



Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires

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

La présence de nitrate en excès dans les eaux de surface et les nappes phréatiques constitue un double enjeu de santé publique (norme OMS de potabilité de l'eau de boisson $< 50 \text{ mgNO}_3/\text{l}$) et de protection de l'environnement (eutrophisation des zones côtières) ; elle fait l'objet d'une politique publique européenne déclinée par chaque Etat-membre au plan national, notamment dans des programmes d'action de réduction des ions nitrate au titre de la Directive "Nitrate".

L'essentiel de ce nitrate est dû aux excès de fertilisation azotée, ainsi qu'à la production naturelle de nitrate par minéralisation des matières organiques du sol. L'introduction d'une culture intermédiaire piège à nitrate (CIPAN) permet de capter l'azote minéral résiduel du sol avant la période de drainage et ainsi de réduire les fuites d'azote et la concentration nitrique de l'eau de drainage.

Dans le cadre de la préparation du 5^e programme d'action (qui débutera en 2013), les pouvoirs publics souhaitent disposer d'un ensemble actualisé de connaissances et références agronomiques sur les conditions d'efficacité des cultures intermédiaires. Dans cet objectif, les ministères chargés de l'Ecologie et de l'Agriculture ont demandé à l'INRA de réaliser une étude qui fasse le point des acquis, des incertitudes et des questions à approfondir sur cette problématique.

L'objectif principal de cette étude est donc d'établir un état des connaissances sur la gestion de l'azote en période d'interculture pour les différents pédoclimats français en systèmes de grande culture, et sur les conditions d'efficacité des CIPAN pour réduire les fuites de nitrate. Le seul examen de la bibliographie scientifique ne suffisant pas pour appréhender la diversité des situations du territoire métropolitain, les commanditaires ont retenu la proposition de l'INRA de compléter l'état des connaissances par un travail de simulation. L'examen des effets des CIPAN a en outre été élargi à d'autres services écosystémiques potentiels : protection des sols contre l'érosion hydrique, séquestration de carbone dans les sols, contribution au contrôle des adventices, maladies et ravageurs... Par ailleurs, l'étude s'est intéressée aux autres couverts intermédiaires que sont les repousses de colza ou de céréales, ainsi qu'à d'autres modes de gestion de l'interculture comme les mulchs de résidus de culture laissés en surface ou l'enfouissement de ces résidus. Dans ce document, le terme "couverts intermédiaires" désigne à la fois les CIPAN et les repousses. Lorsqu'on s'intéresse spécifiquement à la fonction piège à nitrate, l'acronyme CIPAN est utilisé, sinon, pour d'autres fonctions, le terme de culture intermédiaire (CI) est employé.

1. Les fonctions des couverts intermédiaires

L'interculture est la période, dans la rotation culturale, comprise entre la récolte d'une culture principale et le semis de la suivante ; elle peut durer de quelques jours à plusieurs mois.

Les couverts intermédiaires sont définis par leur installation durant l'interculture et le fait qu'ils ne sont pas récoltés mais détruits et enfouis sur place - contrairement aux cultures dites dérobées, également implantées entre deux cultures principales, mais dont la production est exportée et valorisée. D'un point de vue agronomique, ces couverts peuvent être constitués d'une culture intermédiaire semée (moutarde, ray-grass, phacélie...) ou de repousses de la culture précédente (colza, blé...).

L'effet "piège à nitrate" des couverts intermédiaires

La lixiviation du nitrate et sa prévention

Le nitrate provient des apports d'engrais minéraux azotés mais également de la minéralisation des matières organiques du sol (humus, résidus de cultures, apports organiques). Il est absorbé par les plantes (culture principale ou intermédiaire, adventices) et par des microorganismes du sol (qui prélèvent de l'azote minéral du sol lors de la décomposition des résidus de matière organique, processus dit d'"organisation" d'azote).

Forme très soluble de l'azote, le nitrate est particulièrement sujet à la lixiviation (improprement nommée "lessivage"), qui est l'entraînement d'une molécule soluble par le drainage (transfert

d'eau) au-delà de la zone explorée par les racines. Le drainage, et la lixiviation associée, se produisent notamment à l'automne quand les précipitations deviennent excédentaires par rapport à la capacité de stockage d'eau du sol. Cette lixiviation du nitrate peut générer une pollution des eaux, superficielles et souterraines ; elle représente aussi une perte d'azote pour l'agriculture et donc une perte d'énergie (celle nécessaire pour fabriquer les engrais azotés utilisés pour compenser les pertes).

Maîtriser les fuites de nitrate requiert de minimiser le reliquat d'azote minéral du sol en début de drainage. Le premier levier est l'ajustement de la fertilisation azotée pour que le reliquat à la récolte de la culture précédente soit minimal. Ce préalable nécessaire n'est pas suffisant, parce que cette culture précédente n'absorbe jamais tout le stock d'azote minéral présent et parce que la minéralisation des matières organiques du sol alimente en continu le pool d'azote minéral du sol.

Une solution consiste à faire absorber l'azote minéral par un couvert végétal de façon à immobiliser (temporairement) sous forme organique (azote dans les plantes). La fonction d'une CIPAN est donc double : absorber l'azote minéral du sol pour éviter les pertes nitriques par lixiviation, puis restituer à la culture suivante cet azote, libéré par la minéralisation de ses résidus.

Deux variables peuvent être utilisées pour estimer la lixiviation et l'efficacité de la CIPAN :

- la quantité de nitrate lixivié (exprimée en kgN/ha) : l'efficacité de la CIPAN est alors mesurée par la réduction de la lixiviation qu'elle permet par rapport à un sol laissé nu (sans plantes) ;
- la teneur en nitrate de l'eau de drainage (exprimée en mgNO₃/l) : l'efficacité de la CIPAN est alors évaluée par sa capacité à réduire cette teneur en nitrate (% de baisse par rapport à une situation de sol nu) et à restituer une eau qui respecte le seuil réglementaire de potabilité (50 mgNO₃/l).

Les interrogations concernant l'efficacité des CIPAN et leur faisabilité technique

Dans certaines conditions, la question de l'efficacité de la CIPAN peut se poser. C'est notamment le cas :

- après une récolte tardive de la culture précédente, d'un maïs grain notamment, qui laisse trop peu de temps pour un développement suffisant de la CIPAN avant la reprise du drainage ;
- dans le cas d'une interculture courte, entre une récolte estivale de la culture précédente et le semis d'une culture d'hiver ;
- pour l'utilisation de légumineuses qui, parce qu'elles couvrent

une partie de leurs besoins par la fixation symbiotique d'azote atmosphérique, absorbent moins l'azote minéral du sol ;

- en cas d'épandage d'effluents d'élevage ou de produits résiduels organiques à l'automne susceptibles de libérer une quantité d'azote excédant la capacité d'absorption de la CIPAN.

L'implantation d'une CIPAN peut en outre poser des problèmes de compatibilité avec :

- la réalisation de travaux du sol à l'automne, notamment en sols argileux ;
- la pratique du faux-semis (technique consistant à préparer le sol comme pour un semis afin de favoriser la germination et la levée des graines d'adventices qui sont ensuite détruites mécaniquement), notamment en agriculture biologique.

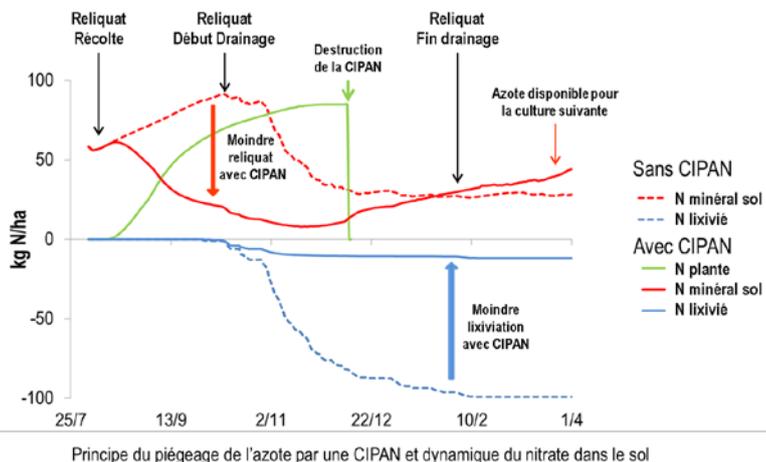
Les difficultés éventuelles de mise en place d'une CIPAN conduisent à examiner l'efficacité de pratiques alternatives telles que le développement d'un couvert constitué de repousses de la culture précédente, l'enfouissement des résidus broyés de la culture précédente ou le maintien de ces résidus en surface (mulch).

L'analyse de la bibliographie (768 publications scientifiques et 27 documents techniques) montre que les CIPAN sont efficaces, dans la plupart des situations testées, pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage, avec un taux de réduction généralement supérieur à 50% permettant, le plus souvent, d'obtenir une teneur de l'eau de drainage < 50 mgNO₃/l. Les effets sont toutefois variables en fonction du contexte pédoclimatique, des conditions climatiques de l'année et du système de culture.

Les données issues des dispositifs expérimentaux, inégalement répartis dans les régions françaises, apparaissent toutefois insuffisantes pour établir des références quantitatives qui permettent de prédire l'efficacité comparée des CIPAN et d'autres modalités de gestion de l'interculture dans des conditions locales données, ce qui justifie l'intérêt d'une étude par simulation.

Enfin, l'implantation d'une CIPAN représente un coût et peut générer des contraintes d'organisation du travail pour l'agriculteur. L'analyse bibliographique montre que ces questions n'ont pas fait l'objet de beaucoup de travaux. Un calcul sur la base des références techniques disponibles permet d'estimer ce coût entre 54 et 110 €/ha (main d'œuvre comprise), selon la technique d'implantation et le coût de la semence (voir synthèse et rapport).

Gestion de l'azote en interculture, sans et avec CIPAN



Plusieurs mécanismes expliquent l'évolution dans le temps du "reliquat d'azote minéral du sol" (azote disponible pour les plantes mais aussi exposé à la lixiviation) à partir de la récolte de la culture précédente.

Avant le début du drainage, le fort taux de minéralisation des matières organiques en fin d'été et en automne entraîne l'augmentation du reliquat. Durant la période de drainage, le reliquat diminue du fait de la lixiviation de nitrate et d'un taux de minéralisation plus faible en fin d'automne et hiver.

L'évolution du reliquat d'azote minéral est modulée par la présence d'une CIPAN. En absorbant l'azote minéral du sol avant le début du drainage, la CIPAN empêche l'augmentation du reliquat exposé à la lixiviation.

Les effets des CIPAN sur la culture suivante et la recharge des nappes

Par la lixiviation évitée puis la restitution d'azote minéral lors de la minéralisation de ses résidus, la CIPAN a théoriquement un effet positif sur la culture suivante (effet "engrais vert"). Toutefois, par sa consommation d'eau et d'azote, elle peut induire une compétition préemptive vis-à-vis de la disponibilité de ces ressources pour la culture suivante.

Les résultats expérimentaux publiés montrent que l'effet des CIPAN sur la culture suivante est généralement positif. Toutefois la variabilité des résultats d'expérimentation reste mal expliquée, excepté pour les légumineuses qui ont un impact toujours positif. Sous nos climats tempérés, les effets négatifs ne sont généralement pas imputables à une préemption d'eau, mais d'azote. Cette disponibilité en nitrate inférieure après CIPAN se produit si le drainage est faible (l'azote absorbé par la CIPAN n'aurait pas été lixivié), si la restitution d'azote est trop tardive, ou au contraire trop précoce (le nitrate libéré est lixivié avant le printemps). Cette restitution par minéralisation des résidus de CIPAN dépend de sa date de destruction et de sa composition biochimique, en particulier du rapport entre teneurs en carbone et en azote (rapport C/N).

Enfin, si la consommation d'eau des CIPAN ne pénalise pas en général l'alimentation hydrique de la culture suivante, elle induit une réduction de la lame d'eau drainée qui détermine la recharge des nappes.

Les pratiques de gestion de l'interculture

Les dernières données disponibles (dans l'attente de celles de l'enquête 2011) sont les résultats de l'enquête "Pratiques culturales" de 2006. A cette date, moins de 8% des parcelles de grandes cultures enquêtées portaient une CIPAN, 20% des repousses de la culture précédente ; 28% des parcelles en cultures intermédiaires avaient reçu des apports organiques.

Les autres fonctions des cultures intermédiaires

Au-delà de leur fonction de piège à nitrate, les CI sont susceptibles de rendre d'autres "services écosystémiques".

La protection contre l'érosion et l'amélioration de l'état structural du sol

Par leur biomasse aérienne et leurs racines, qui protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie, le retiennent et ralentissent le ruissellement, les CI peuvent réduire l'érosion hydrique.

Par leur apport de matière organique au sol notamment, les CI permettent aussi une amélioration de l'état structural et des propriétés physiques du sol (sous réserve qu'il n'ait pas subi de dégradation mécanique lors de la destruction de la CI). Ces effets apparaissent toutefois de moindre ampleur que ceux dus au travail du sol ou à la variabilité du climat.

La séquestration de carbone et le bilan de GES

Les CI permettent de séquestrer du carbone (en moyenne 300 ± 150 kgC/ha/an) et de l'azote organique dans les sols ; les expérimentations récentes conduisent à plutôt réévaluer à la hausse ce stockage, qui décroît cependant après quelques années. En revanche, les CI non légumineuses peuvent induire une légère augmentation des émissions de N₂O. Au total, le

bilan de GES des CI apparaît positif, avec une réduction moyenne d'environ 1 tonne équivalent CO₂/ha l'année de l'implantation du couvert, mais avec une forte variabilité selon la biomasse produite par la CIPAN. Les données expérimentales restent peu nombreuses, et manquent en particulier pour les légumineuses (voir rapport et synthèse, ainsi que l'ESCO "Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?").

Le contrôle des adventices

Le couvert intermédiaire est susceptible, par effet de compétition, de réduire la levée des adventices, leur développement et leur montée à graines ; s'y ajoute, dans certains cas, une inhibition par effet allélopathique (toxicité de métabolites de la CI libérés par exsudation racinaire ou lors de la décomposition des résidus broyés et enfouis). Tous ces effets des CI sont fonction de la biologie des adventices. L'impact sur les adventices apparaît significatif, mais il ne permet pas leur élimination sans recours à une méthode complémentaire de désherbage.

L'introduction d'une CI est compatible avec la pratique de faux-semis mais implique des adaptations de l'itinéraire technique, lors de son implantation et/ou de sa destruction. Par ailleurs, la conduite de la CI doit être adaptée en cas de non-labour, qui conduit souvent à privilégier la destruction chimique des CI et des adventices, bien que la destruction mécanique soit possible.

Les effets sur les maladies, les ravageurs et la faune "utile"

L'effet peut être direct, par rupture du cycle du ravageur ou du pathogène si la CI n'est pas une plante hôte, ou indirect, par l'apport de matière organique qui stimule l'activité biologique et les régulations naturelles. En outre, plusieurs familles botaniques (crucifères, graminées, alliées) présentent un potentiel allélopathique. Ces effets sont démontrés pour des crucifères, et sont utilisés contre des maladies telluriques ou des ravageurs, notamment des nématodes ravageurs de la betterave sucrière ou de cultures maraîchères. L'efficacité s'avère toutefois variable, et présente une forte spécificité (selon l'espèce voire la variété de CI, l'espèce voire la race de bioagresseur), rendant complexe cette utilisation.

L'activité biologique du sol accrue par les CI peut aussi réduire les ravageurs grâce à des régulations antagonistes – dont la mise en place requiert toutefois plusieurs années et n'est pas garantie. Les CI et leurs résidus favorisent des invertébrés "utiles", tels que les vers de terre (surtout en cas de travail du sol réduit), des méso-arthropodes prédateurs de nématodes, ou encore les pollinisateurs si la CI fleurit.

Inversement, des ravageurs peuvent être favorisés par certaines CI et leurs résidus : c'est le cas des limaces ou des larves phytophages de certains Coléoptères, Diptères et Lépidoptères.

Au total, le bilan des effets des CI sur les bioagresseurs apparaît globalement positif, mais il reste à mieux caractériser leurs potentialités et les conduites permettant de valoriser les effets positifs démontrés expérimentalement et de limiter les possibles effets négatifs.

2. L'étude par simulation

L'étude par simulation menée en complément de l'analyse bibliographique concerne la période allant de la récolte de la culture précédente à la récolte de la culture suivante. Elle vise à évaluer l'efficacité des CIPAN et à quantifier leurs impacts sur les bilans

d'eau et d'azote, en comparaison de la gestion des repousses et des résidus, dans une large gamme de pédoclimats et de systèmes de grande culture français. Elle comporte 3 volets.

Volet 1 : Les simulations de l'impact des modes de gestion de l'interculture sur les bilans d'eau et d'azote et le rendement de la culture suivante

Ces travaux sont réalisés avec le modèle STICS, modèle dynamique qui simule le développement de la culture et les processus des cycles de l'eau, du carbone et d'azote du champ cultivé. Développé à l'INRA depuis les années 1990, STICS est paramétré et validé pour de nombreuses grandes cultures, pour les CIPAN les plus utilisées en France et pour le devenir des résidus de culture. Il est paramétré pour les principaux types de sols français.

Le travail de simulation est fondé sur la sélection d'une gamme de contextes climatiques, pédologiques et culturaux, et d'un ensemble de modalités de gestion de l'interculture (voir ci-dessous). Les combinaisons de ces contextes et de ces gestions, testées sur 20 années de climat, ont conduit à simuler 1,3 million de situations d'interculture.

Les nombreuses répétitions de simulation, notamment sur les 20 années climatiques, permettent de réaliser des analyses de fréquence (probabilité) de survenue d'un résultat, et donc de quantifier des "risques" de faible efficacité des CIPAN ou d'effets indésirables, en fonction des conditions ou des pratiques.

Volets 2 et 3 : Les simulations complémentaires, sur les phases de levée et de destruction des couverts

Le 2^e volet étudie la **phase de semis-levée** des CIPAN, phase d'installation dont dépend ensuite l'efficacité de "piège à nitrate" du couvert. Les simulations, réalisées à l'aide d'un modèle spécifique, SIMPLE, permettent d'évaluer les effets de différents facteurs (date de semis, technique d'implantation, type de sol et climat) sur les taux de germination et de levée des CI.

Le 3^e volet, portant sur la **phase de destruction** des CIPAN, vise à évaluer les "jours potentiellement disponibles" à l'automne pour réaliser une destruction mécanique du couvert sans risque de dégradation du sol (par tassement) lors de l'opération. L'esti-

mation est réalisée par type de sol, sur des critères d'état d'humidité du sol (simulée avec STICS), sans prise en compte des contraintes d'organisation du travail sur l'exploitation.

Préalablement à ce travail de simulation, la qualité prédictive des modèles STICS et SIMPLE a été évaluée et leur domaine de validité déterminé, pour simuler aussi bien les grandes cultures que les cultures intermédiaires, et s'assurer que la dynamique des processus prépondérants était correctement représentée. Les performances étant satisfaisantes, les modèles ont alors pu être utilisés pour réaliser des "expérimentations numériques". Toutefois, certaines conditions, en dehors du domaine de validité des modèles, n'ont pas fait l'objet de simulations afin d'éviter l'obtention de résultats incertains : 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 plus de 45% d'argile. Enfin, les facteurs biotiques (effets de pathogènes et de ravageurs des CIPAN) ne sont pas pris en compte dans les simulations.

3. Les principaux enseignements

De manière générale, les enseignements des simulations confirment complètement ceux de la bibliographie, aussi bien pour le développement des couverts, l'absorption d'azote, la dynamique de l'eau et de l'azote du sol, que ses effets sur la culture suivante, en précisant les impacts pour une large gamme de pédoclimats français.

L'efficacité "piège à nitrate" des couverts

- Les CIPAN sont efficaces pour réduire la teneur en nitrate de l'eau de drainage (sauf pour les cas d'interculture longue après récolte tardive)

Malgré la variabilité interannuelle due au climat, les simulations montrent une efficacité incontestable des CIPAN non légumineuses pour réduire la lixiviation et la concentration nitrrique de l'eau, aussi bien en situation d'interculture courte (succession de type colza-blé) que longue (succession de type blé-mais) ; ce n'est en revanche pas le cas pour les intercultures longues à récolte tardive (succession maïs-mais) (voir rapport).

Situations et conduites de l'interculture simulées

Les **situations** sélectionnées permettent de simuler une large gamme de contextes pédoclimatiques et agronomiques. Elles reposent sur le choix :

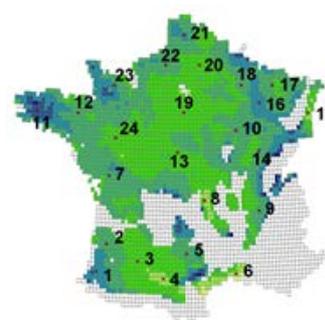
- de 24 sites localisés en zone vulnérable "Nitrate", pour lesquels 20 années de climat (données Météo-France) sont considérées ;
- de différents types de sols (sableux, limoneux et argileux), représentatifs de chaque site-région considéré ;
- de 3 successions culturales, correspondant à différents types d'interculture : Blé-mais (interculture longue), Colza-blé (interculture courte) et Maïs-mais (interculture longue après récolte tardive). Ces 3 successions-types sont présentes sur tout le territoire - avec des variantes régionales (blé tendre ou dur, et maïs grain ou fourrage).

Les **modes de gestion** de l'interculture simulés sont :

- le sol laissé "nu" (sans CIPAN) durant l'interculture, avec différentes gestions des résidus de la culture précédente (laissés à la surface du sol, exportés ou enfouis) ;
- 5 types de couverts intermédiaires : 3 espèces de CIPAN semées (une crucifère : la moutarde blanche, une graminée : le ray-grass

italien, et une légumineuse : la vesce) ; des repousses de colza ou de blé (avec 2 hypothèses de densité de couvert) ;

- différents itinéraires techniques : plusieurs dates d'implantation et de destruction de la CI ; 3 niveaux de reliquat d'azote minéral du sol à la récolte du précédent (20, 60 et 100 kgN/ha) ; un apport de fertilisation organique (lisier de porc).



Localisation des 24 sites climatiques

Du vert clair au bleu foncé : indicateur de drainage potentiel croissant (classes de [Pluie - ETP] de août à mars).

En gris : territoire hors zone vulnérable "Nitrate"

Cette efficacité des CIPAN :

- est avérée pour les trois niveaux initiaux d'azote simulés, donc même lorsque le reliquat initial est faible (car même dans ce cas *a priori* favorable, des quantités de nitrate importantes peuvent être produites par la minéralisation durant l'été et l'automne). Elle est plus faible si le reliquat initial est élevé : malgré leur capacité de piéger beaucoup d'azote, les CIPAN ne peuvent corriger totalement de très forts reliquats ;

- est plus forte en site pluvieux (drainage et lixiviation élevés), en interculture longue (durée de croissance des couverts supérieure), en sols superficiels et sableux (plus sensibles au drainage et donc à la lixiviation), et si la CI se développe précocement ;

- dépend davantage de la date de levée que de la date de destruction, excepté si la durée de croissance est inférieure à 2 mois. En interculture courte, elle tient à la capacité de la CIPAN à absorber l'azote en septembre et octobre, période de forte minéralisation (sols chauds et humides).

Pour les CIPAN non-légumineuses et l'ensemble des sites, la réduction de la concentration nitrique de l'eau est généralement supérieure à 50% (et peut dépasser 75% dans un grand nombre de situations pluvieuses) pour des dates optimales de levée et de destruction (dates qui diffèrent selon le pédoclimat). En conséquence, la concentration nitrique de l'eau de drainage est inférieure à 50 mg NO₃/l dans la majorité des situations.

- Les légumineuses peuvent être utiles pour réduire les fuites de nitrate même si leur efficacité est deux fois plus faible que celle des espèces non légumineuses (crucifères et graminées)

Les simulations indiquent que la moutarde (crucifère) et le ray-grass d'Italie (graminée) présentent des efficacités comparables pour réduire la teneur en nitrate des eaux, pour des dates de levée identiques. La moutarde, de par son développement plus rapide et sa meilleure capacité d'enracinement en profondeur, est toutefois plus efficace en cas de durée de croissance réduite (interculture courte ou semis tardif en septembre) ou de sol profond.

La vesce (légumineuse) présente une efficacité environ deux fois plus faible pour réduire la lixiviation que la moutarde et le ray-grass – tout en ayant une consommation hydrique aussi forte. L'azote qu'elle acquiert provenant en majeure partie de la fixation symbiotique, la légumineuse absorbe en effet moins l'azote minéral disponible dans le sol. S'ils ne sont pas les plus efficaces, les couverts de légumineuses s'avèrent néanmoins utiles pour réduire la concentration nitrique des eaux, et sont donc préférables à un sol laissé nu (sans plantes).

D'après la bibliographie, les mélanges d'espèces légumineuse et non-légumineuse présentent une efficacité CIPAN intermédiaire entre celles de ses composantes.

- 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 simulations indiquent que les repousses de colza et de blé sont efficaces pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage, si le couvert est suffisamment dense et homogène spatialement. Dans ce cas, les repousses de colza s'avèrent quasiment aussi efficaces qu'une moutarde semée, et les repousses de blé qu'un ray-grass d'Italie. En revanche, des repousses peu denses et réparties de façon hétérogène dans l'espace (en "bandes" de couvert, sous le passage de la moissonneuse, alternant avec du sol nu) sont en moyenne deux fois moins efficaces que des repousses denses et homogènes.

Le taux de couverture du sol, dont dépend l'efficacité des repousses, est déterminé par l'importance et la répartition spatiale des pertes de grains à la récolte du colza ou de la céréale. On ne dispose pas d'enquête statistique sur les caractéristiques des couverts de repousses dans les parcelles agricoles. Les repousses de colza, en raison des chutes de graines avant récolte, sont souvent denses et couvrent toute la surface du sol. Pour les céréales, la densité et la couverture sont plus variables.

Les repousses sont l'option technique la moins onéreuse, mais elles présentent l'inconvénient de ne pas permettre de choisir la date de la levée, qui peut donc intervenir à une période défavorable, trop sèche ; cette technique induit également des risques phytosanitaires, par l'effet hôte pour des ravageurs et surtout des maladies qui affectent les cultures de la rotation.

L'interculture après maïs (en rotation ou monoculture)

- L'inefficacité des CIPAN après maïs grain impose une gestion très stricte de la fertilisation azotée pour éviter des pertes de nitrate

Après **maïs fourrage** (récolté de mi à fin septembre), l'efficacité des CIPAN est significative : la réduction médiane de la concentration nitrique est de 35% pour la moutarde et 25% pour le ray-grass ; elle approche 50% dans la moitié Sud où la croissance des CIPAN peut être significative à l'automne.

Après **maïs grain** (récolté de mi à fin octobre), les CIPAN sont inefficaces (réduction de la concentration nitrique inférieure à 10%) car leur croissance est trop limitée à l'automne, du fait du semis tardif. Toutefois, en climat méditerranéen, la période de végétation allongée permet avec la moutarde une réduction non négligeable de la concentration nitrique, de 30% en médiane. L'inefficacité des CIPAN impose de gérer strictement la fertilisation azotée ; une autre option, non étudiée ici et qui reste à optimiser, consisterait à pratiquer un semis de la CIPAN sous couvert du maïs, voire à semer des variétés de maïs plus précoces.

- 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 étant inefficaces après maïs grain, la gestion des résidus de la culture se pose comme alternative. Les simulations indiquent qu'un mulch de cannes de maïs broyées est sans effet sur la lixiviation, alors que l'enfouissement entraîne une organisation nette d'azote du sol qui induit une légère réduction de la lixiviation (-5 kgN/ha) et de la concentration nitrique des eaux (de l'ordre de 5 à 10%).

Vis-à-vis de la lixiviation et même si l'effet est modeste, l'incorporation au sol des cannes de maïs grain broyées juste après la récolte est préférable au mulch ; elle l'est aussi sur le plan phytosanitaire. *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), et assure une certaine protection du sol.

Les résultats sont comparables pour les résidus de blé. Le mulch de pailles est sans effet sur la lixiviation, alors que l'enfouissement après broyage induit une réduction modérée des pertes de nitrate (d'environ 20 kgN/ha en moyenne) et de la concentration nitrique (de l'ordre de 20 mgNO₃/l) : l'effet d'organisation d'azote est un peu plus fort que pour le maïs, le C/N des pailles étant supérieur à celui des cannes.

Le cas des sols argileux

- Les jours potentiellement disponibles pour la destruction des CIPAN à l'automne ne sont pas un facteur limitant drastique pour réaliser l'intervention, sauf en sol argileux (> 37% d'argile)

Le nombre de jours potentiellement disponibles (définis uniquement sur des critères d'état hydrique du sol) pour réaliser une destruction mécanique à l'automne n'est pas ou peu limitant en sols sableux et limoneux. Ce nombre décroît en revanche, avec l'avancée du calendrier, pour les sols limono-argileux.

Pour les sols argileux (taux d'argile de 37 à 43%), moins d'un tiers des jours sont disponibles à partir de début novembre ; une destruction du couvert fin octobre est donc préférable. Les sols à taux d'argile > 45% n'ont pas été simulés car leur comportement physique est plus difficile à modéliser ; ils sont toutefois peu représentés en grande culture car peu adaptés à celle-ci.

- Sur les sols argileux labourés à l'automne, des CIPAN même détruites précocement restent généralement efficaces pour réduire les fuites de nitrate

Une destruction précoce (mi à fin octobre) de la CIPAN, qu'elle intervienne pour permettre le travail des sols argileux ou le semis d'une culture d'hiver (interculture courte), n'est pas réhibitoire : une CIPAN à croissance rapide (crucifère) reste efficace si elle demeure en place au moins 2 mois (levée fin juillet ou août).

Cette efficacité est en moyenne plus faible en cas de fort reliquat initial d'azote, mais la réduction de la teneur en nitrate de l'eau reste intéressante (souvent > 50%), rendant la CIPAN très utile.

L'adaptation au climat, notamment méditerranéen

- La réussite de l'implantation de la CIPAN nécessite d'adapter la date de semis pour réduire les échecs de semis

Les simulations avec le modèle SIMPLE indiquent qu'en général, la levée des CIPAN est potentiellement suffisante (taux de levée des graines > 75%) pour avoir une implantation correcte, quelles que soient l'espèce et la technique de semis. Les cas de levée insuffisante (taux < 50%) ont lieu sous les différents climats mais avec une fréquence faible, de l'ordre de moins d'une année sur dix pour les sites septentrionaux, et de deux années sur dix dans le Sud-Ouest. En climat méditerranéen, la levée présente une forte variabilité interannuelle avec des échecs (taux < 25%) environ deux années sur dix et une faible levée (taux < 50%) environ quatre années sur dix ; les levées faibles se produisent surtout en semis précoce ; les semis plus tardifs, au 15 septembre, sont plus efficaces.

Il faut noter que le modèle utilisé ne prend pas en compte les dégâts éventuels causés par des bioagresseurs. Or ravageurs et pathogènes peuvent occasionner des pertes ponctuellement importantes, les semences n'étant généralement pas traitées.

- En climat méditerranéen, les problèmes de levée ne remettent pas en cause l'intérêt des CIPAN pour réduire les fuites de nitrate les années "drainantes"

En climat méditerranéen, le semis début septembre permet d'éviter les forts stress hydriques de fin d'été et d'accroître les chances de réussite de levée de la CIPAN, et sa capacité ultérieure d'absorption d'azote. Les simulations indiquent aussi qu'une destruction précoce (avant la mi-décembre), en réduisant les consommations d'azote et d'eau du couvert, permet d'éviter

les effets négatifs sur la culture suivante, et de limiter la réduction du drainage et donc de la recharge en eau des nappes.

En zone méditerranéenne, l'implantation systématique de CIPAN, en particulier en interculture longue, apparaît comme une option intéressante pour réduire la pollution nitrique : les CIPAN pourront certes s'avérer inutiles les années où le drainage est nul ou très faible (environ une année sur deux), mais elles auront une forte efficacité (réduction de la concentration nitrique de l'eau > 75%) les années humides (drainage > 100 mm).

Les impacts sur la culture suivante et la recharge des nappes

- Les cultures intermédiaires réduisent le drainage mais n'ont pas d'impact sur l'alimentation hydrique de la culture suivante si la date de destruction est adaptée

Les CIPAN induisent quasi systématiquement une réduction du drainage annuel, de l'ordre de 30 mm en médiane (variant de 0 à 80 mm), du fait de leur consommation d'eau et bien que l'évaporation du sol soit plus faible sous couvert. Cette réduction du drainage est proportionnellement d'autant plus forte que le climat est "sec" (faible drainage). La CIPAN n'a toutefois généralement pas d'impact sur l'alimentation hydrique de la culture suivante, les précipitations rechargeant la réserve en eau du sol, excepté en situation peu pluvieuse si la destruction intervient peu de temps avant le semis de la culture suivante.

Cette réduction du drainage représente moins de 10% de l'eau drainée dans la plupart des sites pédoclimatiques, mais peut atteindre 25% certaines années dans les sites à faible pluviosité hivernale. Un usage généralisé des CIPAN sur un territoire donné peut donc potentiellement réduire la recharge des nappes dans les situations hydrogéologiques où celle-ci dépend surtout du drainage sous cultures.

- 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

La comparaison des rendements simulés sans ou après CIPAN montre des effets globalement positifs de la CI pour la culture suivante en interculture longue, mais aussi après maïs fourrage (interculture longue après une récolte semi-tardive). L'augmentation du rendement est cependant modérée (en médiane de 1 à 8% selon les sites climatiques). L'effet est quasi nul après maïs grain, en raison du peu d'azote absorbé par la CIPAN.

En interculture courte, avec la moutarde et le ray-grass, des effets négatifs sur le rendement du blé sont simulés, notamment lorsque le reliquat initial d'azote est faible (effet de préemption). Ces effets dépressifs simulés sont d'autant moins importants que l'azote minéral initial du sol est élevé, que le site est pluvieux et que la date de destruction de la CIPAN est tardive.

Contrairement aux deux autres espèces considérées, la vesce induit un effet positif quasi-systématique et très significatif sur le rendement de la culture suivante. En situation d'interculture courte et d'état initial pauvre en azote, la vesce (qui "fait entrer" de l'azote exogène par fixation symbiotique) a un effet positif dans 75% des cas simulés. En conséquence, semer un mélange d'espèces comportant une légumineuse, voire une légumineuse pure, pourrait permettre de réduire les effets négatifs sur la culture suivante.

Les CIPAN et la gestion de la fertilisation

- Les cultures intermédiaires ne sont vraiment efficaces que si la fertilisation azotée de la culture précédente, bien ajustée, n'a laissé qu'un reliquat à la récolte faible ou modéré

Les CIPAN permettent de corriger efficacement des situations de reliquats à la récolte faibles à modérés (cas de l'état initial à 60 kgN/ha), en interculture courte et longue, mais cependant pas après maïs grain. Malgré leur forte capacité de piégeage, les CIPAN non-légumineuses, et *a fortiori* les légumineuses, ne permettent pas de restituer systématiquement une eau de drainage à moins de 50 mgNO₃/l, en cas de fort excès initial d'azote (état initial à 100 kgN/ha).

Ces résultats soulignent, si besoin était, la nécessité d'ajuster, sur la base d'un bilan d'azote prévisionnel, la fertilisation azotée des cultures principales comme un préalable à la maîtrise des fuites de nitrate, pour éviter des reliquats à la récolte trop élevés, en particulier localisés en profondeur dans le sol, qui ne seraient pas "récupérables" par la CIPAN ou des repousses de culture précédente. La CIPAN permet de compléter efficacement la gestion de l'azote en interculture pour restituer une eau de drainage nettement moins chargée en nitrate.

- 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'épandage de lisier de porc (effluent retenu pour les simulations en raison de sa forte teneur en azote minéral et de sa fraction organique facilement "minéralisable") accroît fortement les concentrations nitriques en situation de sol nu.

La CIPAN est efficace pour réduire la concentration nitrique sous réserve du respect impératif de 4 conditions : 1) un reliquat initial

d'azote faible (de l'ordre de 20 kgN/ha sur 90 cm) ; 2) le semis, de préférence, d'une crucifère, à croissance rapide ; 3) la maximisation des chances d'obtenir une levée forte et homogène spatialement, ou la vérification préalable que la CIPAN a bien levé avant d'épandre du lisier ; 4) la limitation de la dose de lisier de sorte que l'apport d'azote total n'excède pas 75 kgN/ha.

Les compatibilités ou arbitrages entre piégeage de nitrate et autres services écosystémiques

Plusieurs fonctions écosystémiques peuvent être remplies de façon concomitante par une CIPAN, avec plus ou moins d'efficacité selon l'espèce et l'itinéraire technique. Dans certains cas toutefois, des arbitrages entre services recherchés sont nécessaires en fonction des priorités locales, se traduisant notamment par une adaptation des dates de semis puis des dates et modes de destruction.

Ainsi par exemple, les **faux-semis** s'avèrent compatibles avec une CIPAN à condition d'en décaler le semis de 2 ou 3 semaines pour réaliser au préalable un travail du sol ; avec une levée fin août, voire mi-septembre (dans le Sud), la CIPAN conserve une efficacité (certes sub-maximale) pour réduire la concentration nitrique de l'eau. Une destruction à l'automne du couvert élimine aussi, avant qu'elles ne grainent, les adventices ayant germé plus tard.

Sur les **terrains en pente**, un arbitrage peut en revanche être nécessaire entre, d'une part, les fonctions "piège à nitrate" et surtout "anti-érosion" qui conduisent à privilégier une destruction de la CIPAN après l'hiver, et, d'autre part, un objectif de recharge des nappes (que la CIPAN peut aussi favoriser en réduisant le ruissellement au profit de l'infiltration de l'eau).

Démarche pour optimiser les itinéraires techniques de CIPAN

Il est possible de définir a posteriori des itinéraires techniques optimaux à partir des résultats des simulations, en les soumettant à une analyse multicritère, qui combine plusieurs paramètres de l'efficacité des CIPAN ou d'autres effets choisis en fonction des enjeux locaux. L'objectif est de déterminer les **couples de dates de levée et de destruction** permettant d'obtenir les meilleures performances conjointes à l'échelle des 20 années de simulation. On procède par sélection des dates permettant de satisfaire des critères appliqués successivement :

- Une efficacité forte de la CIPAN, caractérisée par une teneur moyenne interannuelle des eaux de drainage < 50 mgNO₃/l et un taux de réduction > 75% du taux maximal obtenu pour la combinaison de dates levée-destruction la plus efficace,
- Pas d'impact négatif sur le rendement de la culture suivante,

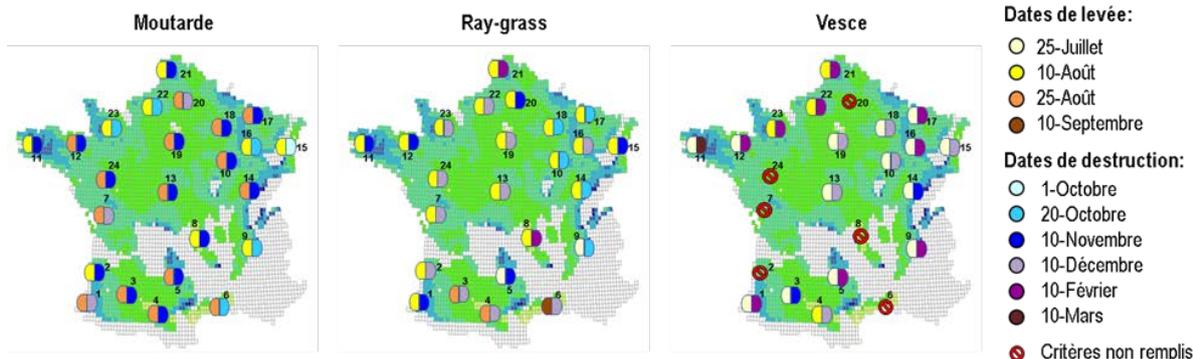
3. Une régularité d'efficacité des CI, qualifiée par une probabilité faible (< 15% ou probabilité la plus faible + 5%) d'obtenir un taux de réduction de la concentration nitrique inférieur à 50%,

4. Une réduction du drainage la plus faible possible pour limiter l'impact sur la recharge en eau des nappes.

Avec ces critères et ce choix, exigeant, de seuils d'efficacité :

- la vesce ne permet pas de satisfaire les critères de concentration nitrique de l'eau lorsque le niveau initial est élevé,
- les dates de levée optimales sont, en fréquence sur 20 ans, le 10 ou le 25 août (pour cette analyse spécifique),
- les dates de destruction optimales sont précoces à l'automne.

Les couples de dates optimales ainsi sélectionnés montrent l'importance des conditions climatiques, de l'espèce de CIPAN et du reliquat d'azote minéral.



Dates optimales de levée et de destruction des CIPAN pour l'état initial en azote minéral 2.

Conclusion et perspectives

L'étude par simulations a permis d'élargir les "références" et de quantifier des effets des CIPAN pour une large gamme de systèmes de culture, de conditions pédoclimatiques et de modes de conduite de l'interculture, complétant ainsi les données expérimentales disponibles. L'objectif était de produire des informations complémentaires ; il revient maintenant aux acteurs, pouvoirs publics et professionnels agricoles, de les mobiliser dans leurs processus de décisions qu'il s'agit d'adapter aux spécificités locales.

Une efficacité des CIPAN confirmée et des conditions de mise en œuvre précisées

- **Les CIPAN sont nécessaires**, y compris lorsqu'une fertilisation bien raisonnée de la culture précédente laisse peu de nitrate, puisque la minéralisation des matières organiques du sol produit en continu de l'azote, qui peut alors être lixivié. Aucun apport d'engrais azoté de synthèse sur la CIPAN ne saurait être justifié pour accroître son efficacité de "piège à nitrate" ; cela ne ferait qu'augmenter le stock d'azote lixiviable.
- **Les cultures intermédiaires non-légumineuses sont incontestablement efficaces en tant que CIPAN**, pour une très large proportion des conditions simulées. Cette efficacité est vérifiée aussi bien en interculture courte qu'en interculture longue, et pour des dates de destruction précoces (en octobre). Elle est moindre pour les couverts de légumineuses. Elle existe aussi en cas d'épandage de produits organiques, mais sous condition de faible reliquat préalable. Elle est insuffisante après maïs grain, où la maîtrise de la fertilisation azotée est fondamentale.
- **Les itinéraires techniques doivent 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 de la gestion 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

Les études conduites par la Délégation à l'expertise scientifique, à la prospective et aux études (DEPE) de l'INRA sont des exercices dérivés de l'expérience de l'Expertise scientifique collective, activité encadrée par une Charte de l'expertise. Ces études sont conduites à la demande de commanditaires publics, sous la responsabilité de l'INRA, par un groupe pluridisciplinaire d'experts scientifiques chargés d'analyser collectivement la bibliographie internationale pour en extraire les connaissances utiles pour éclairer des questions posées par des gestionnaires publics. Dans les études, l'analyse bibliographique est complétée par un traitement original de données et/ou un travail de simulations. Ces études ne formulent ni avis, ni recommandations.

Pour cette étude, le collectif d'experts était constitué de 16 chercheurs représentant diverses disciplines (sciences du sol, agronomie, protection des cultures, droit...) et appartenant aux organismes de recherche ou d'enseignement supérieur suivants : INRA, IRSTEA, ENSAT, Université de Toulouse, Agroscope (Suisse). Des experts de terrain des Instituts techniques et des Chambres d'Agriculture ont été consultés pour l'étude par simulation.

l'une des composantes de la (re)conception de systèmes de culture plus respectueux de l'environnement et valorisant les services écosystémiques.

Des besoins de recherche - développement

Si l'étude a confirmé l'efficacité des CIPAN et ses déterminants majeurs, elle a aussi mis en évidence un besoin d'approfondissement de certaines connaissances et la nécessité de développer des recherches coordonnées, notamment sur :

- les propriétés des espèces utilisables en CIPAN, leurs impacts sur les bioagresseurs des cultures principales, leur diversification et leur amélioration par une sélection génétique ciblée ;
- la diversification et l'optimisation des itinéraires techniques des CIPAN : emploi de légumineuses ou de mélanges d'espèces pour optimiser conjointement effets "piège à nitrate" et "engrais vert", pratique du semis sous couvert de la culture précédente, adaptation aux systèmes sans labour, conception d'outils d'aide à la décision pour optimiser les itinéraires techniques ;
- l'impact de la généralisation des CIPAN sur les ressources en eau ;
- les effets du changement climatique sur leur efficacité ;
- l'analyse coût-bénéfice des cultures intermédiaires en considérant l'ensemble de leurs fonctions et l'étude des politiques publiques les plus efficaces pour leur mise en œuvre.

Etude réalisée par l'INRA à la demande des ministères chargés de l'Ecologie et de l'Agriculture



Pour en savoir plus :

Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebize J., Savini I., Réchauchère O., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 60 p.

Cette note courte, la synthèse ainsi que le rapport d'étude complet sont disponibles gratuitement sur le site internet de l'INRA (www.inra.fr).

Contacts :

Eric Justes, INRA, responsable scientifique de l'étude :
Eric.Justes@toulouse.inra.fr

Olivier Réchauchère, INRA-DEPE, chef de projet de l'étude :
Olivier.Rechauchere@paris.inra.fr

Philippe Chemineau, INRA, directeur de la DEPE :
Philippe.Chemineau@paris.inra.fr