avec une efficacité comparable à celle des repousses de blé hétérogènes, en ayant toutefois un impact aussi fort sur le drainage que les CIPAN non-légumineuses. Mieux vaut donc planter un couvert de vesce (ou de légumineuse) en interculture plutôt que de laisser le sol nu sans couvert intermédiaire vis-à-vis de la lixiviation d'azote nitrrique.

Une solution pourrait être de semer un mélange d'espèces comportant une légumineuse, ou seulement une légumineuse qui se développerait en mélange avec les repousses, pour éviter le phénomène de compétition préemptive, notamment vis-à-vis de l'azote.

#### **5. Les CIPAN sont inefficaces après maïs grain et leur efficacité est relative après maïs fourrage : cela impose une gestion très stricte de la fertilisation azotée pour éviter des pertes de nitrate**

Après maïs fourrage, les CIPAN sont toujours utiles pour diminuer la lixiviation et donc la concentration en nitrate de l'eau de drainage, avec une réduction médiane de 35% pour la moutarde, et de 25% seulement pour le ray-grass d'Italie. Dans les situations simulées de la moitié Sud de la France, cet abattement de concentration est proche de 50% (seuil retenu pour qualifier l'efficacité de la CIPAN), car la croissance des CIPAN peut être significative pour des semis de mi à fin septembre (levée simulée au 25 septembre), et l'exportation des cannes de maïs permet un semis dans de meilleures conditions et un total accès à la lumière des plantes.

*A contrario*, l'étude indique qu'après maïs grain récolté mi-octobre (et donc *a fortiori* si la récolte est plus tardive), les CIPAN sont généralement insuffisamment efficaces et peu utiles pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage (taux d'abattement médian de la concentration nitrique < 10%), car leur croissance est trop faible à l'automne, du fait de la date de semis tardive (levée simulée dans l'étude au 25 octobre). On notera toutefois dans le cas du site méditerranéen (site 6) que la moutarde permet de réduire significativement la concentration en nitrate de l'eau de drainage, de 30% en médiane.

Ce résultat met en évidence que, dans le cas d'une succession maïs-maïs (ou culture de printemps), et en particulier maïs grain, il est indispensable de mettre en œuvre une gestion très stricte de la fertilisation azotée pour que le reliquat d'azote minéral à la récolte du maïs corresponde au reliquat "minimal incompressible". Ce n'est qu'à cette condition que la concentration nitrique sera faible et que les CIPAN ne seront pas utiles et nécessaires pour restituer de l'eau de drainage à moins de 50 mgNO<sub>3</sub>/l.

Deux autres solutions pourraient être évaluées pour réduire les pertes d'azote nitrique après maïs grain :

- 1) semer des variétés de maïs moins tardives permettant une récolte plus précoce (mi à fin septembre), ce qui permettrait de semer une CIPAN suffisamment tôt pour qu'elle se développe et soit efficace ;
- 2) semer une CIPAN sous couvert de maïs. Toutefois, cette technique reste à "optimiser" car, d'une part, il n'est pas garanti que la CIPAN se développe suffisamment sous le maïs, et d'autre part, elle risque d'être peu efficace si les cannes de maïs sont "mulchées" en surface, réduisant fortement l'accès à la lumière du couvert. Cette technique de semis sous couvert n'a pas été évaluée dans l'étude par simulation par manque de références et de paramétrage spécifique du modèle STICS pour ce type d'itinéraire technique. Des travaux spécifiques d'expérimentation et de modélisation seraient nécessaires pour mieux appréhender cette question.

#### **6. Le mulch de cannes de maïs broyées laissées en surface ne réduit pas les fuites de nitrate après maïs grain : l'enfouissement est préférable bien que son efficacité soit très modeste**

Les CIPAN n'étant pas efficaces pour réduire la lixiviation après maïs grain (récolte tardive), se pose comme alternative la gestion des résidus (canes) de maïs pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage. Or les simulations indiquent qu'un mulch de résidus (canes de maïs) laissés à la surface du sol est sans effet sur la lixiviation, alors que l'enfouissement des résidus entraîne une organisation nette d'azote du sol qui induit une légère réduction de la lixiviation. La concentration nitrique est alors réduite de l'ordre de seulement 5 à 10%.

En conséquence, dans un objectif de réduction des fuites de nitrate, il est préférable d'incorporer les cannes de maïs grain broyées, juste après la récolte, plutôt que de les laisser en mulch à la surface du sol, même si l'effet de réduction de la concentration nitrique est modeste. *A contrario*, le mulchage est favorable au stockage de carbone dans le sol, car la décomposition des résidus est moins rapide et l'humification plus élevée.

## **7. Les repousses de colza et de blé sont efficaces pour réduire la concentration en nitrate de l'eau de drainage, à condition que le couvert soit dense et homogène spatialement**

Les résultats de l'étude indiquent que les repousses sont efficaces pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage, à condition que l'implantation du couvert soit suffisamment dense et homogène spatialement. Sous cette condition de couverture du sol, les repousses de colza s'avèrent quasiment aussi efficaces qu'une CIPAN de moutarde, et les repousses de blé qu'une CIPAN de ray-grass d'Italie.

Cette conclusion confirme les résultats d'essais sur les repousses de colza sous divers pédoclimats français. Les simulations montrent que les repousses de blé sont également efficaces pour réduire la lixiviation si elles sont spatialement bien distribuées avec un taux de couverture élevé. Ces résultats indiquent que les céréales qui lèveraient assez tôt (début août, ayant une faible dormance) ont des capacités suffisantes de croissance et d'absorption d'azote pour piéger les ions nitrate avant la période de drainage. Par contre, lorsque la répartition spatiale est hétérogène (en "bandes" de couvert, sous le passage de la moissonneuse-batteuse, alternant avec du sol nu), les repousses sont en moyenne deux fois moins efficaces pour réduire la concentration nitrique que si elles sont homogènes. Dans le cas de repousses peu denses et hétérogènes spatialement, ce couvert intermédiaire serait certes utile, mais incomplètement efficace pour réduire les fuites de nitrate.

Le taux de couverture du sol, dont dépend l'efficacité des repousses, est déterminé par la répartition spatiale des pertes de grains à la récolte ; cette distribution est fonction du type de moissonneuse-batteuse utilisé et du fait que celle-ci soit équipée d'un broyeur-éparpilleur de paille permettant une répartition des grains sur toute la largeur de la barre de coupe. La technique mise en œuvre pour favoriser la levée des repousses devra donc être adaptée pour obtenir un couvert suffisamment dense et homogène spatialement.

Le déchaumage après la récolte du colza, et plus généralement la pratique de faux semis, sont des techniques souvent efficaces pour faire germer les graines tombées au sol et ensuite détruire les plantes levées, ce qui permet d'éviter que le colza ne devienne une adventice dans la culture suivante. Dans ce cas, la fonction de couvert "piège à nitrate" risque d'être réduite si les repousses sont détruites trop précocement après la levée, ou si une seconde vague de levée de colza ne se produit pas après un premier faux semis. L'efficacité des repousses de colza, comme celles de blé, pour réduire les fuites de nitrate n'est donc pas garantie si le couvert n'est pas maintenu en place durant au moins deux mois de croissance.

## **8. Les jours potentiellement disponibles pour la destruction des couverts intermédiaires à l'automne ne sont pas un facteur limitant pour réaliser l'intervention, sauf en sol argileux (> 37% d'argile)**

Les jours potentiellement disponibles pour détruire mécaniquement la CIPAN (ou les repousses) à l'automne ont été calculés à partir de l'humidité journalière de l'horizon superficiel du sol (0-30 cm) simulée avec le modèle STICS du 10 septembre au 10 décembre, de la pression exercée par l'engin pour l'intervention, et d'un seuil de teneur en eau au-dessous duquel les risques de compactage et de tassement du sol sont évités.

Le nombre de jours disponibles est potentiellement élevé en sols sableux ou limoneux et ne constitue donc pas un facteur limitant pour la destruction mécanique des CIPAN à l'automne (mois de novembre et décembre). Par contre, le nombre de jours potentiellement disponibles en situation de sol argileux (> 37% d'argile) peut être faible (< 35% de jours disponibles par décennie en novembre et décembre) et ce, d'autant plus que la date de destruction se rapproche du mois de décembre. Ainsi, en sol argileux, il est préférable de détruire le couvert tôt (fin octobre) pour pouvoir travailler le sol en conditions correctes (portance suffisante pour intervenir) et éviter le compactage ou le tassement et un lit de semences "motteux" pour la culture suivante. Il convient de souligner qu'une telle destruction précoce (mi à fin octobre) n'est pas rétrograde pour réduire de façon significative la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage (cf. point 10 ci-dessous).

On notera que l'étude n'a pas considéré les sols classés en "argile lourde" (> 45% d'argile) en raison de leur comportement particulier qui varie selon le type d'argile minéralogique, et est difficile à prendre en compte dans la modélisation car ils présentent des caractéristiques particulières de comportement physique (fissuration, forte plasticité...) que les modèles fonctionnels actuels ne prennent en compte qu'imparfaitement. En particulier, pour ce type de sols très argileux, la faisabilité des interventions de travail du sol est très sensible aux conditions hydriques. Ces sols très argileux sont cependant peu représentés en systèmes de grande culture français, mais ils peuvent poser localement et ponctuellement de réelles difficultés.

**9. L'impact des CIPAN de crucifères et de graminées sur le rendement de la culture suivante est légèrement positif ou nul, sauf parfois en situation d'interculture courte où il peut être négatif ; l'impact est toujours positif pour la vesce**

Les simulations indiquent des effets globalement positifs des CIPAN sur le rendement du maïs suivant, après blé (interculture longue) et après maïs fourrage (interculture longue récolte semi-tardive). Cette augmentation du rendement est cependant modérée (en médiane de 1 à 8% selon les sites climatiques). De plus, quasiment 75% de la population des simulations ont un différentiel positif de rendement par rapport au "sol nu", indiquant un effet globalement positif des couverts pour accroître la disponibilité en azote pour la culture de maïs suivante. Ces simulations ne décrivent pas l'effet azote des CIPAN à long terme (voir section 2.2.3.).

Toutefois cet effet sur le rendement du maïs suivant est quasi nul en situation de monoculture de maïs grain correspondant à une récolte tardive de la culture précédente, en raison des faibles quantités d'azote absorbées par les CIPAN, levées fin octobre.

*A contrario*, les simulations indiquent des effets très variables en situation d'interculture courte après colza, avec des cas de rendements du blé inférieurs après CIPAN, dans les sites les moins pluvieux. Plus précisément, les valeurs médianes des effets simulés sont très souvent négatives lorsque le reliquat initial d'azote est faible (reliquat minimum incompressible de 20 kgN/ha sur 90 cm) pour les espèces autres que légumineuses (moutarde, ray-grass et repousses de colza). L'effet négatif est potentiellement plus fort avec le ray-grass (médiane de -5%, pouvant aller jusqu'à des valeurs de -25%). Ces effets dépressifs simulés sont d'autant moins importants que l'azote minéral initial du sol est élevé et que le site est pluvieux.

Enfin, la vesce induit un effet positif quasi-systématique et très significatif en médiane, contrairement à la moutarde et au ray-grass. Ces résultats indiquent qu'en situation d'interculture courte, le phénomène de compétition préemptive pour l'azote (diminution de la disponibilité en azote) se produit dans de nombreux pédoclimats, et est particulièrement préjudiciable quand l'état initial est pauvre en azote minéral (notamment état initial N1). Dans ces conditions, la vesce qui "fait entrer" de l'azote exogène par fixation symbiotique, permet de réduire fortement ce phénomène négatif et même d'obtenir un effet positif dans environ 75% des cas simulés.

Pour réduire les effets négatifs sur la culture suivante en interculture courte, dus à la compétition par préemption d'azote, une solution pourrait être de semer un mélange d'espèces comportant une légumineuse, voire une légumineuse pure en cas de faible reliquat initial d'azote (état initial N1 "incompressible"), afin de bénéficier de l'azote acquis par fixation symbiotique et de diminuer le ratio C/N des résidus de CIPAN pour favoriser la restitution d'azote à la culture suivante.

**10. En sols argileux nécessitant un travail du sol à l'automne, les CIPAN sont toujours utiles et généralement efficaces pour réduire les fuites de nitrate même si elles sont détruites précocement**

La question de l'efficacité des CIPAN se pose en situation de destruction précoce à l'automne ; dans l'étude, les dates de destruction des 1<sup>er</sup> et 20 octobre ont été considérées comme précoces. Ces situations peuvent correspondre soit à des périodes d'interculture courte, soit à des situations pédoclimatiques où le sol doit être travaillé tôt avant sa ré-humectation complète, afin que le travail soit réalisé dans de bonnes conditions, comme cela est recommandé pour les sols argileux (taux d'argile > 37%).

Les simulations indiquent que les CIPAN sont généralement efficaces pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage, bien que leur efficacité ne soit pas maximale, à condition que la levée du couvert se produise avant la fin du mois d'août (levée simulée au 25 août) : en d'autres termes, les CIPAN sont donc toujours utiles et même généralement efficaces en situation d'interculture courte ou lorsqu'elles doivent être détruites tôt (mi à fin octobre). Ainsi, il vaut toujours mieux implanter une CIPAN, même détruite précocement à l'automne, que ne pas implanter de couvert, s'il est nécessaire de réduire les fuites de nitrate (cas des "zones vulnérables nitrate").

En effet, l'efficacité des couverts intermédiaires (repousses ou CIPAN) pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage peut être d'un bon niveau (taux d'abattement toujours > 25% et très souvent > 50%), même si l'effet de piégeage d'azote nitrique n'est pas maximum. Ce résultat s'explique par la capacité des CIPAN, et notamment les crucifères, à absorber rapidement l'azote minéral du sol, et plaide pour l'installation d'un couvert intermédiaire chaque fois que possible en interculture, même en situation de sol argileux (37 à 45% d'argile), et *a fortiori* en sol à moindre teneur en argile.

## **11. En climat méditerranéen, des problèmes de levée peuvent se produire, mais ils ne remettent pas en cause l'intérêt des CIPAN pour réduire les fuites de nitrate les années "drainantes"**

En climat méditerranéen, les CIPAN peuvent subir de forts stress hydriques qui vont limiter la germination ou produire un effet létal sur les plantules, et donc annihiler la levée de la CIPAN. Il est aussi possible que les hautes températures qui se produisent sous ce climat empêchent la germination (> 38°C dans le lit de semences). De plus, même une fois correctement levées, les plantes peuvent subir de forts stress hydriques limitant leur croissance les années très peu pluvieuses à l'automne.

Malgré ces problèmes de développement liés au déficit hydrique certaines années, les simulations indiquent que les CIPAN sont utiles et même généralement efficaces pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage à l'échelle de 20 années de simulation en climat méditerranéen, si la date de levée est optimale comme l'indiquent les simulations pour une levée au 10 septembre. En effet, un semis "tardif" (début septembre) permet d'"éviter" les forts stress hydriques. De plus, contrairement aux dates de levée précoces (juillet et début août) qui augmentent le risque de forts stress hydriques, ce qui affecte fortement la capacité d'absorption d'azote des CIPAN, les dates de levée au mois de septembre ne sont pas réhivitoires, et sont au contraire préférables, pour l'efficacité des CIPAN (réduction > 50% de la concentration en nitrate les années humides).

Ainsi, c'est sous ce climat méditerranéen que les CIPAN présentent la plus forte efficacité de tous les sites, lorsque sont simulées des dates de levée très tardives, et notamment après maïs grain (levée du 25 octobre). Cela s'explique par des températures et un niveau de rayonnement nettement plus élevés en automne et hiver que dans les autres sites climatiques, permettant une croissance significative des plantes durant l'automne et même l'hiver, et donc une efficacité accrue des CIPAN, pour réduire les fuites de nitrate notamment les années pluvieuses lorsque le drainage a lieu.

Permettant d'éviter les forts stress hydriques de fin d'été, le semis en début septembre accroît les chances de réussite de l'implantation des couverts de CIPAN et leur capacité ultérieure d'absorption d'azote minéral du sol. Par ailleurs, pour éviter des effets négatifs sur la culture principale suivante, les simulations indiquent qu'il est souhaitable de détruire le couvert avant le 20 décembre pour limiter l'effet de compétition par préemption d'eau et d'azote. Cette destruction précoce est un moyen de limiter la consommation d'eau des CIPAN, donc la réduction du drainage et *in fine* l'impact sur la recharge en eau des nappes.

Malgré des années sans aucun drainage sous ce type de climat, l'implantation de CIPAN préventive systématique chaque année, en particulier en situation d'interculture longue, apparaît donc comme l'option à privilégier pour réduire la pollution nitrique à l'échelle de la décennie. Les prévisions météorologiques à long terme n'étant pas encore suffisamment fiables actuellement, il convient d'assumer le fait que les CIPAN pourront s'avérer inutiles les années où le drainage est nul ou très faible (environ une année sur deux), sachant qu'elles présentent une forte efficacité (taux d'abattement de la concentration nitrique de l'eau de drainage > 75%) les années humides (drainage > 100 mm).

## **12. L'épandage d'effluents d'élevage au semis des cultures intermédiaires est compatible avec la réduction des fuites de nitrate, à condition de respecter impérativement certaines règles**

L'apport de lisier (exemple du lisier de porc dans les simulations) accroît fortement les concentrations nitriques en situation de "sol nu". Il est important de ne jamais épandre de lisier en été et en automne en l'absence de couvert végétal, donc même en situation de pailles enfouies (qui induit de l'organisation nette d'azote minéral), sous peine d'accroître fortement la lixiviation et la concentration nitrique des eaux de drainage.

Le choix de simuler un apport de lisier de porc correspond à la situation d'apport d'effluent la plus risquée en terme d'accroissement des fuites de nitrate dû à des apports de produits résiduels organiques (PRO). Cet effluent d'élevage contient en effet de l'azote en majorité minéral (environ 75% sous forme d'ammonium), immédiatement disponible pour les plantes mais aussi la lixiviation. De plus, la minéralisation de son azote organique est relativement rapide, renforçant les risques de lixiviation pour des apports en été et à l'automne.

Les CIPAN non-légumineuses sont efficaces pour prélever et recycler l'azote du lisier et permettent de réduire la lixiviation d'azote par rapport au "sol nu" sans apport de lisier, dans une majorité de cas, mais uniquement si la quantité d'azote minéral dans le sol est faible avant l'apport et que l'apport d'effluent n'est pas trop important (75 kgN/ha). La moutarde (crucifère), dont les vitesses de croissance et d'absorption d'azote sont plus rapides, est

plus efficace que le ray-grass d'Italie (graminée) pour réduire la lixiviation et la concentration en nitrate de l'eau de drainage en cas d'apport de lisier.

Bien que les CIPAN permettent de réduire la lixiviation et la concentration nitrique par rapport au "sol nu", elles ne permettent pas de restituer systématiquement une eau de drainage inférieure à 50 mgNO<sub>3</sub>/l avec apport de lisier, notamment lorsque l'état initial du reliquat d'azote minéral à la récolte du blé est supérieur au reliquat minimum (état initial N1 à 20 kgN/ha sur 90 cm).

En conséquence, pour éviter d'accroître les pertes d'azote et la concentration nitrique de l'eau de drainage, l'apport de lisier combiné à l'implantation des CIPAN peut être réalisé sous 4 conditions à respecter impérativement :

- 1) s'assurer que le reliquat d'azote minéral à la récolte est faible (de l'ordre à 20 kgN/ha sur 90 cm, et impérativement et significativement inférieur à 60 kgN/ha avec peu d'azote minéral en profondeur) ;
- 2) semer une espèce à croissance très rapide comme les crucifères (exemple de la moutarde blanche) ;
- 3) mettre tout en œuvre techniquement (date et mode *ad hoc* de semis) pour maximiser les chances de succès de la levée de la CIPAN, c'est-à-dire l'obtention d'un fort taux de levée et d'une répartition spatiale correcte des plantes, et la non-exposition à de forts stress hydriques au début de la phase d'installation. Sans cela, il est préférable de n'épandre le lisier qu'après la levée, afin de vérifier que le couvert est correctement installé et pourra être efficace pour absorber l'azote minéral ;
- 4) limiter la dose d'effluent, de sorte que l'apport d'azote total ne dépasse pas 75 kgN/ha.

## 11.2. Discussion des résultats de l'étude

### 11.2.1. Quel domaine de validité des successions types simulées ?

#### Une cohérence globale des simulations avec la bibliographie

L'ensemble des enseignements de cette étude par simulation apparaît comme globalement cohérent avec les résultats de l'analyse bibliographique sur les différents domaines où les deux approches se recoupent, à savoir : i) l'ordre de grandeur de l'azote acquis par les CIPAN, ii) les effets des CIPAN sur le bilan hydrique et le drainage, iii) l'efficacité des CIPAN et des repousses pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage, et à l'inverse iv) la faible efficacité de la gestion des résidus (notamment mulchés en surface), et enfin v) les facteurs expliquant l'effet de compétition des CIPAN par préemption d'eau et d'azote sur la culture principale suivante.

#### Quelles successions culturales peuvent être assimilées aux résultats simulés ?

La simulation de l'effet des CIPAN sur les bilans d'eau et d'azote a permis d'analyser la sensibilité de la réponse à la variabilité des conditions pédoclimatiques que rencontrent les systèmes de grande culture français et de quantifier leur efficacité en comparaison d'autres modes de gestion de l'interculture.

Les trois successions "types" choisies, d'une part, représentent une surface importante dans les systèmes de culture français, et, d'autre part, correspondent à la gamme des durées d'interculture pour lesquelles une CIPAN peut être implantée, à savoir : i) une succession colza-blé, à interculture courte, ii) une succession blé-maïs, à interculture longue, iii) une succession maïs-maïs, à interculture longue avec récolte tardive à l'automne.

Les simulations ont montré une forte sensibilité de l'efficacité des CIPAN pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage (taux d'abattement) à l'état initial d'azote minéral du sol et au pédoclimat, et en interaction avec la durée de la période d'interculture et donc le type de succession culturale. Ces facteurs déterminent la lixiviation (quantité d'azote nitrique perdu sous les racines) et la concentration en nitrate de l'eau de drainage.

Les résultats simulés pour les trois successions "types" pourront être transposés à d'autres successions non simulées, parfois sous certaines conditions. Ces propositions d'apparement sont détaillées dans le Tableau 11-1.

Interculture	Courte	Longue, récolte été	Longue, récolte automne précoce	Longue, récolte automne tardive
<b>Succession type simulée</b>	Colza – Blé	Blé – Maïs	Maïs fourrage - Maïs	Maïs grain - Maïs grain
<b>Autres successions apparentées</b>	Pois – Blé Fèverole – Blé Blé – autre céréale d'hiver ...	Blé - Orge de printemps Blé - Pois de printemps Blé - Betterave sucrière Blé - Pomme de terre Blé (tendre ou dur) – Tournesol Blé - Soja Blé - Sorgho Blé dur - Melon ...	Betterave sucrière (récolte précoce) - Pois de printemps Tournesol - Sorgho ...	Betterave sucrière (récolte tardive) -Pois de printemps Soja – Maïs Sorgho – Maïs ...
<b>Commentaire</b>	<i>Après légumineuse : le reliquat d'azote minéral à la récolte "incompressible" peut être plus élevé que le reliquat minimum (état initial N1 des simulations) et pourrait davantage correspondre à un état initial intermédiaire (état initial N2 des simulations)</i>	<i>Blé - Pois de printemps : les effets des cultures intermédiaires simulés sur le maïs ne peuvent représenter les effets potentiels sur la légumineuse (la fixation symbiotique pourra pallier le manque d'azote minéral éventuel = effet de préemption d'azote)</i>	<i>Nécessité d'avoir un état d'azote minéral à la récolte du précédent le plus faible possible (faibles quantités dans les horizons profonds du sol, horizons 60-90 ou &gt; 90 cm) → Objectif de la gestion de la fertilisation azotée : être très bien ajustée afin d'avoir un état initial proche de l'état N1 simulé (20 kgN/ha maximum sur 90 cm)</i>	

**Tableau 11-1.** Apparement d'autres successions culturales aux successions types simulées

On fait ainsi l'hypothèse que de nombreuses successions peuvent être apparentées aux successions simulées, en termes d'effet des CIPAN sur les bilans d'eau et d'azote et d'impact sur le rendement de la culture suivante, aussi bien en situation d'interculture courte que longue. Cette hypothèse est cohérente avec les résultats issus de l'analyse bibliographique.

*A contrario*, des successions à période d'interculture très courte ne peuvent être apparentées à l'interculture courte colza-blé, car la durée entre les deux cultures est généralement trop brève pour permettre un développement suffisant du couvert intermédiaire. Ces successions de cultures dans lesquelles une CIPAN ne peut raisonnablement être installée sont : i) blé-colza ou orge-colza, ii) maïs-blé d'hiver, iii) tournesol-blé, iv) sorgho-blé, v) soja-blé, vi) betterave-blé, vii) pomme de terre-blé.

### 11.2.2. Les CIPAN peuvent-elles corriger des situations d'excédent d'azote minéral à la récolte ?

Les CIPAN permettent sans ambiguïté de corriger des situations de reliquats à la récolte supérieurs au "minimum" incompressible lorsque leur niveau n'est pas trop élevé, comme c'est le cas de l'état initial N2 (correspondant à 60 kgN/ha sur 90 cm) en situation d'interculture courte et longue. Leur efficacité est cependant insuffisante en situation après maïs grain.

Toutefois, malgré leur forte capacité de piégeage d'azote nitrique, les couverts intermédiaires d'espèces non-légumineuses, et *a fortiori* les légumineuses, ne permettent pas de restituer systématiquement de l'eau de drainage à moins de 50 mgNO<sub>3</sub>/l en situation de profil initial avec un fort excès d'azote minéral, comme simulé dans le cas de l'état initial N3 (correspondant à 100 kgN/ha) - état ayant pour objet de simuler des cas de gestion incorrecte de la fertilisation azotée ou des cas d'apports trop importants de produits résiduels organiques facilement minéralisables ou chargés en azote minéral.

Il est donc nécessaire de réaffirmer que le premier levier de la maîtrise des fuites de nitrate est l'ajustement le plus strict possible de la fertilisation azotée des cultures principales. Cette maîtrise de la fertilisation azotée constitue aussi un préalable à l'efficacité des CIPAN, notamment dans un objectif de restituer une eau de

drainage faiblement concentrée en nitrate (et autant que possible inférieure à 50 mgNO<sub>3</sub>/l). Cela doit permettre d'éviter l'occurrence de reliquats d'azote minéral trop élevés à la récolte de la culture principale, et en particulier avec une répartition en "fond" de profil de sol, qui ne seraient pas "récupérables" par la CIPAN ou des repousses de la culture précédente.

### 11.2.3. Une approche pour définir des dates "optimales" de levée et de destruction des CIPAN par analyse multicritère des résultats de simulation

Ce travail de simulation montre tout l'intérêt de l'étude par simulation avec des modèles dynamiques qui prennent en compte les processus qui se produisent en interaction (ou compétition) et de façon dynamique ("*timely competition*"). Il souligne qu'il convient, en conséquence, de procéder à des ajustements de l'itinéraire technique en fonction du pédoclimat. Cette conclusion est en accord avec l'analyse des résultats expérimentaux disponibles dans la bibliographie. En effet, les résultats de l'étude par simulation, comme ceux de la bibliographie, montrent que l'impact des CIPAN sur le drainage, la lixiviation nitrrique, et la culture suivante dépend de nombreux paramètres liés à la CIPAN elle-même (quantité d'azote absorbé, ratio C/N). L'efficacité des CIPAN dépend donc concomitamment : i) de l'espèce (non légumineuses *versus* légumineuses), ii) de la date de semis (et donc de levée), iii) de la date de destruction et d'incorporation, mais aussi iv) du milieu, et donc du climat et du type de sol (texture et réserve hydrique).

Des itinéraires techniques "optimaux" peuvent alors être définis *a posteriori* à partir des résultats des simulations, ceux de la succession blé-mais par exemple, et ce pour chaque site pédoclimatique étudié. La méthode choisie consiste à déterminer, pour chaque site, chacune des trois espèces de CIPAN et chacun des trois niveaux initiaux d'azote minéral, le couple de dates de levée et de destruction permettant d'obtenir les meilleures performances conjointes à l'échelle des 20 années de simulation, en appliquant successivement plusieurs critères. Les critères choisis, leurs valeurs et leur hiérarchisation sont les suivants :

- 1) une efficacité forte de la CIPAN pour réduire les pertes de nitrate, caractérisée par une concentration nitrrique moyenne interannuelle inférieure à 50 mgNO<sub>3</sub>/l (ou au moins < 60 mgNO<sub>3</sub>/l si cette condition n'était pas remplie) et un taux d'abattement de la concentration supérieur à 75% du taux atteint pour le couple de dates de levée-destruction le plus efficace ;
- 2) une absence d'impact négatif sur la culture suivante, c'est-à-dire un rendement de la culture suivante supérieur ou égal à celui obtenu en situation sans CIPAN ;
- 3) une régularité d'efficacité des CIPAN, qualifiée par une probabilité faible (inférieure à 15% ou à la probabilité minimale + 5%) d'obtenir un taux d'abattement de la concentration nitrrique inférieur à 50% ;
- 4) une réduction du drainage la plus faible possible (à 5% près du minimum) pour limiter l'impact sur la recharge des nappes.

Chaque critère est appliqué selon la hiérarchie proposée : le test pour trier les couples de dates "levée-destruction" ne s'applique successivement qu'aux combinaisons de dates remplissant déjà les critères précédents (Figure 11-1).

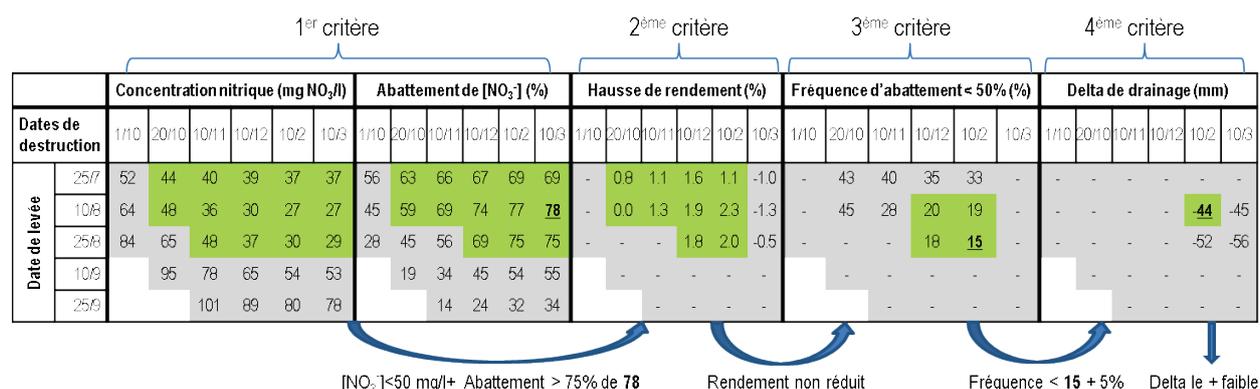
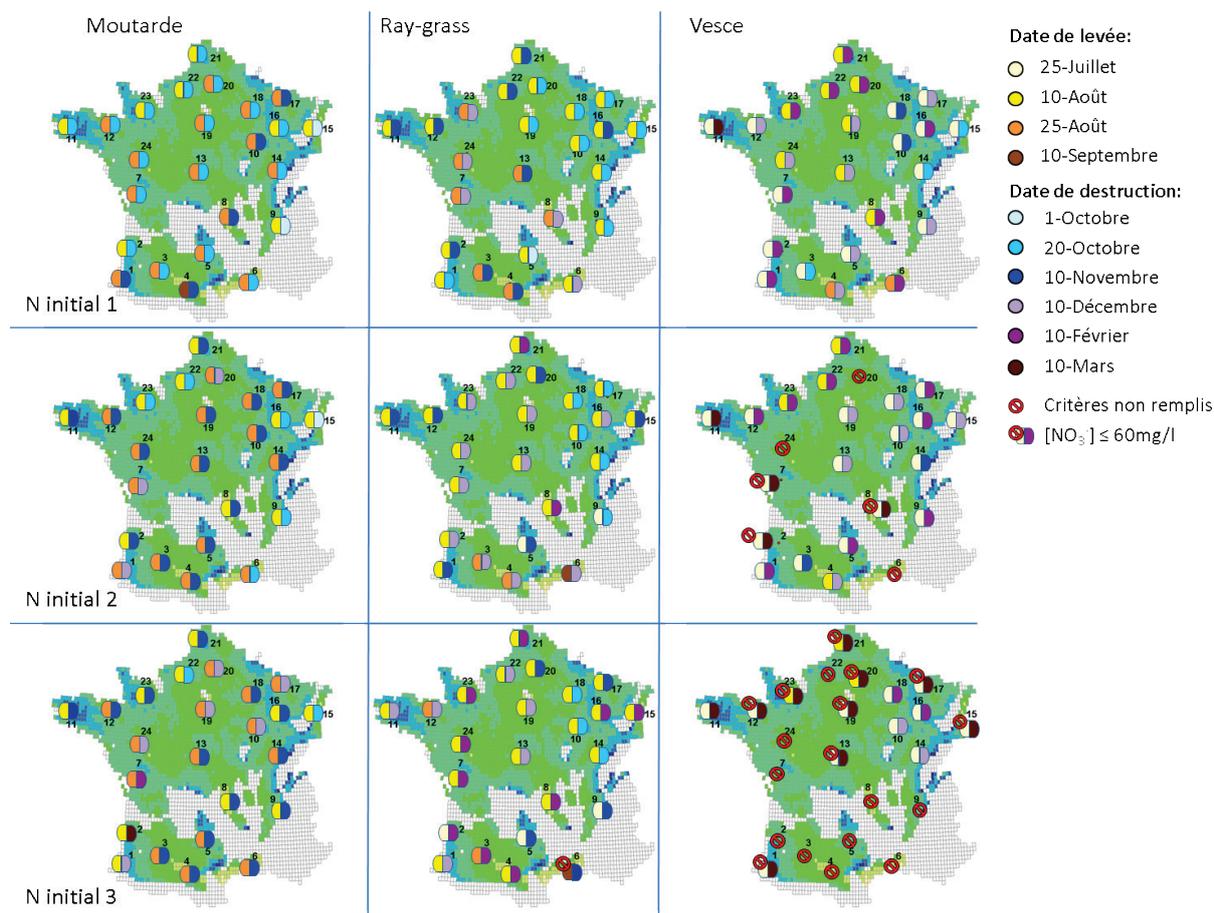


Figure 11-1. Exemple d'application de l'analyse multicritère pour définir les dates de levée et destruction optimales selon les critères définis (en vert les combinaisons de dates sélectionnées à chaque étape et donc possibles)

Il convient de souligner que les résultats obtenus et présentés ici dépendent fortement des critères choisis. Ils doivent donc être considérés comme une illustration de la démarche ; ainsi d'autres résultats auraient pu être obtenus, soit en changeant la hiérarchie des critères, en fonction des enjeux prioritaires selon les pédoclimats considérés, soit en modifiant la valeur des critères.



**Figure 11-2.** Dates optimales de levée et de destruction des CIPAN par site climatique (1 à 24), selon l'état initial d'azote minéral (N1, N2, N3) et l'espèce (moutarde, ray-grass et vesce), déterminées par analyse multicritère (en considérant conjointement l'impact sur la concentration nitrique, le rendement de la culture suivante et le drainage) à partir des résultats de simulation. La mention "< 60 mgNO<sub>3</sub>/l" indique que la valeur obtenue est inférieure à une concentration nitrique de 60 mgNO<sub>3</sub>/l (le critère < 50 mgNO<sub>3</sub>/l n'étant, lui, pas satisfait)

Les résultats sont présentés par site, espèce et état initial d'azote minéral du sol (Figure 11-2), car ces trois facteurs sont pertinents pour expliquer la variabilité des résultats simulés. Les enseignements marquants de cette "optimisation multicritère" sont les suivants :

- Comme attendu, les couples de dates optimales pour la levée et la destruction du couvert dépendent du site climatique. Leur répartition est structurée selon leur double localisation Nord-Sud et Ouest-Est de la France.
- Toutefois, les couples de dates optimales "levée-destruction" dépendent assez fortement de l'état initial d'azote minéral à la récolte du précédent.
- La moutarde et le ray-grass permettent de satisfaire tous les critères sur quasiment tous les sites (excepté le site 6, méditerranéen, avec l'état initial N3), et ce, quel que soit l'état initial d'azote minéral à la récolte du précédent.
- La vesce (légumineuse) ne permet pas de satisfaire les critères pour les états initiaux N2 et N3 à la récolte du précédent (60 et 100 kgN/ha respectivement) dans une grande partie des sites, notamment de la moitié Sud de la France, en raison d'un manque d'efficacité pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage. Par contre, la légumineuse répond à la sélection multicritère dans le cas de l'état initial N1 à la récolte du précédent (20 kgN/ha) pour tous les sites. Les légumineuses utilisées en culture "pure" comme

CIPAN sont utiles pour réduire les fuites de nitrate, mais si l'on cherche à restituer une eau de drainage à moins de 50 mgNO<sub>3</sub>/l, il convient de s'assurer que le reliquat d'azote minéral est faible (proche de l'état N1) avant de semer une légumineuse.

- Les dates de levée optimales sont sélectionnées entre le 10 et le 25 août, avec quelques exceptions au 10 septembre, pour les deux espèces non légumineuses (moutarde et ray-grass) ; cela indique qu'il n'est pas utile de semer trop tôt la CIPAN après la récolte du blé pour qu'elle soit efficace. Toutefois, la date optimale de levée est plus précoce pour la vesce (cas de l'état initial N1), du 25 juillet au 10 août.
- Contrairement à ce qui est généralement admis, c'est-à-dire qu'il est préférable de détruire le plus tard possible les CIPAN, les dates de destruction optimales sont généralement précoces, y compris en zone à climat océanique, puisqu'elles se situent en majorité entre le 20 octobre et le 10 décembre. Ainsi, sauf cas exceptionnel, la période optimale de destruction est l'automne. Toutefois, plus le niveau initial d'azote minéral du sol est élevé, plus la date est tardive. Cet effet est particulièrement marqué pour le ray-grass, dont les dates de destruction optimales sont fréquemment le 10 février avec l'état initial N3.

Les dates optimales ainsi déterminées correspondent à une première évaluation, illustrant l'approche qui pourrait être mise en œuvre sur chaque situation pédoclimatique française, pour réaliser une optimisation des itinéraires techniques de CIPAN. Les résultats obtenus sont contingents des dates de levée et de destruction simulées : des simulations réalisées avec des pas de temps plus courts permettraient de préciser les dates optimales. Les dates optimales ainsi déterminées ne sont donc pas nécessairement les véritables optimums ; elles donnent une indication de la plage calendaire de leur occurrence en fonction de la gamme des pédoclimats français simulés, pour avoir des CIPAN satisfaisant simultanément différents critères d'efficacité ou d'évitement d'effets indésirables.

Une hiérarchisation différente des critères d'évaluation des effets des CIPAN pris en compte aboutirait à d'autres combinaisons "optimales". Ainsi, si l'objectif avait été uniquement la réduction des fuites de nitrate, les dates de destruction "optimales" auraient été plus tardives que celle obtenues dans la présente analyse multicritère. Toutefois, il convient de noter que le critère de tri utilisé était déjà exigeant, puisqu'il était basé sur un taux d'abattement de la concentration en nitrate qui soit d'au moins 75% du taux maximum et qui conduise quasi systématiquement à une concentration inférieure à 50 mgNO<sub>3</sub>/l. Enfin il conviendrait pour compléter l'analyse, notamment pour certains sols nécessitant d'être travaillés à l'automne, de prendre en compte les jours potentiellement disponibles pour optimiser la date de destruction. On comprend ainsi l'ampleur du travail d'optimisation qu'il reste à réaliser pour disposer de "références" régionalisées et adaptées aux différents types de sol et de système de culture.

Dans l'optique d'amélioration de la qualité de l'eau (souterraine et de surface) à l'échelle d'un bassin versant ou de la zone d'alimentation d'une nappe alluviale, d'autres échelles spatiales doivent être prises en compte dans l'optimisation de la conduite des CIPAN. Ainsi, la localisation des CIPAN chaque année, l'assolement et le type d'exploitation agricole, ainsi que l'hydrogéologie doivent être considérés. Rappelons que ce travail, qui exige d'autres types de modélisation, n'entraîne pas dans la demande des commanditaires.

#### **11.2.4. Cultures intermédiaires : quels autres services écosystémiques rendus ?**

Compte tenu des résultats des simulations et de l'analyse bibliographique, il semble tout à fait possible que les cultures intermédiaires utilisées comme "piège à nitrate" (CIPAN) rendent plusieurs services écosystémiques simultanément :

- 1) effet "engrais vert" pour réduire la fertilisation azotée ou accroître le rendement (ou la teneur en protéines) de la culture suivante ;
- 2) stockage de carbone et d'azote organiques dans le sol et amélioration de la minéralisation en azote à long terme avec l'usage cumulatif dans le temps ;
- 3) réduction de certains bioagresseurs ;
- 4) protection du sol contre l'érosion grâce à la couverture du sol avant destruction et aux résidus de CIPAN s'ils sont laissés en mulch sur le sol lors de leur destruction.

Toutefois, il convient d'indiquer la possibilité d'incompatibilités entre services écosystémiques attendus par les cultures intermédiaires.

### **Cultures intermédiaires et protection des sols**

Si le sol doit être travaillé tôt à l'automne (cas par exemple des sols argileux), la fonction de réduction de l'érosion hydrique sera limitée et la culture intermédiaire détruite précocement ne produira pas son effet maximum de piège à nitrate, bien qu'elle soit largement utile pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage.

A *contrario* en sol limoneux à faible stabilité structurale, une date de destruction tardive (début de printemps, juste avant le semis de la culture principale suivante) pourrait permettre de simultanément maximiser la fonction "piège à nitrate" et de protection du sol vis-à-vis du phénomène de battance ; ainsi plus la destruction de la CIPAN est tardive et proche de l'implantation de la culture principale suivante, plus ce double effet positif se produira, mais au risque d'avoir un effet de réduction du drainage plus important ainsi qu'une compétition par préemption d'azote plus élevé et potentiellement négatif sur la culture suivante, en l'absence d'ajustement de la fertilisation azotée (dose, fractionnement et dates d'apport).

### **Cultures intermédiaires et faux semis**

Une autre question se pose concernant la "compatibilité" entre la pratique des faux semis pour gérer les adventices (très utilisée en Agriculture biologique, ou mise en œuvre régulièrement dans certains systèmes de culture) et la fonction "piège à nitrate". Cette pratique de désherbage consiste généralement à travailler le sol juste après la récolte du précédent pour favoriser la levée d'une partie du stock semencier d'adventices et des repousses du précédent (qui peuvent devenir des adventices). Cette technique ne semble pas incompatible, sauf cas particulier, avec l'implantation de CIPAN, pour les raisons suivantes :

- Le faux semis va permettre de faire germer et éventuellement lever des adventices. L'efficacité du faux semis se produit dès que les adventices ont germé, ce qui ne nécessite pas forcément d'attendre la levée des adventices pour que le stock semencier soit réduit par un travail du sol. Cela s'explique par le fait que la germination est un phénomène non réversible et que les graines germées sont très sensibles aux stress hydriques et/ou au travail mécanique du sol, qui est généralement destructeur de la plantule.
- Le semis de la CIPAN à une date retardée de 2 à 3 semaines pour permettre la pratique de faux semis peut permettre d'obtenir une bonne efficacité de la CIPAN vis-à-vis de la réduction des fuites de nitrate si la levée se produit au plus tard fin août à début septembre, en fonction des sites climatiques.
- La CIPAN n'étant généralement pas désherbée avec un herbicide, son semis peut permettre la levée d'adventices, et joue en soi un rôle de faux semis. Dans ce cas, l'emploi d'une crucifère à croissance rapide, compétitive vis-à-vis des ressources du milieu, va concurrencer les adventices et réduire leur développement.
- Une destruction de la CIPAN à l'automne doit permettre de détruire également les adventices avant qu'elles ne produisent de nouvelles graines, à condition toutefois que le couvert de CIPAN soit homogène spatialement pour induire une concurrence sur le développement des adventices, et que la flore adventice de la parcelle ne soit pas constituée d'espèces annuelles à cycle très court pouvant produire des graines moins de deux mois après leur levée.

En conclusion, il apparaît que la double pratique du faux semis et d'implantation des CIPAN nécessite la mise en œuvre d'une gestion plus fine et assurément plus complexe de la période d'interculture.

### **Cultures intermédiaires et bioagresseurs**

Les CIPAN pouvant favoriser certains bioagresseurs (limaces, maladies telluriques...), le choix de l'espèce et éventuellement de la variété doit nécessairement intégrer ce risque phytosanitaire.

Les repousses de la culture précédente (colza ou céréale), si elles peuvent être efficaces pour réduire les fuites de nitrate, peuvent induire des développements des bioagresseurs car elles constituent potentiellement des plantes hôtes pour les ravageurs des principales cultures de la rotation. Il est donc important d'analyser le risque de multiplier les bioagresseurs en les utilisant comme couvert intermédiaire ; ce risque va dépendre du niveau d'infestation de la culture principale précédente, de la biologie du bioagresseur considéré et surtout du délai de retour de la culture en rotation (rotation courte *versus* rotation longue).

Concernant la gestion des cannes de maïs, l'étude par simulation indique qu'il est préférable de les enfouir pour obtenir un effet de réduction, certes modeste, de la concentration nitrique de l'eau de drainage, plutôt que de les laisser en mulch à la surface du sol. Si l'incorporation peut réduire les effets de protection du sol mulché avec des cannes de maïs broyées contre l'érosion hydrique, la destruction mécanique réalisée par un travail du sol (comme par exemple le labour) est préférable pour lutter contre la pyrale et la chrysomèle du maïs et pour réduire la fusariose du blé suivant en situation de succession maïs-blé d'hiver. Le broyage des cannes de maïs et leur incorporation par travail du sol profond permettent donc de remplir plusieurs fonctions simultanément.

### **Cultures intermédiaires et transfert de pesticides**

Des résultats récents ont montré que les CIPAN peuvent aussi avoir un effet positif pour réduire les transferts de pesticides, et notamment d'herbicides, en situation de monoculture de maïs irrigué. Cet effet s'explique par la modification des propriétés hydrodynamiques du sol et donc du drainage et de la lixiviation des molécules phytosanitaires selon des effets comparables à la dynamique de la lixiviation du nitrate, mais aussi par l'absorption et la dégradation des molécules phytosanitaires par la microflore du sol dont le développement est probablement stimulé par l'incorporation des résidus de CIPAN. Ces effets potentiels, qui restent à confirmer par des travaux de recherches complémentaires, renforceraient l'intérêt des CIPAN pour l'améliorer de la qualité de l'eau restituée aux nappes souterraines.

### **Cultures intermédiaires en sols en pente**

En terrains en pente, la question cruciale peut être de concilier les effets de réduction de l'érosion et de la lixiviation nitrique sans réduire la disponibilité en eau du sol pour la culture suivante.

Pour être efficace contre l'érosion et le ruissellement, il faut que la CIPAN présente un taux et une homogénéité de couverture du sol suffisants (seuil d'efficacité pour un taux de couverture > 30%), que sa croissance soit rapide, et qu'elle reste en place assez longtemps, y compris au printemps. Ces mêmes conditions renforcent son efficacité contre les fuites de nitrate.

Par contre, l'allongement de la durée de croissance de la CIPAN augmente sa consommation en eau et donc le risque d'une compétition préemptive d'eau pour la culture principale de printemps, et ce d'autant plus que la CIPAN aura une reprise de croissance au printemps. Privilégier la fonction "prévention de l'érosion" pourrait aussi réduire la recharge des nappes, sauf si, en réduisant notablement le ruissellement (sols en pente), la CIPAN permet d'accroître l'infiltration de l'eau, donc la recharge en eau du sol et le drainage par rapport à un sol nu. Cet effet pourrait se manifester plus particulièrement en situation de non-travail du sol.

Les références bibliographiques sont peu nombreuses sur cette problématique spécifique. Il pourrait être opportun d'analyser les effets combinés et de déterminer les conditions qui seraient favorables ou pas à l'atteinte conjointe des 3 objectifs, par des travaux de simulation au moyen d'un modèle validé intégrant le ruissellement et les transferts verticaux, voire les écoulements hypodermiques, en sols en pente.

### **11.2.5. Quelle adaptation locale des CIPAN pour une insertion la plus large possible dans les systèmes de culture actuels ?**

Les CIPAN constituent potentiellement un moyen de re-concevoir les systèmes de culture, en s'appuyant sur les différents services écosystémiques potentiels. Pour ce faire, les itinéraires techniques doivent être adaptés régionalement (voire localement) pour accroître les effets positifs et réduire les effets négatifs potentiels sur la culture suivante. L'adaptation des itinéraires techniques aux conditions locales constituera indéniablement une clé de succès de l'insertion des CIPAN dans les systèmes de culture français, ceci pour éviter les effets négatifs pour la culture suivante et obtenir les services écosystémiques visés. En effet, le choix simultané de l'espèce, des dates de semis et de destruction de la CIPAN et de la gestion des résidus peut déterminer l'atteinte ou pas des fonctions recherchées. En conséquence, il ne saurait y avoir un seul itinéraire technique qui serait *a priori* optimal pour l'ensemble des conditions locales, en particulier si l'on vise plusieurs fonctions et services simultanément. Cette étude montre qu'il sera nécessaire, au même titre que pour une culture principale, d'adapter l'itinéraire technique de la CIPAN à la succession de culture et au pédoclimat local.

Par ailleurs, les itinéraires techniques doivent être compatibles avec l'organisation du travail de l'ensemble de l'exploitation agricole. Or l'implantation et la destruction des CIPAN peuvent être en concurrence avec les autres productions de l'exploitation, en particulier les récoltes d'été et d'automne, les semis d'automne et les activités liées à l'élevage. Ces activités sont par nature prioritaires, et les itinéraires techniques de gestion de l'interculture doivent être raisonnés pour s'insérer au mieux dans le calendrier de travail de l'exploitation et ainsi maximiser le développement de la CIPAN. Les approches développées par la recherche agronomique et le développement agricole pour l'aide au raisonnement des agro-équipements pourraient être remobilisées dans cet objectif.

Enfin, il ne faut pas négliger l'aspect technique de semis en situation de non-travail ou de travail superficiel du sol, où des techniques appropriées doivent être mises en œuvre pour accroître les chances de succès de l'implantation du couvert intermédiaire.

Si les repousses peuvent être efficaces pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage, elles peuvent poser d'éventuels problèmes en favorisant certains bioagresseurs. Il peut donc être préférable, voire nécessaire, de semer des espèces appartenant à des familles botaniques différentes pour produire des services écosystémiques complémentaires ("effet intrant azoté ou engrais vert", réduction de certains bioagresseurs comme les nématodes de la betterave, non-propagation de maladies telluriques...). L'usage d'une diversité d'espèces dans les rotations est à privilégier. La maîtrise de l'implantation du couvert rend également préférable l'emploi des CIPAN semées spécifiquement, dont il est possible d'adapter la dose et la date de semis, en fonction du type de sol et du mode de gestion du travail du sol pratiqué par l'agriculteur.

Enfin, il est important de souligner qu'à moyen et long termes (> 10 ans), la pratique systématique de CIPAN dans les systèmes de culture à chaque période d'interculture la permettant, permet d'accroître le stockage de carbone et d'azote dans le sol et donc *in fine* induit une augmentation de la fourniture du sol en azote. Cette pratique récurrente n'induit pas de baisse de l'efficacité des CIPAN pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage dans la mesure où l'insertion des CIPAN constitue une pratique à part entière de la gestion du système de culture. Toutefois, il convient de souligner que la fertilisation azotée doit être réduite pour un même potentiel de rendement de la culture de vente suivante, car le stockage d'azote organique induit un accroissement significatif de la minéralisation nette annuelle du sol en azote.

### 11.3. Enseignements et perspectives

#### **Les apports de l'étude : un complément à l'analyse bibliographique pour quantifier les effets des CIPAN et modes de gestion de l'interculture dans les conditions pédoclimatiques françaises**

L'analyse bibliographique a permis de montrer une efficacité incontestable des CIPAN pour une large gamme de conditions de sol et de climats, dans le cas où le drainage est significatif. Les principaux facteurs déterminant les processus de drainage et de lixiviation d'azote nitrique, ainsi que ceux expliquant en quoi les CIPAN sont nécessaires et efficaces pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage, ont été mis en évidence et illustrés. Toutefois, cette efficacité des CIPAN diffère selon les références bibliographiques, sans que cette variabilité soit clairement structurée ou modélisée. En effet, peu de travaux de généralisation par modélisation statistique ou fonctionnelle ont été publiés, alors que beaucoup de travaux expérimentaux dans des conditions spécifiques sont disponibles.

L'étude par simulation a ainsi permis de quantifier les effets des CIPAN et d'autres modes de gestion de l'interculture selon plusieurs facteurs à l'échelle locale et sur une période allant de la récolte de la culture précédant la CIPAN jusqu'à la récolte de la culture suivante. La variabilité de ces effets a été analysée en fonction des climats, en interaction avec les types de sols (3 à 4 sol types par site climatique) et selon l'état initial d'azote minéral du sol à la récolte du précédent cultural (3 niveaux très différents). L'efficacité des CIPAN a ainsi été déterminée dans une large gamme de pédoclimats et régions françaises, dont certaines ne disposaient que de peu de références expérimentales. La variabilité climatique, testée pour les 24 sites choisis, a été évaluée sur le climat actuel représenté par les 20 dernières années (1988-2008), ce qui permet de connaître la variance

associée à l'efficacité des CIPAN et des autres modes de gestion de l'interculture pour une large gamme de conditions climatiques, en tenant compte d'années "exceptionnellement" pluvieuses ou sèches.

Au final, les simulations indiquent que, dans les conditions françaises, les CIPAN sont efficaces, à l'échelle de 20 années climatiques, pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage, et ce, aussi bien en situation d'interculture courte, qu'en cas d'interculture longue, après une récolte d'été. Plus précisément, les simulations indiquent que les CIPAN sont utiles, voire le plus souvent nécessaires, pour atteindre des concentrations nitriques inférieure à 50 mgNO<sub>3</sub>/l, même dans les situations où la fertilisation azotée est raisonnée de façon optimale. Ceci s'explique par le fait que même si la maîtrise de la fertilisation azotée est un préalable nécessaire, elle n'est pas suffisante pour restituer de l'eau de drainage faiblement concentrée en nitrate. En effet, c'est la minéralisation estivale et automnale (sols chauds et suffisamment humides) qui détermine les risques de lixiviation, davantage que le reliquat à la récolte lorsque celui-ci est faible (correspondant au reliquat d'azote minéral minimum incompressible). Aucun apport d'engrais azoté de synthèse sur la CIPAN, qui ne ferait qu'augmenter le stock d'azote nitrique lixiviable, ne peut ainsi se justifier.

En revanche, les simulations indiquent que les CIPAN ne sont pas efficaces après récolte tardive d'automne (après maïs grain), ce qui oblige à une gestion très stricte et minutieuse de la fertilisation azotée pour limiter les fuites de nitrate. De façon plus générale, les simulations indiquent qu'en situation de profil initial avec un fort excès d'azote minéral, les couverts intermédiaires ne permettent pas de restituer systématiquement de l'eau de drainage avec une concentration en nitrate inférieure au seuil réglementaire.

L'étude a également permis de préciser le degré d'efficacité des CIPAN en fonction de l'espèce utilisée (crucifère, graminée ou légumineuse) et de leur mode de gestion (date de semis et de destruction). Ainsi, une analyse multicritère a permis de proposer des couples de dates de levée-destruction "optimales", pour chaque site climatique et espèce. Ce travail constitue une première illustration d'une démarche plus large qui pourrait être mise en œuvre pour optimiser les itinéraires techniques des CIPAN en fonction du pédoclimat, du reliquat d'azote minéral initial et de la culture principale suivante, voire d'autres facteurs.

L'étude a permis de produire des résultats particulièrement originaux pour deux aspects concernant la gestion des CIPAN. D'une part, l'étude par simulation de la phase "semis-levée" apporte des résultats nouveaux alors que très peu de travaux de modélisation sont disponibles dans la bibliographie sur cette phase d'implantation pourtant cruciale pour un semis d'été dans les conditions tempérées et méditerranéennes. Les simulations réalisées indiquent que l'implantation de la CIPAN peut s'opérer avec succès dans une large gamme de situations, à condition d'adapter la date de semis en fonction de la situation pédoclimatique. D'autre part, l'analyse des jours potentiellement disponibles pour la destruction des CIPAN est également innovante ; si des travaux ont été réalisés pour différents systèmes de culture et pour des opérations techniques de travail du sol ou de récolte, aucune référence d'article scientifique n'a été trouvée pour la problématique de destruction des CIPAN. Les simulations indiquent ainsi que les jours potentiellement disponibles pour la destruction des couverts intermédiaires à l'automne ne sont pas un facteur limitant pour réaliser l'intervention, sauf en sol argileux.

Les itinéraires techniques doivent ainsi être adaptés aux conditions pédoclimatiques locales et au système de culture pour conjointement maximiser l'efficacité "piège à nitrate" et minimiser les éventuels effets indésirables sur la culture suivante. Cette adaptation, notamment des dates de semis et de destruction des CIPAN, doit aussi intégrer les autres "services" qu'elles sont susceptibles de rendre, en fonction des enjeux locaux (lutte contre l'érosion, reconstitution des ressources en eau...). Plus largement, la gestion de l'interculture est l'une des composantes de la (re)conception de systèmes de culture plus respectueux de l'environnement et valorisant les services écosystémiques.

## Des questions de recherche à explorer

Cette étude a mis en évidence un besoin d'approfondissement de connaissances sur les cultures intermédiaires, soulignant la nécessité de développer un large programme de recherches coordonné sur cette problématique systémique pour progresser encore sur l'efficacité des cultures intermédiaires.

**1. La contribution à la gestion des bioagresseurs des cultures principales.** C'est incontestablement sur cette thématique que les efforts de recherche devront s'orienter si l'usage des CIPAN se généralise en France,

car il ne faut pas négliger leurs effets collatéraux favorables mais aussi indésirables. Plusieurs questions se posent ainsi :

- la compatibilité de la technique de faux semis avec l'implantation de CIPAN, qui pourrait bénéficier de travaux de simulation des effets sur la flore adventice au moyen d'un modèle de type FLORSYS ;
- les éventuels problèmes sanitaires que peut poser l'utilisation des repousses (de colza ou de céréale) comme couvert intermédiaire ; des études épidémiologiques menées à l'échelle temporelle de la rotation devraient permettre d'analyser les risques en fonction du système de culture et du travail du sol ;
- l'impact des CIPAN sur quelques bioagresseurs particulièrement problématiques, qui devra faire l'objet de travaux de recherche ou de recherche-développement afin d'anticiper d'éventuels risques d'émergence de nouveaux problèmes parasitaires.

## **2. La maximisation conjointe des effets "piège à nitrate" (CIPAN) et "engrais vert" pour réduire l'utilisation des engrais azotés minéraux, dont la synthèse est forte consommatrice d'énergie fossile.**

Cette problématique renvoie à l'usage des légumineuses comme CIPAN, ce qui pose la question de l'efficacité du piégeage d'azote nitrique et de la fixation symbiotique en fonction du statut des sols en azote minéral. Cette question sera d'autant plus cruciale à analyser que l'on souhaitera développer l'usage de mélanges associant espèces non-légumineuse(s) et légumineuse(s), afin de combiner les deux fonctions de "piège à nitrate" et d'"engrais vert".

Des travaux de recherche sur l'assemblage des espèces sont nécessaires pour constituer des mélanges efficaces. Si de l'expertise agronomique a permis d'avancer sur cette question, en particulier sur le continent américain mais aussi en Europe, l'analyse bibliographique a mis en évidence un manque de travaux méthodologiques qui freinent, d'une part, la conception pratique de tels mélanges et leur adaptation aux diverses conditions pédoclimatiques françaises, et d'autre part, la modélisation du comportement des couverts plurispécifiques et l'étude par simulation de leurs effets sur les bilans d'eau et d'azote et donc sur la réduction des fuites de nitrate. Cette problématique de la composition de mélanges d'espèces (et des techniques associées) se pose également pour les couverts plurispécifiques de non-légumineuses, visant la maximisation du piégeage, de la tolérance à la sécheresse ou de la biofumigation.

## **3. Le choix des espèces et variétés de cultures intermédiaires et leur amélioration génétique**

Hormis pour certaines espèces de crucifères pour lesquelles des entreprises semencières ont investi des moyens significatifs en Europe et en France, il convient de souligner que l'investissement en terme de recherche en génétique et amélioration des plantes doit être encouragé, notamment pour rechercher et caractériser de nouvelles ressources génétiques vis-à-vis de la gestion des bioagresseurs, mais aussi pour d'autres fonctions agro-écologiques. On peut faire l'hypothèse que des espèces peu utilisées aujourd'hui en France pour la production agricole pourraient rejoindre le panel des solutions à disposition des agriculteurs dans un objectif de maîtrise de certains bioagresseurs. C'est probablement une problématique qui pourrait être porteuse d'innovations génétiques permettant à terme de réduire l'usage des pesticides.

L'étude met aussi en évidence le manque de connaissances écophysiologiques sur les espèces utilisées aujourd'hui comme CIPAN, en particulier celles qui ne sont pas des espèces cultivées par ailleurs pour produire des graines ou du fourrage.

**4. La gestion des cultures intermédiaires dans les systèmes sans labour.** Les CI sont largement utilisées pour pallier l'absence de travail du sol (en favorisant l'infiltration d'eau, le décompactage...) dans les contextes techniques sans labour, qui modifient les modalités de destruction et de gestion des résidus des CI. Or la bibliographie scientifique ne permet pas toujours de conclure, sur les questions concernant notamment : les techniques de destruction mécanique utilisables, dans les régions où le gel léthal est peu fréquent, pour éviter l'usage des herbicides totaux pour leur destruction ; les effets de la pratique du mulch (comparée à l'enfouissement) sur la minéralisation des résidus de CI, les pertes par volatilisation d'ammoniac, la dénitrification et les émissions de N<sub>2</sub>O, ou encore sur les bioagresseurs.

**5. L'implantation de CIPAN par des semis sous couvert.** La difficulté d'insertion des CIPAN dans les systèmes de monoculture du maïs grain souligne la nécessité d'accroître l'efficacité des CIPAN semées sous couvert. Deux questions prioritaires doivent être analysées : 1) Peut-on concilier l'usage de variétés de maïs à

bon potentiel mais moins tardives avec des semis sous couvert ? 2) Quelles sont les espèces (et techniques) adaptées au semis sous couvert (tolérance à l'ombrage) ?

**6. Le lien entre CIPAN et changement climatique.** L'augmentation certaine de la température et de la concentration en CO<sub>2</sub>, ainsi que de la variabilité saisonnière de la pluviométrie et du risque d'événements extrêmes, notamment des sécheresses automnales, sont susceptibles d'influer sur l'efficacité "piège à nitrate" des CIPAN. L'évolution du climat peut également modifier leur impact sur le drainage, et donc potentiellement sur la recharge des nappes. Ces effets pourraient être estimés par des simulations utilisant des scénarios de climat futur.

Par ailleurs, l'évaluation de la contribution des CIPAN au bilan de gaz à effet de serre du secteur agricole est susceptible d'être modifiée en fonction notamment de l'évolution du climat et de la composition de l'atmosphère, ce qui nécessiterait des recherches complémentaires.

**7. L'impact des CIPAN sur le bilan énergétique.** Sachant qu'un kilogramme d'azote sauvegardé de la lixiviation correspond à une réduction de l'équivalent d'environ un kilogramme de pétrole, la réduction des fuites de nitrate vers les eaux grâce aux CIPAN permettrait, à l'échelle de la France, d'économiser plusieurs centaines de milliers de TEP ; une évaluation précise de cet enjeu serait utile pour sensibiliser les agriculteurs et ceux qui les conseillent au gisement d'économie d'énergie que représente cette sauvegarde d'azote nitrique non livixié.

**8. L'évaluation de l'impact de la généralisation des CIPAN** dans des situations locales où les enjeux de recharge en eau des nappes peuvent se poser avec une forte acuité (cas de nappes réalimentées exclusivement par le drainage sous cultures). Dans ce cas, un dilemme peut se poser pour répondre conjointement aux préoccupations quantitatives de gestion de l'eau (recharge des nappes) et aux objectifs qualitatifs de la protection des eaux de captage pour l'alimentation humaine (concentration nitrique des nappes inférieure à la norme de potabilité). Cette question nécessitera des études spécifiques, avec des simulations et études couplées, agronomiques et hydrogéologiques, et une spatialisation explicite pour prendre en compte les spécificités locales du fonctionnement intégré de l'agrosystème et de l'hydrosystème des eaux souterraines. Par ailleurs, les effets à long terme de l'introduction systématique des CIPAN dans les systèmes de culture français mériteraient des recherches, notamment en ce qui concerne la séquestration de carbone, la minéralisation de l'azote du sol, les effets sur les populations de bioagresseurs et d'auxiliaires.

**9. La conception d'outils d'aide à la décision pour le choix d'itinéraires techniques** de mise en œuvre des CIPAN qui tiennent compte des conditions locales relatives pour maximiser les bénéfices environnementaux des CIPAN et en réduire les éventuels inconvénients. Ces conditions locales sont relatives aux : climat et au sol ; aux systèmes de culture (en particulier les cultures précédentes et suivantes et les modalités de travail du sol) ; à l'organisation du travail de l'exploitation agricole. De tels outils d'aide à la décision pourraient faciliter la généralisation des CIPAN sur le territoire français.

**10. L'analyse coût-bénéfice des cultures intermédiaires :** une analyse coût-bénéfice des cultures intermédiaires considérant l'ensemble de leurs fonctions permettrait de mieux mesurer les services qu'elles rendent et d'étudier les politiques publiques les plus efficaces pour leur mise en œuvre.

L'ensemble de ces questions constitue la trame d'un ambitieux programme de recherche et de recherche-développement qui soit à la hauteur des millions d'hectares en "zones vulnérables Nitrate" potentiellement concernés par l'insertion des CIPAN dans les systèmes de culture français.

