



Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires

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

Synthèse de l'étude réalisée par l'INRA à la demande
des ministères en charge de l'Écologie et de l'Agriculture

Responsable scientifique :

Eric Justes - INRA, département Environnement et agronomie, Unité Agrosystèmes et Agricultures, Gestion de ressources, Innovation et Ruralité (AGIR)

Coordination éditoriale :

Olivier Réchauchère et Isabelle Savini - INRA, DEPE

Directeur de la publication :

Philippe Chemineau - INRA, Directeur de la Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes (DEPE)

Contacts :

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

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

Le présent document constitue la synthèse de l'étude sollicitée conjointement par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie et le Ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire et subventionnée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (étude n° 2100450303). Son contenu n'engage que la responsabilité de ses auteurs.

Le rapport d'étude, source de cette synthèse, a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou l'INRA. La synthèse a été validée par les auteurs du rapport.

Ces documents sont disponibles sur le site web institutionnel de l'INRA (www.inra.fr).

Pour citer ce document :

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.

Conception graphique de la couverture : Erebus Studio

Conception graphique du bandeau : Véronique Gavalda ; photos : Sandor Jackal (Fotolia), Eric Justes (INRA), Eric Venet (INRA)



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

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.

Juin 2012

Sommaire

Avant propos	3
1. Contexte et méthodologie de l'étude	5
1.1. L'interculture : définition, pratiques de gestion et aspects réglementaires	5
1.2. Objectifs et démarche de l'étude	10
2. Principaux enseignements de l'étude bibliographique	12
2.1. Les itinéraires techniques des cultures intermédiaires	12
2.2. Nitrate et eau en période d'interculture	15
2.3. Effets des cultures intermédiaires sur l'érosion, les propriétés physiques du sol et le bilan carbone	20
2.4. Effets biotiques des cultures intermédiaires sur les adventices, la microflore et la faune	22
2.5. Conclusion : une analyse bibliographique riche mais incomplète	27
3. Principaux enseignements de l'étude par simulation	29
3.1. Objectifs de l'étude par simulation au moyen d'un modèle dynamique de culture	29
3.2. Méthodologie des trois volets de l'étude par simulation	30
3.3. Les enseignements génériques et spécifiques de l'étude par simulation	37
3.4. Discussion des résultats de l'étude	49
4. Conclusions et perspectives	57

La composition du collectif d'experts et de l'équipe projet de l'étude figure en page 3 de couverture.

Le collectif d'experts souhaite dédier ce travail à la mémoire de Nadine Cohen-Brisson (INRA Avignon) et de Fruck Dorsainvil (Faculté Agronomie Haïti), qui nous ont quittés beaucoup trop tôt, respectivement en 2011 et 2010.

Nadine a été la conceptrice initiale du modèle de culture STICS et a su fédérer les collègues de l'INRA et d'autres organismes français pour construire, paramétrer et "valider" un modèle de culture français, ayant ses spécificités, et qui a obtenu la reconnaissance de la communauté internationale des agronomes-modélisateurs. Durant près de 20 ans, Nadine n'a eu de cesse de porter haut l'exigence de généricité et de robustesse du modèle STICS dans un esprit d'ouverture et d'amélioration continue de ses performances et de son domaine de validité. Sans sa perspicacité, sa remarquable intelligence et son insatiable joie de vivre très communicative, le travail de simulation réalisé dans cette étude n'aurait pas pu être réalisé, au moins sous sa forme actuelle et avec une telle confiance dans la qualité des résultats simulés. Tu nous as laissé un héritage scientifique riche que la communauté des modélisateurs se fait un devoir de promouvoir. Immense respect à toi Nadine, la scientifique et la femme. Nous espérons pouvoir être à la hauteur de ton engagement dans l'agronomie française et internationale.

Fruck était ingénieur agronome haïtien à son arrivée en France, et a réalisé son travail de thèse sur les cultures intermédiaires pièges à nitrate à l'unité d'Agronomie de Reims sous la direction d'Eric Justes et de Jean-Marc Meynard (directeur de thèse). Fruck a fait preuve d'un courage exceptionnel, de capacités d'adaptation hors du commun et d'une grande perspicacité pour conduire son travail de thèse sur cette problématique totalement inconnue pour lui. Il a goûté aux joies des prélèvements de cultures intermédiaires gelées en Champagne..., et à l'apprentissage de la modélisation. Son travail a permis de développer des formalismes spécifiques pour les cultures intermédiaires, avec l'appui complice et toujours aussi efficace de Nadine. Fruck, de retour en Haïti, a œuvré pour le développement agricole de son pays qu'il aimait tant et auquel il avait décidé de consacrer son enthousiasme et son intelligence. Tu ne méritais pas que les entrailles de la terre t'emportent lors de ce terrible tremblement de terre en 2010 car tu avais encore tant à apporter à l'agronomie de ton pays.

Nadine et Fruck, nous n'oublierons jamais votre joie de vivre et votre perspicacité !

Avant propos

La présence de nitrate en excès dans les eaux de surface et les nappes phréatiques pose des problèmes de santé publique et de dégradation de l'environnement. C'est d'abord un enjeu de santé publique notamment pour les nappes phréatiques, avec la nécessité de distribuer une eau de boisson présentant une teneur inférieure à la norme de potabilité de l'eau qui est de 50 mg de nitrate par litre. C'est aussi un enjeu de protection de l'environnement pour les eaux de surface, en particulier pour certains bassins versants proches de la mer, comme en Bretagne ; le transport rapide du nitrate des zones agricoles vers la mer induit une eutrophisation des zones côtières.

L'essentiel de ce nitrate provient des agrosystèmes, du fait des excès de fertilisation azotée mais aussi de la production naturelle de nitrate par minéralisation des matières organiques du sol. Le nitrate présent dans le sol est en effet susceptible d'être entraîné en profondeur hors de la zone explorée par les racines des cultures, suite au drainage des eaux de pluie à travers le sol, phénomène appelé lixiviation ou plus communément lessivage par abus de langage. Or la période où le drainage est le plus important (automne-hiver) correspond également, en climat tempéré, à une période où le sol peut se retrouver sans culture (sol nu), après la récolte d'une culture à l'été ou à l'automne et avant l'implantation d'une culture suivante à l'automne ou au printemps. Il importe donc de minimiser la quantité de nitrate présente dans le sol au début de la période de drainage afin de réduire la lixiviation. L'introduction d'une culture intermédiaire permet de piéger une partie de ce nitrate, qui est restitué ensuite au sol dans les semaines qui suivent la destruction de la culture intermédiaire, et sera ensuite partiellement disponible pour la culture principale suivante.

Ce principe général de piégeage de nitrate durant l'interculture est bien connu, mais la dynamique des processus du cycle de l'azote et leur quantification précise à l'échelle locale est beaucoup plus difficile. En effet, l'efficacité des "cultures intermédiaires piège à nitrate" (CIPAN) dépend de nombreux facteurs qui présentent une forte variabilité. La quantité de nitrate présente dans le sol durant l'interculture dépend non seulement des pratiques de fertilisation des agriculteurs, mais aussi des caractéristiques du sol et des conditions climatiques de l'année, qui déterminent la vitesse des processus de biotransformation de l'azote organique du sol en nitrate, par minéralisation puis nitrification. Par ailleurs, les conditions d'implantation et de destruction de la culture intermédiaire, qui vont en déterminer l'efficacité, sont très variables selon les conditions locales et les systèmes de culture pratiqués et peuvent poser des problèmes techniques ou d'organisation du travail. L'espèce de culture intermédiaire utilisée a également une grande importance vis-à-vis de l'efficacité de piégeage en interaction avec les conditions pédoclimatiques.

Les références techniques dont les pouvoirs publics disposent pour éclairer l'action publique reposent sur un ensemble de connaissances élaborées par le CORPEN, le COMIFER et l'ANDA il y a une dizaine d'années, complétées par quelques publications plus récentes des instituts techniques et des organismes de recherche. Pour la préparation du 5^e programme (qui débutera en 2013), les pouvoirs publics (ministères en charge de l'Agriculture et de l'Ecologie) souhaitent disposer d'un ensemble actualisé de connaissances et références agronomiques, afin de proposer des mesures les plus efficaces possibles pour lutter contre la pollution nitrique des eaux souterraines et de surface.

L'objectif principal de cette étude est donc d'établir un état objectif et le plus exhaustif possible des connaissances sur la gestion de l'azote en période d'interculture au moyen de cultures intermédiaires, pour les différents pédoclimats français en systèmes de grande culture, et les conséquences pour la culture suivante. Dans leur lettre de commande, les ministères chargés de l'Agriculture et de l'Ecologie sollicitent l'INRA pour établir "un état des connaissances sur la gestion de l'azote en période d'interculture en précisant les acquis, les incertitudes et les questions à approfondir dans une perspective de généralisation de la couverture végétale automnale des sols". Anticipant l'impossibilité d'atteindre cet objectif par l'examen seul de la bibliographie scientifique pour une gamme de situations pédoclimatiques décrivant une grande partie de la diversité du territoire métropolitain, les commanditaires ont retenu la proposition de l'INRA de compléter cet état des connaissances, basé sur l'analyse de la bibliographie internationale et technique française, par un travail de simulation ; l'étude par simulation a pour but d'élaborer des références pour toutes les situations françaises représentatives des grandes cultures, y compris celles qui ne sont pas considérées par les travaux de recherche

menés sur la base d'expérimentations et de mesures sur le terrain. Elle examine également des techniques de gestion de l'azote durant l'interculture autres que les cultures intermédiaires (repousses et gestion des résidus).

Par ailleurs, les cultures intermédiaires n'ont pas qu'un rôle de piège à nitrate. Elles ont d'autres effets, positifs ou négatifs à l'échelle de l'agrosystème, qui sont examinés ici grâce à une revue de la littérature scientifique.

Le présent document constitue ainsi une synthèse des principales conclusions de l'analyse bibliographique et des travaux de simulation à l'attention des décideurs et des parties prenantes que sont les praticiens de l'agriculture (agriculteurs et conseillers) et les gestionnaires de l'eau et de l'environnement. Cette synthèse a été conçue comme une clé facilitant l'accès aux différents chapitres du rapport d'étude, dont il suit assez fidèlement le plan et auquel il renvoie fréquemment sous forme de notes de bas de page. Ce document résume dans un premier temps (section 2) l'état des connaissances sur les principales fonctions agronomiques et écologiques des cultures intermédiaires, établi sur la base d'une analyse de la bibliographie scientifique et technique (sans citer les références bibliographiques qui figurent toutes dans le rapport), puis (section 3) les résultats majeurs des travaux de simulation qui visent à décliner différents modes de gestion de l'interculture pour une large gamme de situations pédoclimatiques représentatives de la France métropolitaine. Les résultats intermédiaires ou les analyses expliquant les résultats principaux présentés ici, ainsi que d'autres résultats complémentaires, sont détaillés dans le rapport de l'étude.

1. Contexte et méthodologie de l'étude

1.1. L'interculture : définition, pratiques de gestion et aspects réglementaires

1.1.1. Définitions

L'interculture est la période, dans la rotation culturale, qui se situe entre la récolte d'une culture principale (destinée à être récoltée) et le semis de la suivante (Figure 1). Sa durée varie selon les dates de récolte et de semis des cultures principales, de quelques jours dans le cas d'une récolte tardive du précédent suivie d'une culture d'hiver, à plusieurs mois (jusqu'à 9 mois) dans le cas d'une culture de printemps. Durant cette période, un sol laissé "nu" (sans plantes), en particulier dans le cas d'interculture longue, peut fortement augmenter le risque de lixiviation de l'ion nitrate vers les aquifères. L'implantation d'une culture intermédiaire¹ (CI) dite "piège à nitrate" (CIPAN) permet de réduire ce phénomène de transfert d'azote nitrique, dans des proportions variées selon le contexte pédoclimatique et le système de culture, de 20 à 90% par rapport à un sol nu. Cette large gamme d'efficacité doit être analysée en regard des facteurs déterminant le drainage et la lixiviation nitrique, et des autres fonctions des cultures intermédiaires, qui sont multiples.

Une culture intermédiaire est implantée entre deux cultures principales, de façon à rendre un certain nombre de services écosystémiques (agronomiques et écologiques) par des fonctions agro-écologiques qui peuvent être principalement de : i) réduire la lixiviation, ii) fournir de l'azote à la culture suivante, iii) réduire l'érosion, iv) améliorer la structure et les propriétés hydriques du sol, v) réduire la pression parasitaire sur les cultures, vi) empêcher le développement des adventices, vii) accroître la biodiversité du milieu paysage agricole (faune sauvage, abeilles...). Elles ne sont pas destinées à être récoltées et sont détruites (ou leur croissance est stoppée) avant l'implantation de la culture principale suivante. Leur biomasse est restituée au sol pour favoriser le recyclage d'éléments nutritifs pour la culture suivante et améliorer la fertilité physique, chimique et biologique du sol.

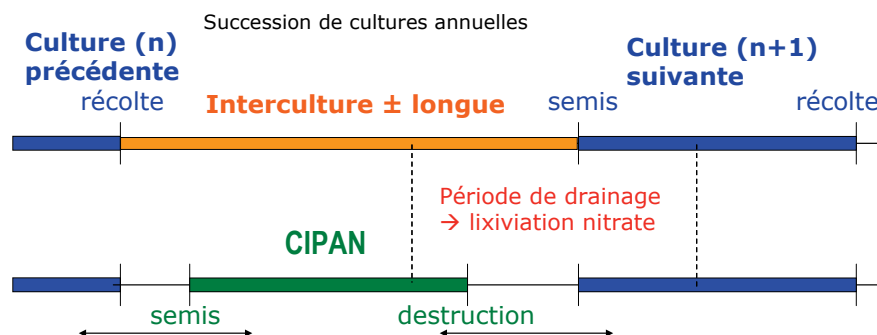


Figure 1. Représentation schématique de l'interculture dans une succession de cultures annuelles (en haut) et de l'implantation de culture intermédiaire durant cette période (en bas).

Lorsqu'une culture intermédiaire est implantée dans le but principal ou premier de réduire la lixiviation dans les situations où ce risque est élevé, on parle de culture intermédiaire piège à nitrate. Lorsque l'objectif principal est de fournir de l'azote à la culture suivante, donc plutôt dans un contexte de bas intrants, on parle d'engrais vert. Lorsque le but principal est de couvrir le sol afin de limiter l'érosion hydrique et/ou de jouer un rôle de structuration du sol *via* l'action des racines de la culture intermédiaire, on parle de culture de couverture. Il va de soi que les CIPAN peuvent remplir plusieurs fonctions agro-écologiques simultanément.

Les cultures intermédiaires, quels que soient leurs objectifs, se distinguent des cultures dérobées par le fait que ces dernières, bien qu'implantées entre deux cultures principales, ont pour finalité une production (graines ou fourrage) dans un temps réduit, alors que les cultures intermédiaires ne visent que l'atteinte de services agronomiques ou écologiques, sans exportation de la biomasse produite.

¹ Pour des précisions de vocabulaire, voir le rapport, chapitre1, section 1.3.1.

1.1.2 Les pratiques culturales

Les cultures intermédiaires sont le plus communément semées après la récolte de la culture principale précédente, bien qu'elles puissent aussi être semées sous couvert de cette culture principale. En post-récolte, ces cultures intermédiaires sont généralement semées de fin juillet à début septembre, pour une destruction allant de novembre à février de l'année calendaire suivante. Leur durée de végétation varie donc de 2 à 6 mois, selon les successions culturales et les régions. Leur destruction peut se faire naturellement par le gel, mécaniquement (broyage, labour, déchaumage) ou chimiquement par application d'un herbicide foliaire systémique (glyphosate par exemple), selon les espèces et la maturité du couvert végétal, mais aussi selon la réglementation en vigueur, qui interdit dans de nombreux cas le recours à une destruction chimique.

Les pratiques actuelles de conduite de l'interculture en France ont été étudiées à partir des informations recueillies par l'enquête "Pratiques culturales en grandes cultures" conduite en 2006 par le Service de la Statistique et de la Prospective du ministère en charge de l'Agriculture. Les résultats de la dernière enquête réalisée en 2011 n'étant pas encore disponibles, cet état des pratiques ne tient pas compte de l'impact de la directive de 2008 sur la couverture automnale des sols en "zones vulnérables Nitrates".

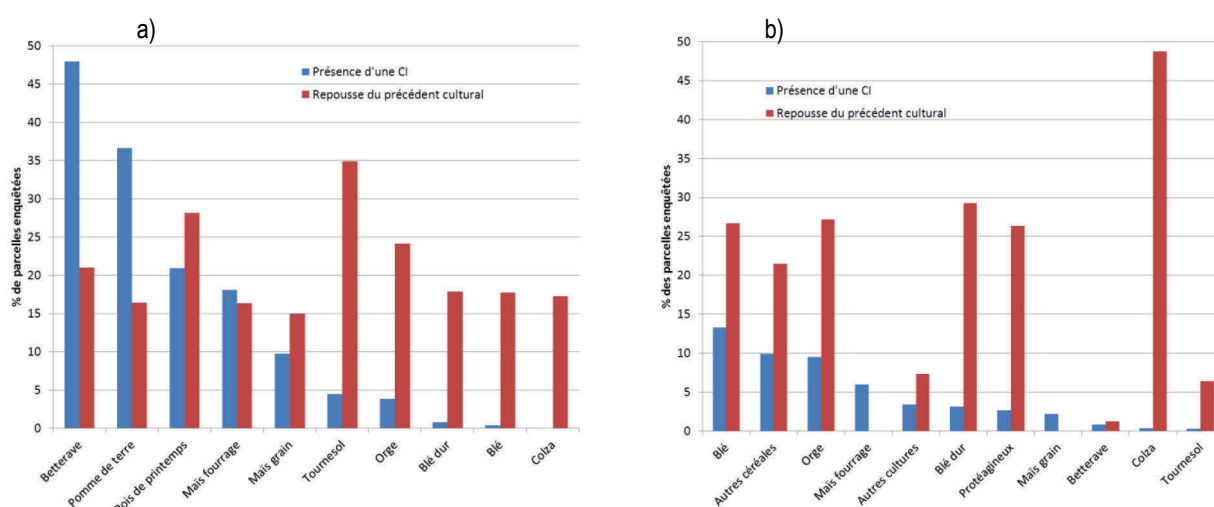


Figure 2. Part des parcelles implantées avec culture intermédiaire ou avec repousse du précédent cultural en fonction (a) de la culture suivante et (b) de la culture précédente ("Pratiques culturales en grandes cultures", enquête 2006).

Sur l'échantillon de l'enquête 2006, ce sont 7,8% des parcelles qui ont été implantées avec une CIPAN et 20% qui portent des repousses du précédent cultural. Les cultures intermédiaires sont majoritairement, à 66%, des crucifères (dont une large part de moutarde blanche ayant des propriétés "anti-nématode") contre 25% de graminées ; l'usage de mélanges d'espèces ou d'autres familles botaniques est peu répandu (4 à 5%). Les pratiques de couverture du sol pendant l'interculture s'avèrent très diversifiées, tant en termes d'importance (0 à 20%), que de modalités des pratiques culturales utilisées pour planter et détruire ces couverts végétaux intermédiaires (repousses et CIPAN), ou encore selon la région et les couples de cultures principales précédente – suivante. Concernant la destruction, l'enquête indique que le broyage et/ou l'enfouissement mécanique sont les principales techniques utilisées en France.

La mise en place d'une culture intermédiaire dépend de la culture qui lui succède (Figure 2-a) : ainsi en 2006, 48% des betteraves, 37% des pommes de terre, 21% des pois de printemps et 14% des maïs sont précédés d'une culture intermédiaire, ce qui représente une très nette augmentation par rapport à 2001 où ces pourcentages respectifs s'élevaient à 21%, 18%, 4% et 5% (Agreste Primeur, 2004). Toutefois, l'implantation d'une culture intermédiaire ne concerne encore que 4,5% des parcelles en tournesol (1% en 2001) et un peu moins de 4% des parcelles en orge de printemps.

Les cultures intermédiaires suivent très majoritairement des céréales à paille (13% des parcelles en blé, 10% des parcelles d'orge et 11% des parcelles en autres céréales portent une culture intermédiaire) et dans une moindre mesure la culture du maïs fourrage (6% des parcelles de maïs) (Figure 2-b).

La pratique consistant à laisser se développer les repousses du précédent cultural après récolte est restée globalement plus stable entre 2001 (18% des cultures annuelles) et 2006 (20%), bien que quelques évolutions se

soient produites. Les précédents culturels concernés sont majoritairement le colza (près de la moitié des parcelles de colza font l'objet de repousses), puis les céréales à paille (29% des parcelles avec un précédent blé dur, 27% de celles avec un précédent blé tendre ou orge et 21% de celles avec un précédent en autre céréale) et les protéagineux (26% des parcelles avec un précédent protéagineux) (Figure 2-b).

Une première typologie des pratiques culturales

L'analyse statistique sur l'échantillon enquêté en 2006 a abouti à la définition de huit types principaux de conduite des cultures intermédiaires. Ces huit conduites-types (Figure 3) correspondent à des combinaisons de pratiques culturales différenciées selon les régions et leurs orientations de production (grandes cultures, polyculture-élevage ou élevage).

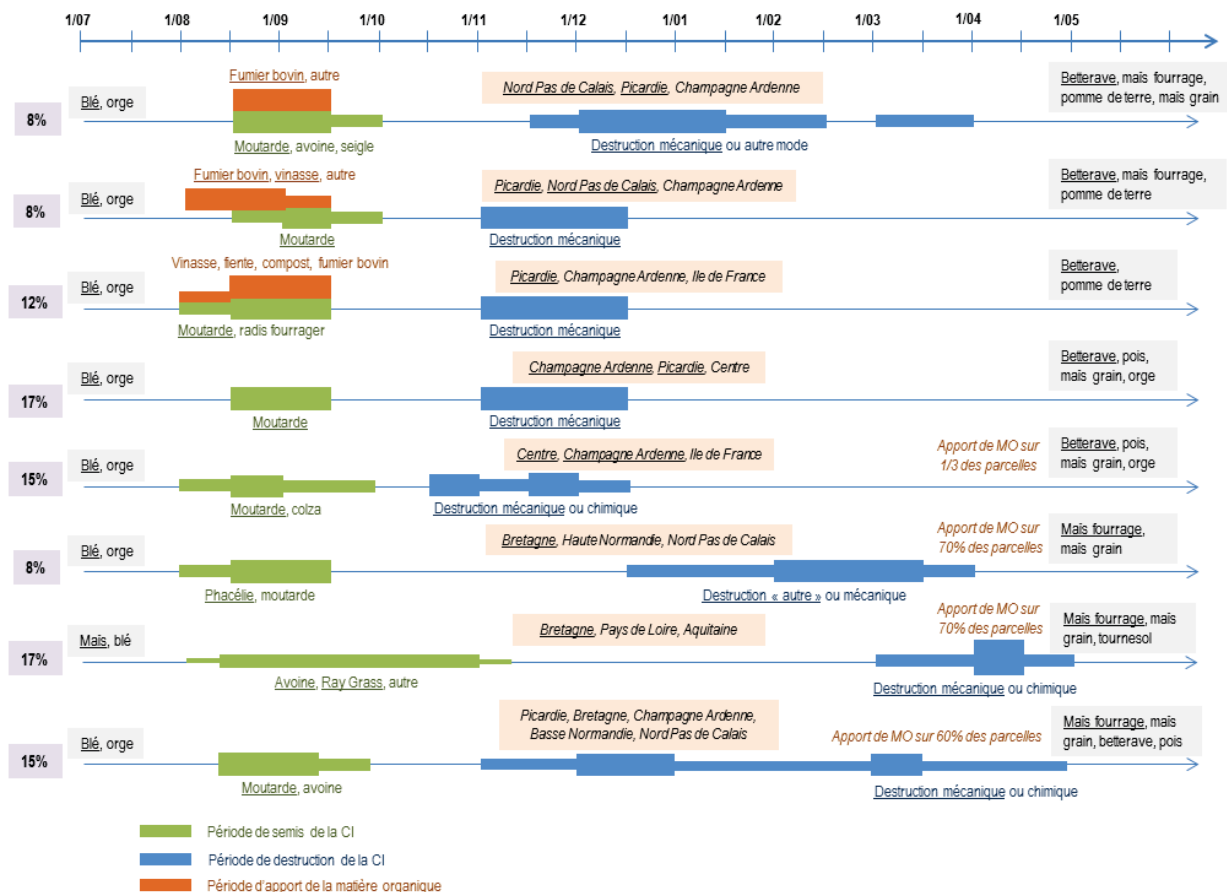


Figure 3. Caractérisation de 8 types de conduite des cultures intermédiaires par analyse statistique de l'enquête "Pratiques culturales" 2006

Globalement, les résultats majeurs sont les suivants :

- Le type 4, qui représente 17% des parcelles de l'échantillon, est caractéristique de la conduite d'une culture intermédiaire dans un contexte de grande culture de la moitié nord de la France : implantation d'une moutarde après un blé ou une orge, entre le 15 août et le 15 septembre, détruite mécaniquement entre le 1^{er} novembre et le 15 décembre, sans fumure organique, avant semis d'une betterave, d'un pois, d'un maïs grain ou d'une orge de printemps.
- Par rapport au type précédent, les types 1 à 3, caractéristiques de contextes de grandes cultures mais aussi de polyculture-élevage, reçoivent un apport de matière organique avant le semis de la culture intermédiaire (type 2) ou au moment de son semis (types 1 et 3). Ils diffèrent par la période de semis de la culture intermédiaire (plus précoce pour le type 3), la nature des espèces semées ou de la matière organique apportée, et par la période de destruction de la culture intermédiaire (plus tardive et variable pour le type 1).

- Les parcelles des types 5 à 8 reçoivent, pour une part plus ou moins importante d'entre elles, un épandage de produit organique au moment de la destruction ou peu après la destruction de la culture intermédiaire. Ces apports ne concernent donc pas la culture intermédiaire mais la culture suivante.
- Les types 6 et 7, caractéristiques des régions d'élevage (en particulier la Bretagne), montrent des périodes de destruction de la culture intermédiaire (essentiellement phacélie, avoine ou ray-grass) tardives, associées pour le type 7 à une période d'implantation également très tardive, en relation avec le précédent maïs.

Ainsi, 28% des parcelles avec CIPAN enquêtées ont reçu un apport de produits organiques (types 1 à 3), ce qui met en lumière le rôle significatif des CIPAN comme surface d'épandage des produits organiques (effluents d'élevage, effluents agro-industriels...).

1.1.3. Aspects réglementaires²

Eléments du contexte légal et réglementaire

Dès 1975, le droit communautaire a fixé, dans un objectif sanitaire et *via* des directives sur la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine (eau potable), des valeurs pour divers paramètres à ne pas dépasser. Ainsi, au paramètre "nitrate" à surveiller, est adjoint le seuil limite de 50 mgNO₃/l, étant entendu qu'il appartient aux États membres de la communauté européenne d'arrêter les moyens de lutte *ad hoc* à mettre en œuvre pour atteindre ce résultat.

Par ailleurs, la directive du 12 décembre 1991, dite directive "Nitrate", fixe un ensemble de mesures à transposer pour lutter contre les fuites d'ions nitrate d'origine agricole. Les États membres doivent, d'une part, identifier sur leur territoire des "zones vulnérables" selon les critères posés par la directive, et d'autre part, adopter dans ces zones et mettre en œuvre un programme d'action visant à réduire la pollution des eaux, dont le contenu *a minima* est déterminé par la directive. Cette directive fixe donc un objectif de moyens d'actions à mettre en œuvre pour parvenir au résultat escompté.

Plus globalement et plus récemment, au-delà du seul paramètre "nitrate", la directive cadre sur l'eau (DCE) fixe un objectif de bon état écologique et/ou chimique de l'eau à atteindre d'ici 2015, fixant ainsi clairement une obligation de résultats, sauf dérogations strictement encadrées par l'article 4.4 et 4.5 de la directive.

L'obligation de couvert dans les programmes d'action, portant application de la directive Nitrate

Les textes de mise en application du premier programme d'action Nitrate (1996) n'ont pas repris comme ils le devraient les dispositions sur la couverture des sols du Code de bonnes pratiques agricoles ; ce code recommande "pour les systèmes de cultures annuelles, d'améliorer l'ordre de succession des cultures de façon à réduire la surface de sol nu pendant les périodes présentant un risque de lessivage, d'augmenter, dans l'assolement, la période de cultures d'hiver par rapport à celles des cultures de printemps, d'installer des cultures intermédiaires pièges à nitrate derrière les cultures laissant le sol nu et riche en azote minéral pendant de longues périodes pluvieuses".

L'obligation de couverture hivernale des sols a été posée pour la première fois dans les 2^e programmes d'action Nitrate en 2001, dans le cadre des "zones d'actions complémentaires", puis c'est par circulaire que la couverture automnale des sols de l'ensemble des "zones vulnérables" a été prescrite en 2008 (4^e programmes d'action). Ces deux dates représentent des étapes importantes dans la construction du dispositif. Les textes réglementaires ont toutefois en commun d'avoir été mis en application de façon variable selon les départements, posant des questions de cohérence et de légitimité juridique.

En ce qui concerne les 5^e programmes d'action, actuellement en cours d'élaboration, le décret du 10 octobre 2011 inscrit les couverts en interculture dans le plan d'action national. L'arrêté du 7 mai 2012 indique que dans les programmes régionaux, les modalités de gestion de ces couverts d'interculture seront précisées dans un arrêté prévu pour la fin 2012.

² Pour une analyse plus détaillée des dispositions légales et réglementaires concernant l'obligation de couverture des sols, et de leur mise en œuvre, voir le rapport, chapitre 2, section 2.1.

L'obligation de couvert en dehors des programmes d'action

Dans le cadre de l'application de la Loi sur l'eau et les milieux aquatiques (article L. 211-3 C. modifié en 2006), la couverture végétale du sol, permanente ou temporaire, fait partie des mesures qui peuvent être rendues obligatoires pour assurer la protection des "aires d'alimentation des captages d'eau potable d'une importance particulière pour l'approvisionnement actuel ou futur".

Parallèlement, la deuxième génération de Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE), adoptés fin novembre - début décembre 2009 selon les bassins, doit permettre d'atteindre l'objectif de bon état écologique de l'eau fixé par la directive cadre européenne sur l'eau. Les SDAGE peuvent donc, en dehors de toute logique de transposition de la directive Nitrates, imposer des mesures de couverture des sols en interculture, pour atteindre les objectifs de la DCE.

Enfin, la loi du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, dite Grenelle 1, vise, parmi l'ensemble des actions à mettre en œuvre par l'État, "la généralisation de la couverture des sols en hiver en fonction des conditions locales" (prescrite dans le chapitre consacré à l'agriculture).

1.1.4. Les demandes de dérogations à l'implantation d'une culture intermédiaire

Suite à la publication de la circulaire généralisant la couverture automnale des sols de l'ensemble des "zones vulnérables" prescrite en 2008 (4^e programme d'action), de nombreuses dérogations ont été demandées par la profession agricole et accordées par les préfets. Les arguments sous-jacents aux dérogations ont été analysés pour comprendre et hiérarchiser les raisons qui les motivaient. Les experts en charge des travaux de simulations se sont assurés que les scénarios testés prenaient bien en compte les situations où des problèmes potentiels pouvaient se poser pour la mise en œuvre des CIPAN.

Un premier type de dérogation concerne des situations de sol à fort taux d'argile. Il s'appuie sur l'argument que les sols argileux nécessitent un travail précoce à l'automne difficilement compatible avec l'implantation d'une culture intermédiaire. Toutefois, il convient de préciser que la texture des sols qualifiés "d'argileux" dans ces dérogations est très hétérogène, puisque les valeurs indiquées varient de 22 à 40% d'argile selon les départements. Si l'on se réfère à la qualification *ad hoc* des textures des sols (triangle de texture GEPPA largement utilisé en France), un sol est considéré comme argileux lorsque sa teneur en argile (fraction < 2 µm) est supérieure à 37%, et comme argilo-limoneux lorsque cette teneur est comprise entre 27,5% et 37%.

D'autres dérogations ont été justifiées par : i) de faibles reliquats d'azote minéral dans le sol à la récolte, ii) une récolte tardive de la culture principale (avec des dates de dérogations du 1^{er} septembre au 31 octobre selon les départements) ne permettant pas l'installation d'une culture intermédiaire, iii) une substitution des CIPAN par des repousses de céréales, iv) la nécessité de réaliser des faux semis, notamment en Agriculture biologique, et enfin v) l'impact négatif des cultures intermédiaires sur les facteurs biotiques (Figure 4).

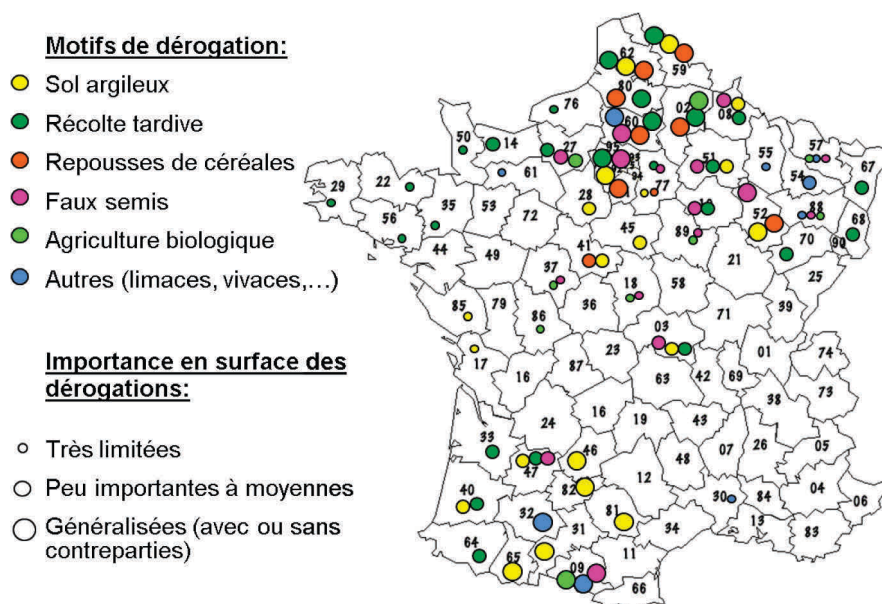


Figure 4. Localisation et importance (en surface) des différents motifs de dérogations à l'implantation des cultures intermédiaires par département (source : arrêtés préfectoraux régionaux et départementaux)

1.2. Objectifs et démarche de l'étude

1.2.1. Objectifs de l'étude

Dans leur lettre de commande, déjà mentionnée, les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Ecologie ont sollicité l'INRA pour établir "un état des connaissances sur la gestion de l'azote en période d'interculture en précisant les acquis, les incertitudes et les questions à approfondir dans une perspective de généralisation de la couverture végétale automnale des sols". L'étude s'attache ainsi à analyser en priorité les pratiques correspondant au registre réglementaire, c'est-à-dire les cultures intermédiaires pièges à nitrates, les repousses de colza et de céréales, les pailles finement broyées et enfouies ou laissées en surface. Mais par ailleurs, la gestion de l'interculture, au-delà de son rôle dans la dynamique de l'azote en période automnale, peut avoir d'autres effets qu'il convient d'examiner dans une perspective plus large d'évolution vers des systèmes de culture plus respectueux de l'environnement. En effet, la mise en place d'une pratique dont on attend un bénéfice sur un objectif donné ne devant pas conduire à une moindre performance environnementale globale du système, une vision globale de l'évaluation des performances et limites des modes de gestion de l'interculture à l'échelle du système de culture est nécessaire. Dans cet esprit, le groupe d'experts mobilisé pour cette étude a validé la proposition initiale d'élargir le périmètre de l'analyse de l'état des connaissances à un ensemble des fonctions agro-écologiques autres que celle de "piège à nitrates". En effet, les cultures intermédiaires sont susceptibles de rendre divers services écosystémiques : i) le maintien d'états physiques du sol favorables aux cultures, ii) la protection contre l'érosion, iii) une contribution au contrôle des ravageurs, maladies et adventices, iv), la limitation des émissions de gaz à effet de serre (GES). Ces fonctions peuvent être atteintes par les grandes familles d'espèces comme les crucifères, les graminées ou les légumineuses, ou par d'autres espèces moins représentées généralement. En corollaire, il est nécessaire d'évaluer les services induits par les cultures intermédiaires ou les effets indésirables car ayant des impacts négatifs sur la culture suivante, comme la compétition par préemption d'eau et/ou d'azote, ou un accroissement des bioagresseurs des cultures principales.

Par ailleurs, cette étude traite uniquement des systèmes de grandes cultures annuelles pour la succession des cultures principales, en accord avec les commanditaires ; les cultures pérennes ne sont pas prises en considération. De même, les cultures dérobées ne font pas partie du périmètre de l'étude.

1.2.2. Démarche et organisation de l'étude

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'Expertise scientifique collective (ESCo), développée à l'INRA depuis 2002 et encadrée par une Charte de l'expertise. Ces ESCo sont des travaux conduits généralement à la demande de commanditaires publics - les ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement notamment -, sous la responsabilité de l'INRA, par un groupe pluridisciplinaire d'experts scientifiques qui sont chargés d'analyser collectivement la bibliographie scientifique internationale et d'en extraire les connaissances utiles pour éclairer des questions posées par des gestionnaires publics. Mais la seule littérature scientifique ne permet pas toujours d'apporter des réponses utiles pour la décision publique. La DEPE a ainsi proposé une approche qui comporte un volet d'analyse bibliographique scientifique de type ESCo, qui est complété, selon les cas, par une analyse des publications techniques, un traitement original de données, un travail de simulations, ou encore par des enquêtes de terrain. Dans le cas présent, l'étude est basée sur un travail de simulation.

Dans la présente étude, le collectif d'experts³ est constitué de chercheurs des organismes de recherche ou d'enseignement supérieur suivants : INRA, IRSTEA, Agroscope (Suisse), ENSAT et Université de Toulouse. Les résultats du volet d'analyse bibliographique sont présentés dans la section 2 de ce document, et le volet complémentaire, constitué des travaux de simulation, est présenté dans la section 3. Les textes du rapport complet ont été relus par des experts extérieurs à l'étude.

³ Dont la liste figure en troisième de couverture.

L'analyse bibliographique

Ce volet suit les principes de l'ESCO, c'est-à-dire procède à une analyse de la bibliographie scientifique internationale (articles publiés dans des revues à comité de lecture en priorité, contributions à des ouvrages publiés par des éditeurs scientifiques reconnus). Les experts ont retenu les travaux de toutes origines géographiques pour certains points de l'analyse (description des mécanismes génériques...), mais se sont restreints à des zones présentant des conditions (pédoclimatiques, agricoles) comparables à celles du territoire français pour ce qui est de la déclinaison des conséquences locales de ces mécanismes, ce qui conduit à privilégier des travaux réalisés en Europe et Amérique du Nord. Ce volet bibliographique couvre toutes les fonctions que les cultures intermédiaires sont susceptibles de remplir. La bibliographie technique est prise en compte dans la mesure où les sources sur lesquelles elle se fonde (données expérimentales publiées, conditions d'obtention clairement définies...) y sont précisées.

Au final, l'étude a ainsi mobilisé 795 références bibliographiques, dont 768 publications scientifiques et 27 documents techniques. Plus de la moitié de ces références sont postérieures à l'année 2005. Elles se répartissent de la façon suivante : i) l'analyse des itinéraires techniques des cultures intermédiaires (chapitre 3 du rapport) a mobilisé 74 références, ii) le nitrate et l'eau en période d'interculture (chapitre 4) a mobilisé 256 références, iii) les effets abiotiques des cultures intermédiaires sur l'érosion, les propriétés physiques du sol, le stockage de carbone et le bilan de gaz à effet de serre (chapitre 5) ont mobilisé 121 références, et iv) les effets biotiques des cultures intermédiaires sur les adventices, la microflore et la faune (chapitre 6) ont mobilisé 344 références.

Les simulations

Le diagnostic que les données disponibles dans la bibliographie ne fourniront pas les références nécessaires pour toutes les situations pédoclimatiques et agronomiques concernées par l'implantation de cultures intermédiaires, a conduit à recourir à des simulations. Ce travail de simulation vise principalement à évaluer l'impact des cultures intermédiaires sur les fuites de nitrate, le bilan d'eau et la culture suivante, en fonction des espèces utilisées, de leurs modalités de gestion et par rapport à des pratiques alternatives, dans une large gamme de pédoclimats et systèmes de culture français, représentant la diversité des conditions rencontrées sur le territoire métropolitain. Deux questions complémentaires sont également traitées par simulation : la réussite de la levée des cultures intermédiaires et les jours disponibles pour leur destruction mécanique.

Suite à la première réunion du comité de suivi⁴ de l'étude, un groupe technique composé d'ingénieurs susceptibles de fournir des données, d'apporter des informations et de discuter du travail de simulation a été mis en place pour bénéficier d'une expertise complémentaire sur ce travail de simulation. Concrètement, ce groupe est constitué d'ingénieurs des instituts techniques les plus concernés (Arvalis, CETIOM, ITB, ITAB) et de Chambres d'agriculture, compétents sur la question de la gestion de l'azote en interculture, et d'une ingénieure d'un organisme de développement en Belgique⁵. Il s'est réuni à trois reprises au cours de l'étude. Il a été consulté sur la pertinence du plan de simulation proposé et sollicité pour fournir des données expérimentales, et *in fine* pour vérifier la cohérence des résultats des simulations (en terme de sens de variation des effets, d'ordre de grandeur et de hiérarchie des effets sur la réduction des fuites de nitrate et d'impact sur la culture suivante), face au savoir expert des ingénieurs ou à des références issues d'expérimentations *in situ*, en station expérimentale ou chez des agriculteurs.

⁴ Le comité de suivi de l'étude réunit les représentants de l'ACTA (réseau des instituts des filières animales et végétales), APCA (Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture), Coop de France, ONCFS (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage), ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).

⁵ Jean-Pierre Cohan (Arvalis - Institut du végétal), Rémy Duval (Institut Technique de la Betterave), Tanegmart Redjala-Ounnas (CETIOM - Centre technique interprofessionnel des oléagineux et du chanvre), Sébastien Minette (Chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes), Alain Lecat (Chambre régionale d'agriculture du Nord Pas-de-Calais et Institut Technique de l'Agriculture Biologique), Nathael Leclech (Chambre régionale d'agriculture de Lorraine), Damien Ronget (Chambre d'agriculture de Côte d'Or), Frédérique Hupin (Nitrawal, Belgique).

2. Principaux enseignements de l'étude bibliographique

2.1. Les itinéraires techniques des cultures intermédiaires

L'implantation et la destruction sont les deux phases essentielles de l'itinéraire technique des cultures intermédiaires, dont les dates et conditions de réalisation sont déterminantes pour les différentes fonctions visées pour ces cultures (piège à nitrate, prévention de l'érosion, gestion des adventices, effet sur la culture suivante...). L'analyse bibliographique s'est ainsi intéressée aux techniques d'implantation et de destruction des cultures intermédiaires, dont il s'agit d'identifier les différentes modalités, et si possible leur efficacité quant à la réussite du semis et de la destruction. La question de la mise en œuvre de ces techniques par les agriculteurs a ensuite été abordée par une analyse des contraintes d'organisation du travail et des coûts de mise en œuvre.

La bibliographie scientifique s'est révélée pauvre : les techniques de conduite de l'interculture en tant que telles font peu l'objet de recherches scientifiques (hormis dans des développements méthodologiques rapportés pour mener à bien certaines expérimentations), alors que ce sujet est traité par les instituts techniques et Chambres d'agriculture en particulier, poussé par un fort mouvement d'innovation technique dans ce domaine. Dans le cadre de cette étude, les travaux portant sur le matériel agricole, le machinisme et les innovations techniques et mécaniques n'ont pas été retenus ; pour plus de détails sur l'éventail des solutions techniques en cours de développement, le lecteur pourra se référer aux parutions de ces organismes.

Les deux travaux de simulation qui concernent la phase de semis-levée⁶ et l'évaluation des jours disponibles pour la destruction des couverts à l'automne⁷, sont présentés dans la section 3 du document.

2.1.1. Les techniques d'implantation des couverts intermédiaires

L'analyse bibliographique avait pour objectifs de connaître et décrire les différentes modalités d'implantation des cultures intermédiaires, d'évaluer les recherches dont elles font l'objet, et d'identifier la gamme des modalités d'implantation à tester dans les simulations des levées des cultures intermédiaires.

Les techniques abordées dans les publications scientifiques

Peu de références bibliographiques portent spécifiquement sur l'étude de variantes de techniques d'implantation des cultures intermédiaires. Dans la plupart des travaux, ces techniques sont mentionnées car elles contribuent à la description expérimentale de la situation étudiée, mais elles ne sont pas l'objet central de la recherche.

Ces travaux sont souvent motivés par la maîtrise de problèmes d'érosion, dont on analyse les possibles effets sur la culture suivante. Les résultats sont parfois contradictoires pour ce qui est des effets de la présence de la culture de couverture sur l'humidité et la température du sol au semis de la culture suivante, sans que les raisons de ces différences d'effets ne soient faciles à établir. Dans les études recensées, les techniques d'implantation (travail du sol, densité de semis, date de semis) sont des variantes expérimentales pour le semis d'une culture intermédiaire dont on évalue l'impact sur la vitesse de couverture, la fourniture d'azote si c'est une légumineuse, la diminution des adventices, la structure du sol, la biodiversité, etc., et le rendement de la culture suivante.

Une seule étude⁸, réalisée en France, décrit précisément les variations du résultat obtenu en terme d'implantation de la culture intermédiaire (taux et vitesses de levée, causes de non-levée, conditions physiques au moment du semis). Elle indique que les variations des temps mis pour lever sont plus larges (quelques jours à quelques semaines), que celles des taux de levée en médiane, qui sont toujours relativement élevés (> 85%) quels que soient le lieu, la date de semis et les techniques utilisées.

⁶ Voir rapport, chapitre 8.

⁷ Voir rapport, chapitre 9.

⁸ Voir rapport, chapitre 3 et Dorsainvil F., Dürr C., Justes E., Carrera A. (2005). Characterisation and modelling of white mustard (*Sinapis alba* L.) emergence under several sowing conditions. European Journal of Agronomy, 23, 146-158.

Au final, cette analyse bibliographique permet de décrire différentes variantes techniques de semis de cultures intermédiaires, mais elle ne donne que très rarement des résultats en termes d'état du lit de semences au moment de l'implantation et de maîtrise du résultat en termes d'homogénéité et de densité du couvert obtenu.

Variantes décrites dans les documents techniques

La majeure partie des références décrivant les pratiques, leurs effets et différentes tentatives d'innovation en matière d'implantation des couverts végétaux est produite par les instituts techniques, qui conduisent des études expérimentales et de démonstration sur ces pratiques.

Pour l'implantation, différents outils de déchaumage peuvent être utilisés ; selon l'outil et son réglage, la profondeur de travail est plus ou moins importante. Par contre, le labour avant semis de la culture intermédiaire n'est pas évoqué. Différentes méthodes de semis sont aussi utilisées, allant du semis à l'aide d'épandeurs à engrais (centrifuge ou à rampes), à l'utilisation de semoirs SD (semis direct) à dents ou à disques, combinés ou non à un outil animé.

Les effets de différentes dates de semis sont présentés avec des dates limites à ne pas dépasser par grandes régions climatiques françaises pour obtenir un couvert suffisant (en particulier pour les légumineuses, mais aussi d'autres espèces), ou au contraire de date minimale à respecter pour ne pas aboutir à la floraison (cas des moutardes) et à un couvert trop difficile à détruire.

Les taux de levée obtenus sur ces différents essais peuvent être assez variables entre années, et selon les techniques de travail du sol et de semis. Les choix d'espèces et de variétés sont discutés selon les régions et les périodes de semis. Par contre, en dehors des effets de la taille de la semence sur le contrôle de la répartition des graines (en surface et en profondeur), les effets éventuels des caractéristiques germinatives et sanitaires des semences ne sont pas évoqués.

Concernant les repousses de céréales ou de colza, la documentation technique indique que les quantités de graines perdues à la récolte, si elles sont correctement éparpillées, permettent en général d'obtenir un couvert végétal suffisant, sous réserve d'une réussite de la levée, qui peut être retardée de quelques semaines en céréales du fait de phénomènes de dormance, mais ce processus n'est pas documenté.

Conséquences pour l'étude des levées par simulation

L'étude bibliographique permet de décrire les différentes techniques d'implantation mais ne donne pas d'indication précise sur la variabilité des résultats de levée ni sur l'évaluation des risques d'échecs des semis, ce qui a motivé l'étude par simulation, à l'aide du modèle SIMPLE, de la variabilité des résultats d'implantation des couverts selon les conditions pédoclimatiques et les techniques de semis (analyse fréquentielle sur 20 ans).

2.1.2. Les techniques de destruction des couverts intermédiaires

Les modalités de destruction des couverts végétaux ne font pas l'objet de recherches spécifiques ; elles sont considérées lorsqu'elles apparaissent comme un facteur important pour l'efficacité des cultures intermédiaires. La date de destruction du couvert est déterminante par rapport aux fonctions attendues. Elle doit également tenir compte des exigences de la culture suivante en termes d'état physique du sol, de disponibilité en éléments nutritifs (azote en particulier) et de présence de substances inhibitrices (allélopathie). La destruction repose sur l'usage de moyens mécaniques ou chimiques, ou sur des mécanismes naturels comme la sénescence ou le gel.

Actuellement, le glyphosate s'impose comme la principale molécule utilisée pour la destruction chimique, en combinaison possible avec le 2,4D. Les quantités d'herbicide nécessaires varient fortement selon les couverts à détruire et la flore adventice. Par exemple, pour certains couverts comme le ray-grass, la destruction peut nécessiter des doses élevées de glyphosate, sans parvenir à un contrôle complet, ou exiger plusieurs interventions pour se révéler efficace. Les conséquences d'une utilisation systématisée et répandue de cette substance sont largement documentées dans des articles de synthèse récents. Toutefois, l'impact de l'introduction de couverts végétaux dans les systèmes de culture sur la fréquence d'utilisation du glyphosate est peu documenté⁹.

⁹ La seule référence disponible concerne la Suisse où, entre 1992 et 2004, le nombre d'applications de glyphosate en grandes cultures est passé de moins de 0,05 application par parcelle et par année à quelque 0,15, en relation avec la simplification des travaux du sol et l'introduction systématique des couverts végétaux.

Le labour constitue un moyen traditionnel de destruction mécanique des couverts intermédiaires car il permet de coupler destruction du couvert et travail habituel du sol à l'automne en sols argilo-limoneux et argileux. Le broyage ou le passage de rouleaux à lames sont également utilisés pour la destruction mécanique des parties aériennes, et représentent une alternative à la destruction chimique par du glyphosate. Le passage d'un rouleau à lames représente un moyen potentiellement efficace pour établir une couche de résidus en mulch à la surface du sol. L'efficacité de cette intervention mécanique est toutefois variable et dépend de l'espèce, de la quantité de biomasse de couvert et des conditions climatiques lors de l'intervention. La littérature technique fait largement mention de ces différents moyens.

Dans les régions propices, la destruction naturelle par le gel est également possible. Le choix de l'espèce (espèces gélives) est déterminant pour pouvoir valoriser ce "potentiel climatique". Les données de valeurs de gel sont largement répandues dans la littérature technique, mais sans que les sources d'information soient toujours clairement indiquées, ce qui pose parfois des questions sur leur fiabilité.

En conclusion, les itinéraires techniques les plus décrits dans les articles scientifiques consultés procèdent fréquemment à la destruction des couverts d'interculture par des moyens mécaniques ou par une application d'herbicide avant les travaux d'implantation de la culture suivante. Toutefois, la littérature relève un certain nombre de risques liés à l'utilisation systématique de glyphosate (induction de résistances chez les adventices, transfert de la molécule ou de son métabolite secondaire, l'AMPA, et pollution des écosystèmes aquatiques).

2.1.3. Les contraintes d'organisation du travail et économiques à l'échelle de la parcelle

Malgré la pertinence de l'interrogation sur l'adéquation entre organisation du travail au sein de l'exploitation agricole et gestion des cultures intermédiaires, cette question n'a pas été prise en charge par la communauté scientifique. Aucune étude portant sur la faisabilité de cette pratique à l'échelle de l'exploitation n'a été réalisée dans des situations contrastées de climat, de sol et de type d'exploitation. Des études partielles portant sur les temps de travaux et les jours disponibles, ainsi que sur les coûts des itinéraires techniques, existent néanmoins. Elles montrent une grande variabilité, que ce soit en temps de travaux et en coût pour différents types d'itinéraires techniques, ou en termes de jours disponibles pour la destruction des couverts. Cela souligne la nécessité d'une approche locale pour raisonner le choix de conduite de l'interculture, tenant compte des caractéristiques pédoclimatiques et des caractéristiques de l'exploitation en termes de systèmes de culture et de matériel et main d'œuvre disponibles.

Une analyse à l'échelle de la parcelle des temps de travaux et des surcoûts entraînés par l'implantation d'une culture intermédiaire a néanmoins été réalisée à partir des références de différents documents techniques. Les résultats ont été exprimés en termes de coûts et de temps de travaux supplémentaires par itinéraire technique, par rapport à une situation laissée en sol nu. Il est connu qu'une gestion de l'interculture par des repousses génère le moins de temps de travail et coûte le moins cher. Concernant les itinéraires avec CIPAN, le surcoût, hors main d'œuvre, incluant le semis et la destruction, varie entre 30 et 92 euros par hectare, auxquels il faut ajouter 14 à 60 €/ha de coût de semences. Par ailleurs, ces itinéraires occasionnent de 0,6 à 2,2 heures de travail supplémentaires par hectare. Si ce travail n'est pas réalisé par l'agriculteur, il faut alors compter pour la main d'œuvre salariée entre 9 et 33 €/ha. À noter toutefois que la majorité des itinéraires techniques se situent en dessous de 1,5 h/ha, soit un coût de main d'œuvre inférieur à 22,5 €/ha.

En ce qui concerne plus particulièrement les sols argileux, la difficulté de gestion des cultures intermédiaires peut venir de la préparation du sol traditionnellement réalisée, et non de la conduite de la culture intermédiaire. Ces sols sont en effet généralement labourés en fin d'été afin de les soumettre à l'alternance humectation-dessiccation, ou à l'automne pour qu'ils bénéficient ensuite de l'alternance gel-dégel. Réaliser ce labour trop tard à l'automne en raison d'un décalage dû à une destruction tardive des cultures intermédiaires, voire au printemps, peut être problématique en raison des conditions d'humidité du sol : l'impossibilité de réaliser le travail du sol ou un résultat non satisfaisant (compaction...) peut compromettre le rendement de la culture suivante.

Le manque d'information dans la bibliographie a motivé la réalisation d'une étude par simulation pour évaluer les jours disponibles pour la destruction des cultures intermédiaires, selon la texture de surface du sol (voir section 3.2.3.). Cette étude ne prend en compte que la composante biotechnique des jours disponibles (facteurs pédoclimatiques et liés à l'itinéraire technique) à l'exclusion de facteurs socioéconomiques. Elle permet

néanmoins d'estimer, pour une large gamme de pédoclimats, les jours potentiellement disponibles en fonction de la date de destruction¹⁰.

2.2. Nitrate et eau en période d'interculture

La ressource documentaire internationale concernant l'effet "piégeage" (CIPAN) et l'effet "engrais vert" des cultures intermédiaires est importante. Elle intègre une forte diversité de problématiques mais est généralement centrée sur une application locale, manquant souvent de généralité dans l'analyse des processus ce qui rend difficile l'extrapolation des résultats obtenus sur un site spécifique à d'autres situations pédoclimatiques. L'analyse des articles jugés les plus pertinents a permis de conclure positivement et de façon quantitative sur l'efficacité des CIPAN. Elle a également permis de mettre en exergue les facteurs déterminant l'efficacité et les sens de variation des effets des CIPAN, mais sans que les relations ou leur quantification ou leur modélisation ne soit réalisée, rendant très difficile l'extrapolation des résultats. En conséquence, cette analyse bibliographique a montré le besoin d'engager des simulations pour avoir une réponse quantitative dans la mesure où le domaine de définition du modèle utilisé le permet.

2.2.1. L'azote du sol, l'origine du nitrate et la lixiviation

L'azote minéral du sol

Le pool d'azote total du sol représente à l'échelle de la parcelle des quantités très importantes (Figure 5) ; il est très majoritairement, à plus de 98%, sous forme organique. Les quantités d'azote minéral du sol, très minoritaire, varient entre 30 et 300 kg/ha, alors que, par exemple, un sol de grande culture présentant un taux de matière organique d'environ 1,5% contient de l'ordre de 3 à 5 tonnes d'azote total à l'hectare.

Beaucoup d'échanges de flux et de transformations se produisent dans le sol au cours de la saison. La complexité du cycle de l'azote est caractérisée par de perpétuels échanges entre les formes organiques et minérales.

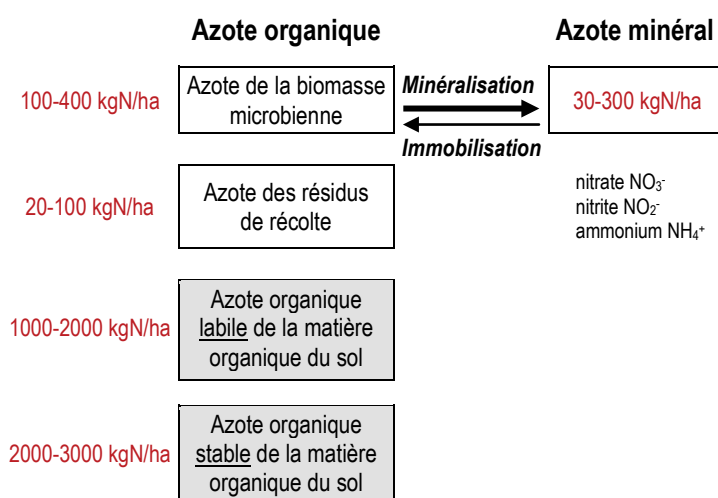


Figure 5. Compartiments de l'azote dans le sol (d'après Corpen, 1993)
Les valeurs en rouge indiquent des quantités de N/ha dans le sol.

Le nitrate présent dans les sols

La quantité de nitrate du sol est variable dans le temps et résulte de plusieurs phénomènes antagonistes : apport par la fertilisation, minéralisation de la matière organique de l'humus et des résidus, dépôts d'azote atmosphérique, pertes par voie gazeuse (volatilisation et dénitrification), organisation de l'azote lors de la décomposition des résidus (prélèvement de nitrate par les microorganismes conduisant à son immobilisation sous forme de matière organique), absorption par les couverts végétaux et fixation symbiotique des légumineuses. Ces phénomènes sont principalement dépendants des conditions de milieu (température, humidité, teneur en oxygène de l'air dans le sol, pH) et de la disponibilité en carbone labile (résidus).

La lixiviation du nitrate et les principes de sa prévention

La lixiviation, plus communément appelée, improprement, lessivage, consiste en la migration des solutés, dont le nitrate, avec les eaux de drainage, hors de portée des racines. C'est un processus biophysique dont l'intensité

¹⁰ Voir rapport, chapitre 9.

est déterminée par l'interaction entre le système de culture, les pratiques agricoles et les facteurs pédoclimatiques ; son intensité est donc spécifique au site et surtout à l'année ("*site specific*" en anglais), du fait de sa dépendance à la pluviométrie. Les quantités d'azote exportées par les eaux de drainage (lixiviation) sous la forme nitrique représentent une part parfois importante de l'azote minéral du sol, mais une très faible part, à l'échelle annuelle, de l'azote total présent dans le sol (Figure 5).

Deux variables sont utilisables pour estimer la lixiviation et l'efficacité de la culture intermédiaire pour réduire cette lixiviation :

- la quantité de nitrate lixiviée (exprimée en kgN/ha) ; l'efficacité de la culture intermédiaire est alors mesurée par la réduction de la lixiviation (c'est-à-dire la perte d'azote nitrique évitée) par rapport à un sol laissé nu ;
- la teneur en nitrate des eaux de drainage (exprimée en mgNO₃/l) ; l'efficacité de la culture intermédiaire est alors évaluée par sa capacité à restituer une eau de drainage en dessous du seuil réglementaire de 50 mgNO₃/l, ou par l'abattement de cette teneur (% de réduction par rapport à la teneur en nitrate sous un sol nu).

Le principe de la prévention des fuites de nitrate dans les agrosystèmes est de limiter le reliquat d'azote minéral du sol, c'est-à-dire la quantité d'azote nitrique, avant le début de la période de drainage, par des moyens tactiques (sans remise en cause de la rotation culturale) ou si nécessaire, stratégiques (changement du système de culture et notamment de succession de cultures). Le semis de cultures intermédiaires est l'un des moyens tactiques pour piéger l'azote nitrique pendant les périodes estivale et automnale sans remise en cause profonde du système de culture. Le maintien des cultures intermédiaires durant l'hiver peut être nécessaire en climat océanique doux et très pluvieux pour réduire efficacement la lixiviation.

Le bilan d'azote de la culture principale est un premier déterminant du stock d'azote minéral présent en début d'interculture. La mise en œuvre de la fertilisation raisonnée permet de minimiser le reliquat d'azote minéral (azote nitrique plus ammoniacal) à la récolte. Cependant, les incertitudes accompagnant le calcul de la dose optimale de fertilisation conduisent à constater *a posteriori* l'existence d'une sur-fertilisation. Au-dessus de l'optimum de fertilisation, le reliquat à la récolte croît en proportion importante de l'excès de fertilisation azotée : ainsi pour des sur-fertilisations modérées, pour 2 kg d'azote excédentaire, il apparaît en moyenne 1 kg d'azote de reliquat à la récolte supplémentaire sous forme minérale.

Après la récolte, le pool d'azote minéral est alimenté par la minéralisation de la matière organique du sol qui conduit à la libération d'ions ammonium qui alimentent à leur tour le pool d'azote nitrique sous l'effet de la nitrification. En climat tempéré, les deux processus de minéralisation et de nitrification sont couplés (la nitrification se produit quasi simultanément à la libération des ions ammonium issus de la minéralisation), ce qui explique que c'est majoritairement du nitrate qui est retrouvé dans le sol. La vitesse de minéralisation dépend du type de sol et des conditions climatiques et culturales. La quantité minéralisée est donc très variable, de l'ordre de 40 à 70 kgN/ha à l'automne en conditions tempérées, mais avec une variabilité importante en fonction du taux d'azote organique, de la température et de l'humidité du sol. La minéralisation estivale et automnale détermine les risques de lixiviation, et ce, davantage que le reliquat à la récolte i) dans les situations où la fertilisation est correctement raisonnée, et/ou ii) dans les cas où la quantité d'eau drainée permet de renouveler intégralement le stock d'eau du sol correspondant à la réserve utile.

La gestion des résidus de récolte détermine également le risque de lixiviation en fonction de leur masse et de leur teneur en azote (ou rapport carbone (C) sur azote (N), C/N). En effet, l'incorporation des résidus de récolte conduit généralement à une organisation nette d'azote minéral du sol. Cependant, si le potentiel d'organisation en azote minéral du sol est très élevé dans les conditions de mélange homogène de résidus finement broyés dans le sol (comme les expérimentations en incubation l'indiquent), les quantités immobilisées au champ sont généralement de l'ordre de 10 à 30 kgN/ha après six mois de décomposition. La décomposition des résidus matures de la culture précédente mobilise temporairement l'azote minéral du sol (en alimentant le pool facilement minéralisable d'azote organique du sol). La quantité d'azote minéral ainsi mobilisée dépend de l'importance du contact entre les résidus et la terre, donc du type de travail du sol et de la profondeur d'incorporation. L'organisation nette d'azote minéral n'affecte que la couche où les résidus sont incorporés, ce qui explique leur faible impact pour réduire la lixiviation.

2.2.2. Le piégeage de nitrate par les cultures intermédiaires

A l'échelle annuelle, l'introduction d'une culture intermédiaire permet, dans la très grande majorité des essais, une réduction significative des pertes d'azote nitrique par lixiviation, mais dont l'intensité varie suivant les sites, l'espèce et les conditions d'implantation et de destruction. Le caractère local dans le temps et l'espace, à la fois des conditions de la croissance de la culture intermédiaire et de la lixiviation, explique cette variabilité. La quantité d'azote nitrique piégée par absorption racinaire, et qui est contenue dans la biomasse d'une culture intermédiaire, peut atteindre potentiellement 100 à 150 kgN/ha avec des graminées et plus de 200 kgN/ha pour les crucifères. La quantité d'azote acquise peut également être élevée pour les légumineuses, mais en partie grâce à la fixation symbiotique, ce qui fait que la quantité d'azote nitrique piégée est plus faible pour cette famille d'espèces. La quantité d'azote nitrique absorbée dépend de la date, des conditions d'implantation, de la durée de croissance et de l'espèce de la culture intermédiaire, ainsi que de la quantité d'azote minéral disponible dans le sol. La quantité d'azote absorbée et la variation du stock d'azote minéral entre les traitements de culture intermédiaire et sol nu en automne sont des indicateurs de la réduction potentielle de la lixiviation, sauf en cas de légumineuses. La réduction effective de la lixiviation dépend de la concurrence dynamique ("*timely competition*" en anglais) entre les processus de transfert d'azote nitrique en profondeur et d'absorption par la culture intermédiaire, puis de la vitesse de minéralisation des résidus après leur enfouissement.

La dynamique de l'absorption d'azote par la culture intermédiaire : conditions d'efficacité et cas particuliers des récoltes tardives d'automne

Les caractéristiques du pédoclimat influent fortement sur la vitesse de transfert de l'azote nitrique, mais aussi sur la profondeur d'enracinement de la culture intermédiaire ou la minéralisation des résidus. Le risque de lixiviation est d'autant plus grand que le climat est pluvieux et que les sols sont peu profonds et de texture grossière. La période d'absorption de la culture intermédiaire doit être adaptée à la dynamique du drainage. Il est donc impératif que la culture intermédiaire piège l'azote minéral du sol avant que le drainage ne devienne intense et que la lixiviation ne se produise. Cette contrainte conduit à l'existence d'une date optimale de levée, par espèce et par région, mais aussi d'une date de semis butoir au-delà de laquelle la CIPAN devient inefficace. Cela pose la question de la gestion de l'interculture après récolte de la culture principale à l'automne ; la gestion des résidus ne limite que faiblement la lixiviation et le développement de CIPAN semée fin octobre est souvent réduit par de basses températures et un faible rayonnement solaire. La pratique de semis de culture intermédiaire sous couvert d'une culture récoltée à l'automne peut donner de bons résultats en climat du Sud de l'Europe (cas d'expérimentations en Italie), mais devrait faire l'objet de travaux spécifiques prenant en compte les contraintes de compétition avec la culture principale pour accroître le succès de cette technique. De plus, il convient de prendre en compte conjointement la gestion des adventices et celle de la fertilisation dans le but de maîtriser efficacement les pertes d'azote nitrique hivernales.

La dynamique de l'absorption d'azote par la culture intermédiaire : cas des sols argileux

Dans les cas de sols argileux, certaines contraintes d'implantation ou de destruction demandent une adaptation spécifique de la conduite des cultures intermédiaires, mais la revue bibliographique n'a pas permis de traiter complètement cette question. Des simulations avec différentes dates de semis et de destruction précoces sont utiles pour mieux analyser cette problématique spécifique.

La réduction de la concentration en nitrate des eaux de drainage

L'efficacité des cultures intermédiaires pour la réduction de la concentration (ou teneur) en nitrate de l'eau de drainage (ou percolation) est significative dans 90% des études analysées, mais avec une très forte variabilité interannuelle et en fonction des pédoclimats. Elle est avérée dans presque toutes les situations, en comparaison au témoin en sol nu. La réduction de la concentration nitrique de l'eau de drainage est due, de façon très prédominante, à l'effet du piégeage par la culture intermédiaire de l'azote minéral du profil de sol, qui induit une réduction de la lixiviation, et non à une réduction du volume de drainage. Si l'efficacité des cultures intermédiaires dépend du niveau de drainage, leur impact sur le drainage ou sur le stock d'eau du sol en sortie d'hiver est faible. La réduction du drainage sous le profil de sol est de l'ordre de 30 à 50 mm, soit 6 à 10% du volume annuel en moyenne, avec des réductions pouvant aller jusqu'à 22% dans les expérimentations rapportées dans la bibliographie.

Le choix de l'espèce de la culture intermédiaire

L'espèce est déterminante dans la gestion de la concurrence dynamique et dans la restitution d'azote à la culture suivante, sans toutefois être le seul facteur de cette efficacité, dans la mesure où il est d'abord nécessaire qu'un couvert soit en place en fin d'été et à l'automne pour absorber l'azote minéral du sol. Ensuite, en fonction de la date de démarrage de la lixiviation, l'espèce qui aura la capacité d'absorber rapidement de l'azote minéral en profondeur dans le sol permettra de produire l'effet escompté de "*timely competition*" en fonction du pédoclimat. D'une manière générale, la réduction des quantités d'azote nitrique lixiviées et de la concentration en nitrate des eaux de drainage est en moyenne deux fois plus élevée pour les cultures intermédiaires non-légumineuses que pour des cultures intermédiaires légumineuses ; l'efficacité de légumineuses est toutefois en général significative, bien que nettement plus faible que pour les espèces non-légumineuses. Compte tenu de leur capacité à fixer l'azote atmosphérique et à en restituer une plus grande partie à la culture suivante du fait de leur teneur plus élevée en azote, les mélanges de cultures intermédiaires légumineuses et non-légumineuses paraissent combiner les avantages de "piège à nitrate" et d'"engrais vert". Cependant, les références, moins nombreuses pour les mélanges d'espèces, montrent que la réduction de la lixiviation n'est pas toujours aussi importante qu'avec des cultures intermédiaires non-légumineuses. Cette revue bibliographique, qu'il conviendrait certainement de compléter par des recherches spécifiques sur les mélanges d'espèces, permet de faire une première synthèse des ordres de grandeur de ces effets selon les types d'espèces utilisées comme culture intermédiaire (Tableau 1).

Effets	Facteurs	Non légumineuse Graminées	Non légumineuse Crucifères	Légumineuse	Mélanges Légum. & non-légum
Exigences		Semis assez précoce Non ou peu gélives	Semis précoce Gélive selon l'espèce et la température	Semis très précoce Gélives	Adapter le mélange
Abattement de lixiviation (taux / témoin)		30 à 80%	30 à 90%	0 à 40%	20 à 60% (à confirmer*)
Effet azote à court terme (N libéré en % N absorbé)		-20 à +10%	-10 à +30%	+10 à +50%	+10 à +40% (à confirmer)
Atouts		Efficacité à haut niveau d'intrant en azote ou sous climat océanique	Large efficacité et Efficacité à haut niveau d'intrant en azote ou sous climat continental	Efficacité à bas niveau d'intrant en azote	Efficacité intermédiaire et plasticité / à la disponibilité en N Moindre compétition en semis sous couvert
Systèmes déconseillés ou à proscrire		Sol argileux (/ destruction tardive).	Sol argileux si non gélive (/ destruction tardive).	Systèmes intensifs en azote & apports d'effluents	Systèmes intensifs en azote

* à confirmer par une étude bibliographique ciblée et des simulations incluant une association d'espèces.

Tableau 1. Récapitulatif des effets, atouts et limites des différents types de culture intermédiaire

Dates d'installation et de destruction des cultures intermédiaires

La quantité de nitrate piégée varie aussi en fonction des périodes d'installation et de destruction de la culture intermédiaire. Ainsi pour le quart nord-est de la France, la quantité d'azote piégée diminue fortement pour des semis postérieurs au 10 septembre, voire au 1^{er} septembre pour les zones les plus "froides", et selon les espèces de cultures intermédiaires. Concernant la destruction, même si le piégeage de nitrate augmente avec le recul de la date de destruction, il existe une date au-delà de laquelle le maintien du couvert n'a plus ou a peu d'effet sur le piégeage mais empêche une minéralisation trop précoce des résidus de CIPAN. Ce n'est qu'à partir de la destruction de la culture intermédiaire que la minéralisation de ses résidus vient alimenter le pool d'azote minéral du sol. Les expériences de terrain menées dans des sols et des conditions climatiques variés à l'échelle de la rotation ont montré que la libération de l'azote après incorporation d'une culture intermédiaire et son utilisation par les cultures suivantes peuvent être très variables, allant d'une minéralisation nette (effet positif sur la disponibilité en azote) à parfois une organisation nette (effet négatif sur la disponibilité en azote).

2.2.3. Les effets postérieurs à la destruction de la culture intermédiaire

Les effets sur la culture suivante

En plus de la quantité d'azote acquise par la culture intermédiaire, l'indicateur le plus robuste de la quantité d'azote libérée et disponible pour la culture suivante est le rapport ou ratio C/N des résidus de la culture intermédiaire. La teneur en carbone variant peu (de 38 à 45%), c'est la teneur en azote (très variable, de 1 à 4% environ) qui détermine la valeur du C/N. Ce rapport est très variable selon l'espèce et les conditions de croissance des cultures intermédiaires, qui sont déterminées par la disponibilité en azote minéral du sol (ou l'efficacité de la fixation symbiotique pour les légumineuses). Ainsi, le C/N diminue quand les cultures intermédiaires ont été implantées en situation de forte disponibilité en azote dans le sol ou en cas d'espèce légumineuse. L'effet de substitution d'intrant en azote ("engrais vert"), c'est-à-dire la réduction de fertilisation de la culture suivante permise par l'introduction d'une culture intermédiaire, est au maximum de 50 à 60%, mais plus généralement de l'ordre de 10 à 40%, car le C/N des cultures intermédiaires est souvent compris entre 12 et 20.

En conséquence, l'utilisation de légumineuses, pures ou en mélange, qui induisent des C/N bas, conduit souvent à une augmentation du rendement de la culture principale suivante par libération d'azote due à la minéralisation des résidus de la culture intermédiaire. Cet effet est moins probant en cas de fertilisation élevée de la culture principale (effet d'accroissement moins que proportionnel et de situations qui deviennent non limitantes en azote), alors que les espèces non-légumineuses ne conduisent pas, en moyenne dans les études annuelles, à une augmentation du rendement. La fertilisation raisonnée doit intégrer les éventuels effets dépressifs sur le stock d'azote minéral causés par la culture intermédiaire ou au contraire les éventuels effets positifs de restitution d'azote par la minéralisation de ses résidus. Pour que ces effets soient correctement pris en compte, il est impératif de connaître la quantité d'azote acquise par la CIPAN et son C/N au moment de la destruction.

Les effets à long terme

La répétition de l'incorporation de résidus de culture intermédiaire peut entraîner des effets cumulatifs sur le stockage de matières organiques dans le sol et sur leur potentiel de minéralisation ultérieur. Ce dernier s'accroît au prorata des entrées cumulées d'azote organique sous forme de culture intermédiaire pour atteindre un palier au bout de 20 à 40 ans, qui dépend de la nature et du rapport C/N des résidus de culture intermédiaire. Ce surcroît de minéralisation permet généralement d'augmenter l'absorption des cultures principales. Malgré la minéralisation accrue provoquée par l'enfouissement successif de cultures intermédiaires lorsque celles-ci deviennent partie intégrante du système de culture et sont implantées systématiquement chaque fois que la succession le permet, les CIPAN restent efficaces pour réduire la lixiviation d'azote nitrique à long terme. Il est cependant nécessaire, au bout de plusieurs années (plus de 10 ans), de réduire la fertilisation azotée des cultures principales afin de prendre en compte cette minéralisation supplémentaire du sol et ainsi de maintenir un fort niveau d'efficacité des cultures intermédiaires pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage.

Les effets sur le bilan hydrique : reconstitution du stock d'eau du sol et effet sur la culture suivante

La mise en place de cultures intermédiaires en climat tempéré n'induit pas de fortes modifications de la réserve en eau du sol au printemps, ou au semis de la culture principale suivante, sauf si sa destruction intervient très tardivement (par exemple juste avant ce semis). En général, du fait des précipitations entre la destruction et le semis, le stock d'eau du profil est reconstitué de façon quasi identique que ce qui se passe pour un sol sans CIPAN. Excepté dans des cas extrêmes, aucun effet significatif sur l'alimentation hydrique de la culture suivante n'a pu être démontré dans l'analyse des publications. Cette conclusion est cohérente avec celle établie sur l'impact des cultures intermédiaires sur le drainage d'eau à l'échelle de la parcelle, qui n'est que modérément affecté sous les climats tempérés.

L'impact de la réduction du drainage à l'échelle d'un bassin versant ou d'une zone d'alimentation d'une nappe alluviale n'a pas été spécifiquement traité dans les références bibliographiques. Pour ce faire, une étude hydrologique intégrant la répartition spatiale des sols et des cultures, les transferts hydriques sous le profil de sol serait à mener, en fonction de la situation hydrogéologique sur laquelle porterait l'analyse ; toutefois, ce type d'analyse ne faisait partie du périmètre de la présente étude.

2.2.4. Les cultures intermédiaires au sein du système de culture

La complémentarité entre modes de gestion et la multifonctionnalité des cultures intermédiaires

Les principaux modes de gestion de l'interculture en automne (par exemple, gestion des résidus et semis de culture intermédiaire) apparaissent potentiellement complémentaires pour réduire la lixiviation, car ils ne s'appliquent pas à la même période d'action ni aux mêmes processus du cycle de l'azote. En particulier, le mode de gestion des résidus (incorporation au sol *versus* mulch) a un effet sur la dynamique de l'azote minéral et de l'eau dans la profondeur d'incorporation des résidus (quelques centimètres avec un déchaumage), alors que la culture intermédiaire va absorber de l'azote minéral en profondeur dans le profil du sol (sur plusieurs dizaines de centimètres et même au-delà d'un mètre dans certains sols). La gestion des résidus et l'implantation des cultures intermédiaires peuvent être coordonnées pour conjuguer ces effets permettant, par exemple, de limiter les effets sur le drainage par un mulch des résidus de la culture précédente en surface qui réduirait l'évaporation. Plus globalement, cette gestion de l'eau et de l'azote est à concilier avec les autres finalités de l'interculture, comme la gestion des résidus de récolte, la maîtrise des adventices et des ravageurs, la protection du sol et l'implantation de la culture suivante. Cela indique la nécessité de mener des travaux pour optimiser la gestion de l'interculture en fonction des objectifs prioritaires visés.

Cultures intermédiaires et reconception des systèmes de culture

L'impact d'une généralisation des cultures intermédiaires à l'échelle d'un territoire est dépendant de la structure de son assolement, en particulier de la proportion des périodes d'interculture à l'échelle de la rotation, de la période calendaire de cette interculture, de la date de récolte de la culture principale précédente et du semis de la suivante, sans sous-estimer l'efficacité des cultures intermédiaires dans certaines successions culturales avec une interculture plus courte. Cependant, les cultures intermédiaires peuvent être également un levier d'une reconception des systèmes de culture dans une démarche stratégique de prévention de la lixiviation et de recherche d'autonomie en azote du système de culture, qui peut aboutir à changer l'assolement lui-même en fonction de l'objectif recherché. Cette problématique de re-conception des systèmes de culture n'est pas traitée dans la présente étude, mais demeurera une question importante pour l'évolution des systèmes de culture actuels.

2.3. Effets des cultures intermédiaires sur l'érosion, les propriétés physiques du sol et le bilan carbone

2.3.1. Effet des cultures intermédiaires sur l'érosion et les propriétés physiques du sol

D'une manière générale, l'analyse de la littérature montre qu'il y a consensus pour considérer que l'intérêt des cultures intermédiaires ne se limite pas au seul piégeage de l'azote (CIPAN), mais que les cultures intermédiaires contribuent aussi à la protection des états de surface du sol contre l'érosion et à l'amélioration de l'état structural et des propriétés physiques des horizons du sol explorés par les racines. Ainsi, la mise en place d'une couverture végétale peut être particulièrement intéressante à la fois en termes :

- de protection du sol, notamment au cours de l'hiver, et de facilitation de la préparation du sol pour le semis de la culture suivante. L'amélioration de l'état structural et des propriétés physiques des horizons de surface du sol est la résultante des effets mécaniques de protection de surface du couvert vis-à-vis de la pluie hivernale et d'agrégation du sol lors du développement du système racinaire de la culture intermédiaire, de l'action de la macrofaune du sol sur la porosité du sol, et du fonctionnement hydrodynamique qui en résulte, de modification des calendriers de travail se réalisant à l'automne en cas de semis direct de la culture suivante (sans labour ou travail très superficiel) ;
- d'amélioration du statut organique des sols et des propriétés physico-chimiques qui en dépendent après l'enfouissement de la culture intermédiaire.

Les cultures intermédiaires ont ainsi des effets positifs indéniables pour réduire l'érosion hydrique des sols. Leur biomasse aérienne protège la surface du sol de l'impact des gouttes de pluie, mais leur système racinaire, lorsqu'il est dense et ramifié, contribue également à améliorer la résistance du sol à l'arrachement. Elles

favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol tout en ralentissant le ruissellement en agissant comme des obstacles physiques à son écoulement. Toutefois, l'expression ou l'occurrence de ces effets positifs pour réduire l'érosion n'est pas systématique. L'efficacité des cultures intermédiaires dépend des quantités de biomasses aérienne et racinaire produites, en lien avec les espèces cultivées, mais également de la précocité de semis, des conditions de leur implantation et de la date de leur destruction, en lien avec le climat. On manque cependant d'expérimentations en contexte de climat tempéré qui permettraient de classer les espèces les unes par rapport aux autres en fonction des critères analysés. Le seuil souvent cité dans la littérature et communément admis d'un minimum de 30% de couverture du sol pour obtenir un effet contre l'érosion mériterait, par exemple, d'être consolidé par des expérimentations complémentaires, notamment en fonction de la texture de surface du sol, de la pente et du type de travail du sol.

Les effets de protection sur les propriétés physiques et hydrodynamiques des sols et sur le tassement sont dus principalement à l'effet structurant du système racinaire et à l'augmentation des matières organiques dans le sol. Sur une période d'interculture, les effets des cultures intermédiaires sur la porosité, la stabilité structurale du sol et l'infiltrabilité à la surface du sol sont généralement positifs, mais plus ou moins marqués selon les espèces. Ces effets sont néanmoins, en termes d'intensité, de second ordre comparés aux effets liés à la variabilité climatique, au type de travail du sol effectué pour planter la culture intermédiaire et, plus globalement, au système de culture dans lequel la culture intermédiaire est insérée. L'essentiel des publications concerne des expérimentations réalisées dans des situations différentes des conditions françaises, que ce soit en termes de climat, de sols, de systèmes de culture et d'espèces de cultures intermédiaires. De plus, beaucoup de travaux comparent différents systèmes de culture où la culture intermédiaire n'est pas le seul facteur de variation analysé, ce qui rend difficile de déterminer l'effet de la culture intermédiaire seule. Pour les processus étudiés, l'extrapolation quantitative des résultats analysés aux systèmes français est donc difficile et risquée sans une analyse approfondie des conditions expérimentales, malheureusement souvent insuffisamment précisées.

2.3.2. Effet des cultures intermédiaires sur la séquestration de carbone et d'azote et les émissions de gaz à effet de serre

Si l'intérêt premier des cultures intermédiaires, qui justifie leur insertion croissante dans les systèmes de culture européens, est souvent la réduction de la lixiviation du nitrate, la pratique répétée des CIPAN peut également avoir un impact (positif ou négatif) sur la séquestration de carbone dans le sol et l'émission de gaz à effet de serre (GES) de type CO_2 , N_2O , CH_4 . Les idées généralement admises sont que : i) les cultures intermédiaires ont un faible effet séquestrant sur le carbone et ii) accroissent les émissions de N_2O durant la phase de décomposition des résidus après destruction, iii) produisant au final un bilan mitigé sur les émissions de GES. L'analyse de la littérature scientifique récente dément en grande partie ces hypothèses, indiquant un effet largement positif des CIPAN sur le bilan de GES, dont il conviendra de consolider les résultats par des mesures complémentaires *via* des expérimentations *ad hoc*.

Les études d'inventaire réalisées pour caractériser les variations de stock de matières organiques dans les sols et donc la séquestration de carbone montrent très majoritairement que les cultures intermédiaires conduisent à séquestrer du carbone et de l'azote organique dans les sols. Les valeurs recensées dans la bibliographie indiquent une séquestration d'en moyenne 300 kgC/ha, avec une variabilité assez large (écart-type de 150 kgC/ha). L'intensité de séquestration est beaucoup plus déterminée par la quantité de biomasse produite et incorporée dans le sol (parties aériennes et racinaires) qu'à la nature même de la culture intermédiaire, bien que les légumineuses semblent favoriser la séquestration, au moins en milieu tropical, ce qui reste à mieux comprendre pour savoir s'il s'agit d'un "effet dose" (quantité de C incorporée) ou de qualité biochimique des résidus.

Enfin, le taux d'humification dans le sol du carbone issu des résidus de cultures intermédiaires (plantes non mures) semble être comparable, voire plus important, que celui issu des résidus de culture principale (plantes mures : pailles), contrairement à ce qui est généralement admis. Ce taux d'humification élevé des résidus de CIPAN explique l'effet significatif et important de séquestration du carbone dû aux cultures intermédiaires.

Les essais, encore peu nombreux, mis en place pour mesurer à court terme l'impact des cultures intermédiaires sur les émissions de N_2O montrent que les CIPAN non légumineuses peuvent induire une légère augmentation des émissions de GES après leur incorporation ; cette faible augmentation des émissions de N_2O est en moyenne de 0,11 kg N/ha, mais la variabilité entre expérimentations est très élevée (écart-type de 1,12 kgN/ha).

Néanmoins, le niveau d'émission moyen de N_2O semble nettement plus faible que celui calculé avec les normes actuelles de l'IPCC. Aucun effet n'a été rapporté sur les émissions de CH_4 . Par ailleurs, pour les cultures intermédiaires légumineuses, le manque de références ne permet pas d'estimer leur impact sur les émissions de N_2O .

En climat tempéré, l'impact des cultures intermédiaires non légumineuses sur le bilan de GES peut être déduit en additionnant leur contribution aux émissions de N_2O , le stockage de carbone (qui se traduit par une réduction des concentrations en CO_2 de l'atmosphère), et les émissions de CO_2 liées aux interventions culturales (semis, destruction). La conversion des émissions de N_2O en équivalent CO_2 s'opère en considérant que le pouvoir de réchauffement global du N_2O est 296 fois supérieur à celui du CO_2 . En moyenne, les cultures intermédiaires ont un effet positif sur le bilan de GES observable chaque année où elles sont implantées, avec une réduction moyenne d'environ -1 tonne d'équivalent CO_2 /ha. L'intervalle de confiance du bilan de GES peut être approché par une limite supérieure correspondant au cas le plus défavorable (forte émission de N_2O et faible stockage de carbone, ce qui est peu probable) et une limite inférieure (faible émission de N_2O et fort stockage de carbone). Ce bilan serait compris entre +0,1 et -2,1 tonne d'équivalent CO_2 /ha pour chaque année où une CIPAN est implantée dans la rotation. Il est donc très majoritairement négatif, ce qui indique que la pratique des cultures intermédiaires est bénéfique. Il faut cependant considérer que le stockage de carbone a été calculé ici sur une durée moyenne de 15 ans, considérant i) un processus asymptotique pour le stockage de carbone, et ii) un bilan annuel de GES de moins en moins négatif au cours du temps du fait du déstockage du C par minéralisation des matières organiques du sol. Toutefois, à long terme, ce bilan devrait rester favorable.

Des mesures complémentaires seraient donc nécessaires pour quantifier avec plus de précision l'impact des cultures intermédiaires sur les émissions de gaz à effet de serre et évaluer leur variabilité pour la large gamme de conditions pédoclimatiques et de systèmes de culture français.

2.4. Effets biotiques des cultures intermédiaires sur les adventices, la microflore et la faune

La mise en place de cultures intermédiaires dans le but de piéger l'azote nitrique (CIPAN) ou de protéger le sol contre l'érosion (culture de couverture) doit aujourd'hui s'accompagner d'une réflexion intégrant les objectifs de développement durable en agriculture (réduction de l'usage des pesticides), et donc la question de leurs impacts sur les bioagresseurs (adventices, maladies, ravageurs), sur la biodiversité fonctionnelle (organismes à l'origine de services écosystémiques rendus à la production agricole : auxiliaires zoophages, pollinisateurs, organismes du sol...) et sur la biodiversité culturelle (espèces emblématiques, gibier). Cette section rapporte les effets aujourd'hui documentés des cultures intermédiaires sur les adventices, la microflore et la faune d'intérêt agronomique (ou cynégétique pour ce dernier groupe), qu'il s'agisse de bioagresseurs ou d'organismes "utiles".

2.4.1. Adventices et gestion de l'interculture

Les mécanismes en jeu

L'objectif du recours aux cultures intermédiaires pour la lutte contre les adventices est de remplacer une flore adventice non contrôlable par un couvert maîtrisable.

Les effets des cultures intermédiaires en végétation et de leurs résidus sur les adventices reposent sur différents mécanismes de compétition et de modifications du milieu (eau, azote, lumière, autres éléments nutritifs). Les couverts vivants concurrencent la flore adventice directement pour les ressources. La disponibilité de ces mêmes ressources est également influencée par des modifications du milieu sous les effets des cultures intermédiaires. Ce processus concerne la période de l'interculture, mais aussi la culture suivante. L'allélopathie est (potentiellement) un phénomène d'interaction différent, de nature chimique, faisant intervenir l'émission par certaines plantes et/ou leurs résidus de molécules toxiques pour d'autres plantes. Ces substances peuvent avoir un impact sur la germination des adventices.

Une difficulté dans l'analyse des effets des cultures intermédiaires sur les adventices réside dans le fait que les modes d'action ne peuvent pas être systématiquement distingués les uns des autres. Si la capacité de compétition des couverts pour les ressources abiotiques se manifeste généralement par une croissance rapide et

une production de biomasse élevée, leur efficacité par modification du milieu ou par processus d'allélopathie est difficile à identifier. Il est supposé que les deux mécanismes, de compétition et d'allélopathie, sont généralement conjugués, induisant une concurrence potentiellement élevée face aux adventices. Certains travaux de recherche se concentrent principalement sur l'allélopathie et les substances chimiques responsables de cet effet. Les perspectives d'application directe buttent cependant régulièrement sur la complexité des processus en jeu. Finalement, il apparaît que seule la famille des crucifères montre une activité allélopathique suffisamment caractéristique pour pouvoir envisager une valorisation explicite de cette propriété. Celle-ci ne saurait cependant constituer le mécanisme unique et la solution simple en termes de lutte contre les adventices par les cultures intermédiaires, et les facteurs de variation et de contrôle du potentiel allélopathique au champ restent à déterminer.

Effets des cultures intermédiaires sur la flore adventice

L'implantation d'une culture intermédiaire modifie principalement la chronologie des travaux du sol, et constitue de fait un moyen de concurrencer directement les adventices ou de rendre les conditions du milieu peu favorables à leur développement. L'offre en espèces utilisables en cultures intermédiaires est suffisamment élevée pour répondre à la diversité des conditions pédoclimatiques et culturelles de la France. Ce choix d'espèces issues de familles botaniques différentes des cultures principales permet donc de diversifier le système de culture et de potentiellement rompre le cycle de végétation de certaines espèces adventices. L'effet compétitif du couvert sur les adventices dépend de plusieurs facteurs, comme la rapidité d'installation, la durée de la végétation, la persistance de la biomasse sous forme vivante ou morte après destruction. Les effets de la culture intermédiaire sur les adventices dépendent également de modifications plus ou moins prolongées de l'état de fertilité du sol, en particulier de la moindre disponibilité des ressources nutritives - l'utilisation de légumineuses constituant un cas particulier vis-à-vis des ressources azotées. L'introduction d'une culture intermédiaire dans la rotation conduit aussi à des modifications du travail du sol, lors de l'implantation du couvert et de sa gestion avant la culture suivante. Les enjeux principaux sont d'adapter la gestion des résidus après destruction (incorporation ou mulch à la surface du sol), pour permettre de maintenir l'effet de contrôle des adventices aussi longtemps que possible, voire de réduire l'utilisation d'herbicide, en fin d'interculture ou au début de la culture suivante.

Il est clair que les espèces bisannuelles et vivaces sont plus difficiles à concurrencer par les cultures intermédiaires, de par leur meilleure compétitivité permise par des réserves nutritionnelles (principalement localisées dans les racines) qui leur confère généralement une rapidité de repousse et de croissance.

Cultures intermédiaires, travail du sol et compatibilité avec la pratique des faux-semis

Tout travail du sol a un effet de régulation mécanique des adventices, mais constitue également une modification du milieu favorable à l'expression du stock grainier. Le brassage du sol influence le développement des adventices par des mécanismes tels que l'exposition des graines à la lumière qui peut induire une levée de dormance, l'aération et l'augmentation de la température du sol, la réduction de la couverture par des résidus, l'élimination de substances inhibitrices du sol, l'augmentation du contact sol-graine qui favorise la germination.

Le faux-semis consiste à préparer un lit de semence aussi fin que pour le semis d'une culture à petites graines, à laisser germer une partie du stock semencier d'adventices puis à détruire les graines germées et plantules levées par un travail du sol, voire l'application d'herbicides. Cette technique peut être mise en œuvre plusieurs fois avant le semis de la culture principale, comme c'est souvent le cas en agriculture biologique.

L'association de faux-semis et de cultures intermédiaires reste donc à étudier afin de déterminer les conditions de leur compatibilité. Il semblerait que la gestion des adventices annuelles et des adventices pérennes à régénération par graines, soit compatible avec l'introduction de CIPAN dans certaines successions de culture, parce que les adventices qui auront levé en même temps que la culture intermédiaire seront détruites en même temps qu'elle. Dans ce cas, la phase de préparation du sol de la technique du faux-semis existe bien mais elle est suivie du semis de la culture intermédiaire, et la phase de destruction n'aura lieu que bien plus tard, lors de la destruction du couvert. Il convient néanmoins de souligner que l'implantation de CIPAN peut poser des problèmes pour des espèces dont les semences sont encore trop dormantes au moment de l'implantation de la culture intermédiaire et ne pourront pas germer suite au travail du sol. Le stock semencier peut également rester intact si le travail du sol est réalisé précocement après la moisson et que la pluie post-moisson est insuffisante pour imbiber les semences récemment produites et tombées à terre. Dans ces conditions, les semences d'adventices ne sont pas sensibles à l'effet du faux-semis car elles doivent pouvoir s'imbiber pour germer.

Des travaux récents (basés sur des simulations avec le modèle FLORSYS¹¹) indiquent que les cultures intermédiaires peuvent permettre de réduire la flore plurispécifique automnale grâce au travail du sol accompagnant la mise en place et la destruction des CIPAN. Ainsi, dans des systèmes où le travail du sol était initialement réalisé uniquement au printemps, l'introduction de CIPAN réduit l'infestation des cultures par les adventices, essentiellement parce qu'elle nécessite des opérations de travail du sol en été/automne qui jouent le rôle de faux-semis. Dans des systèmes où une partie du travail du sol était initialement déjà réalisée en été/automne, l'infestation des cultures pourrait, au contraire, augmenter si ce travail du sol n'est pas réalisé au moment où les semences adventices sont sensibles au faux-semis.

Le cas des adventices pérennes à régénération végétative (rhizomes, stolons), tels les chardons de type *Carduus* et *Cirsium* notamment, peut s'avérer plus problématique, bien que des adaptations puissent être envisagées par une gestion spécifique des zones de la parcelle (raisonnement de type agriculture de précision) présentant des foyers d'adventices vivaces. Il convient toutefois de mentionner la nécessité de conduire des recherches sur le sujet, en incluant d'autres adventices pérennes à régénération végétative comme les *Rumex*, le liseron des champs *Convolvulus arvensis* et bien sûr le chiendent rampant *Elymus repens*.

Des recherches sont nécessaires pour quantifier les effets des CIPAN sur la flore adventice

Les effets induits par l'introduction des cultures intermédiaires dans la rotation des cultures via les effets du couvert (modification du milieu, compétition et allélopathie) et de la modification des travaux du sol, peuvent s'avérer importants, allant jusqu'à devoir repenser la stratégie de désherbage : déchaumage ou non pour gérer les repousses ou adventices de la culture précédente, usage d'herbicide (en particulier le glyphosate) pour détruire le couvert végétal et les adventices associées, modification des herbicides utilisés et de leur efficacité pour la culture suivante. Toutefois, l'occurrence de nouveaux problèmes malherbologiques suite à l'introduction de cultures intermédiaires n'a pas été démontrée dans la bibliographie scientifique. Une gestion des cultures intermédiaires dans une perspective de lutte contre les adventices peut potentiellement se traduire par une réduction des applications d'herbicides, mais nécessite, pour cela, une approche adaptée en fonction de la flore adventice, et raisonnée à l'échelle de l'ensemble du système de culture.

La nécessité de prendre en compte de nombreux facteurs déterminant la dynamique de la flore adventice et de sa spécificité en fonction du système de culture et du type de travail du sol, implique de renforcer les travaux de recherche pour mieux comprendre et prévoir précisément l'effet des cultures intermédiaires sur les adventices ; ces travaux peuvent maintenant s'appuyer sur la modélisation, tout autant que sur des expérimentations dédiées.

2.4.2. Microflore et gestion de l'interculture

La période d'interculture peut être gérée de façon à rompre le cycle épidémique des agents pathogènes présents dans la rotation pratiquée, c'est-à-dire en évitant les repousses de cultures et les cultures intermédiaires hôtes des principaux bioagresseurs. Les pratiques de travail du sol qui contribuent à accélérer la dégradation des résidus de culture permettent de diminuer l'inoculum primaire des agents pathogènes. La couverture du sol, en réduisant la projection des spores, est susceptible de limiter la dissémination des pathogènes. Toutefois, tous ces effets potentiellement positifs peuvent être contrebalancés par des effets favorisant les bioagresseurs sous l'influence de nombreux facteurs déterminants.

L'insertion d'une culture intermédiaire peut perturber activement le cycle épidémique de la microflore pathogène du sol, en agissant à différents niveaux : par des mécanismes purement allélopathiques, mais aussi en modifiant la réceptivité du sol aux bioagresseurs, au travers des modifications induites par la culture du couvert, puis par son enfouissement et sa dégradation dans le sol. Alliées, Brassicacées (crucifères) et Poacées (graminées) sont des familles à potentiel allélopathique, dont les effets peuvent s'exprimer par exsudation racinaire ou après broyage de leurs tissus. Mis à part l'avénacine (produite par l'avoine) qui présente une action spécifique sur les Oomycètes, les autres substances présentent de nombreuses cibles biologiques. La nature, les quantités et la persistance des composés toxiques émis sont extrêmement variables selon les paramètres culturels,

¹¹ Colbach et al. (2012). Using a sensitivity analysis of a weed dynamics model to develop sustainable cropping systems. II. Long-term effect of past crops and management techniques on weed infestation. Journal of Agricultural Science, Cambridge (in press). Colbach et al. (2012). Changing agricultural practices modifies the species and trait composition of the weed flora. A simulation study using a model of cropping system effects on weed dynamics. Proc. 6th International Weed Science Congress, Hangzhou, China, 17-22 June 2012.

édaphiques et biologiques, mais aussi selon les techniques mises en œuvre lors du broyage et de l'incorporation au sol. La biofumigation, application agronomique du phénomène d'allélopathie, est basée sur la présence, dans les tissus et dans les exsudats racinaires de Brassicacées, de divers glucosinolates (GSL) transformés ensuite en isothiocyanates (ITC) potentiellement toxiques vis-à-vis des bioagresseurs telluriques. Pour maximiser les effets, la biofumigation est souvent pratiquée (notamment en cultures légumières) en cultivant une espèce spécifique en interculture puis en la broyant "en vert" et en l'enfouissant, généralement au stade floraison. Certaines espèces de Brassicacées sont particulièrement choisies pour leur forte teneur en certains GSL afin de produire des effets sur certains pathogènes. Toutefois, il faut noter que ces molécules ayant un spectre large d'action, des organismes non pathogènes, voire bénéfiques, de la microflore peuvent aussi être affectés.

Hormis ces phénomènes d'allélopathie, la simple culture d'un couvert induit de multiples changements physico-chimiques et biologiques dans le sol, et a donc des effets parfois importants sur la réceptivité du sol aux maladies, phénomène difficile à démontrer et à dissocier d'autres effets.

En ce qui concerne l'enfouissement des résidus de culture intermédiaire dans le sol, la plupart des études mettent en avant les changements induits au niveau des communautés microbiennes telluriques, à savoir une stimulation de l'activité des populations antagonistes indigènes dans le sol, stimulation inversement corrélée avec le niveau de maladies. Il semble que l'efficacité d'une espèce, voire d'une variété, soit d'autant plus importante que les antagonistes naturels sont déjà bien installés dans le sol (notion de "santé du sol", mais qui prête à débat dans la littérature scientifique). Les espèces phytopathogènes ayant d'importantes capacités saprophytiques sont susceptibles de fortement se multiplier et de provoquer des dégâts, avant que les phénomènes de régulation biologique naturelle ne se manifestent. La biofumigation est un exemple intéressant pour illustrer la complexité et la multiplicité des mécanismes en cause lors de l'insertion de cultures intermédiaires en interculture : bien au-delà de la simple toxicité des métabolites secondaires, comme les ITC pour les Brassicacées, des interactions microbiologiques complexes expliquent aussi les effets suppressifs sur des pathogènes.

Les cultures intermédiaires influent également sur la microflore tellurique utile. Certaines espèces peuvent avoir un effet stimulant sur des ennemis naturels très importants des nématodes que sont les champignons antagonistes, amplifiant ainsi la régulation naturelle. De même, en ce qui concerne les mycorhizes, qui jouent un grand rôle pour capter et transférer les nutriments, les cultures intermédiaires peuvent permettre de rétablir la diversité et la densité mycorhiziennes perturbées, par des monocultures par exemple. Par contre, les Brassicacées n'hébergeant pas de mycorhizes, les couverts à base de plantes de cette famille réduisent à terme les populations mycorhiziennes préexistantes par la libération d'ITC toxiques pour les champignons du sol. Enfin, d'une manière générale, l'activité microbiologique des sols est fortement dépendante du type de rotation pratiquée, et la mise en place de cultures intermédiaires, de même que les apports de matières organiques, peuvent permettre de l'accroître, au bénéfice de plusieurs paramètres influençant la santé des plantes, mais à condition que peu d'organismes bénéfiques de la microflore soient détruits.

2.4.3. Faune (invertébrés, vertébrés) et gestion de l'interculture

Cette section traite des effets des cultures intermédiaires sur la faune (micro-, méso- et macro-faune), mais aussi sur la faune épigée et aérienne du sol, qu'il s'agisse de ravageurs des cultures, d'auxiliaires ou bien d'organismes neutres vis-à-vis des cultures.

Les premiers travaux, démarrés dès les années 1970, sur les nématodes phytoparasites ont mis en évidence de fortes variabilités spécifiques et intraspécifiques, tant en ce qui concerne les effets des cultures intermédiaires sur ces ravageurs que les réponses de ces derniers aux divers génotypes testés. Malgré cette variabilité intraspécifique parfois importante, des constantes apparaissent pour certaines espèces, bien que les résultats soient également dépendants de la race des espèces de nématodes, rendant l'évaluation de l'effet des CIPAN sur les nématodes relativement complexe. Certains effets, de Brassicacées par exemple, semblent établis : le radis oléifère et la moutarde blanche sont efficaces contre le nématode à kyste de la betterave, les moutardes brune et blanche contre des nématodes à galles des racines de cultures légumières. Mais toutes les Brassicacées ne sont pas d'égal intérêt contre les nématodes, et le navet s'est par exemple avéré être un hôte important de trois espèces de *Meloidogyne*. D'autres espèces, particulièrement chez les Poacées, montrent des propriétés intéressantes pour lutter contre des nématodes. Mais là encore, chez les avoines par exemple, des différences d'effets sur les nématodes existent entre espèces proches ou variétés. Les principaux mécanismes

impliqués dans la diminution des nématodes concernent le caractère non-hôte des plantes (suppression passive) ou leur caractère allélopathique (suppression active).

Les diverses espèces et groupes trophiques de nématodes du sol sont considérés comme de bons indicateurs de ses propriétés physico-chimiques et réseaux trophiques. Or les résidus de culture intermédiaire déterminent, selon leur composition biochimique, la voie microbienne dominante de leur dégradation, dont les effets sur les communautés nématologiques semblent supérieurs à ceux des paramètres de température, d'humidité, de pH et de texture du sol. Ainsi, ils favorisent les groupes trophiques qui en dépendent, et cette diversification s'accompagne d'une baisse de dominance des espèces de nématodes phytoparasites.

Les micro- et méso-arthropodes sont favorisés par les cultures intermédiaires et leurs résidus, notamment quand le mulch de résidus laissés en surface est suffisant pour modifier le microclimat à la surface du sol. Parmi ces derniers, les acariens prédateurs de nématodes permettent la diminution des nématodes phytoparasites. Les caractéristiques physico-chimiques et les types de travail du sol ont une influence variable selon les groupes de micro- et méso-arthropodes, les scutigérelles étant par exemple très peu limitées par le mode de travail du sol mais beaucoup plus par l'introduction de diverses espèces de culture intermédiaire.

Concernant la macrofaune, les cultures intermédiaires et leurs résidus ont des effets très favorables sur les populations de vers de terre ; cet effet est d'autant plus important que la parcelle est conduite sans travail du sol. Les vers de terre accélèrent l'incorporation des résidus dans le sol et en améliorent les propriétés physico-chimiques. Il a par ailleurs été montré qu'une densité élevée de vers de terre est corrélée à une diminution de la pression de certains ravageurs, notamment des nématodes phytoparasites.

Les limaces font partie des ravageurs de la macrofaune du sol les plus susceptibles d'être favorisés par certaines cultures intermédiaires et leurs résidus. Toutefois, d'importantes différences existent entre espèces de couverts et entre sites.

Plusieurs espèces de Coléoptères, Diptères et Lépidoptères peuvent voir leurs stades larvaires, qui sont les stades ravageurs des cultures, favorisés par la mise en place d'une culture intermédiaire. Toutefois, il semble qu'une activité biologique du sol importante permette d'en réduire les populations, grâce à des régulations par divers antagonistes ; ces hypothèses mériteraient toutefois d'être vérifiées.

Les invertébrés épigés et aériens voient également leur dynamique influencée par la mise en place d'une culture intermédiaire. En cultures pérennes, les couverts d'interculture ont démontré leurs effets globalement favorables sur la diversité des prédateurs généralistes et, par voie de conséquence ou directement, défavorables sur la dynamique de nombreux ravageurs. En cultures annuelles, les effets des espèces, voire des variétés, de culture intermédiaire sur les ravageurs et auxiliaires semblent très spécifiques des divers génotypes, et le screening de ces derniers vis-à-vis des arthropodes d'importance permet ainsi d'orienter le choix tant des espèces de cultures intermédiaires que des cultures principales qui leur sont associées ou leur succèdent, afin de minimiser les risques de dommages aux cultures. Ce résultat est parfois conditionné par une augmentation des auxiliaires qui sont eux aussi potentiellement favorisés par les cultures intermédiaires et leur mulch (notamment les prédateurs de graines d'adventices). A l'instar des jachères fleuries, qui ont montré leur intérêt potentiel pour les pollinisateurs en déclin dans les pays industrialisés (mais sont par ailleurs critiquées du fait de leurs espèces allochtones parfois inadaptées), les cultures intermédiaires angiospermes entomophiles, à condition d'être plurispécifiques et attractives, pourraient représenter une opportunité intéressante pour favoriser les insectes floricoles et reconstituer des réseaux efficaces de pollinisation dans les agro-écosystèmes.

Concernant les vertébrés, les cultures intermédiaires indiquées comme favorisant la faune sauvage, le sont en raison de leur grande attractivité pour les oiseaux granivores. Mais plus généralement, la plupart des oiseaux des paysages agricoles ont besoin de pouvoir accéder à des zones de sol nu, et seront défavorisés par les parcelles de culture intermédiaire à couverture végétale dense. Les micro-mammifères quant à eux sont particulièrement favorisés par les couverts permanents en arboriculture, surtout s'ils sont à base de légumineuses, et des recherches sur des génotypes répulsifs sont en cours.

Finalement, le bilan des connaissances sur les relations entre culture intermédiaire et invertébrés ou vertébrés met en exergue, d'une part, des lacunes et de forts besoins de recherche pour une meilleure utilisation des cultures intermédiaires dans la régulation des ravageurs (de nombreux ravageurs et auxiliaires importants restant non étudiés sur ce plan), et d'autre part, le fait que les interactions connues révèlent des comportements de type idiosyncrasique (*i.e.* ne répondant à aucune règle, au moins élucidée, mais à des particularités d'apparence

individuelle) tant au niveau générique que spécifique. L'amélioration de ces connaissances permettrait d'éviter de favoriser des ravageurs par certains couverts, mais devrait aussi permettre d'être plus efficace pour favoriser des espèces auxiliaires des cultures. L'essentiel des connaissances sur les effets des repousses de cultures sur les ravageurs et auxiliaires repose sur des observations voire des connaissances empiriques, et les très rares travaux scientifiques mentionnent l'absence de risques réels pour la même culture suivante.

2.4.4. La difficulté d'intégrer les différents effets biotiques

Pour les trois groupes biologiques d'organismes étudiés, l'utilisation des cultures intermédiaires doit être encore largement précisée dans ses diverses modalités possibles de gestion, modalités qui doivent être compatibles avec leur fonction première de CIPAN, avant que ces couverts ne constituent finalement un moyen efficace de pilotage de l'interculture à des fins annexes de nature phytosanitaire. Néanmoins, quelques processus biologiques bénéfiques, plus constants ou déjà mieux connus, tels l'augmentation de l'activité biologique des sols qui favorise la diversité des ennemis des nématodes et donc la régulation de ces derniers, mais aussi les effets allélopathiques de plusieurs espèces et variétés de Brassicacées ou Poacées à l'encontre de certains bioagresseurs (biofumigation contre des maladies telluriques et certains nématodes), pourraient déboucher plus rapidement que d'autres sur des applications intéressantes dans le pilotage de systèmes de culture.

A côté de ces aspects positifs qu'il est important de souligner, mais surtout d'approfondir pour rendre leurs diverses applications plus rigoureuses et plus réalistes à large échelle, il est également important d'intégrer les aspects négatifs des cultures intermédiaires dans la conception et la conduite des systèmes de culture. Il convient donc de mettre en exergue que : (i) les cultures intermédiaires favorisent de façon quasi systématique les populations de limaces, (ii) certaines espèces de CIPAN favorisent également des agents phytopathogènes à propriétés partiellement saprophytiques, et (iii) l'efficacité des cultures intermédiaires à l'encontre des adventices, mais aussi des autres bioagresseurs, dépend très fortement d'une part des paramètres agronomiques et d'autre part de facteurs déterminant leur croissance et du type de travail du sol.

L'analyse de la bibliographie scientifique internationale montre clairement des potentialités mais aussi des risques d'échec, voire d'amplification de problèmes phytosanitaires. Ces effets variables sont essentiellement dus à des particularités spécifiques et intraspécifiques des organismes en jeu. L'analyse scientifique de cette diversité d'informations doit donc être empreinte de prudence et souligner la forte variabilité des effets, qu'il convient de prendre en compte. D'un autre côté, il apparaît que la littérature technique française, à destination directe des conseillers agricoles et des agriculteurs, met surtout en avant les risques phytosanitaires des cultures intermédiaires. Ces avis, très certainement fondés pour l'essentiel sur des observations de terrain, mériteraient d'être nuancés et éclairés par une compréhension des processus. Toutefois, il convient de souligner qu'en 2006 (enquête "Pratiques culturales") déjà 48% des betteraves sucrières étaient précédées d'une CIPAN de type moutarde blanche avec des variétés dites "anti-nématodes". Cela illustre qu'il est possible, sous certaines conditions, de combiner CIPAN et effet positif pour la réduction de certains bioagresseurs.

En conclusion, cette analyse ne fait que renforcer la nécessité de poursuivre voire d'intensifier les recherches dans ce domaine afin de parvenir à une utilisation la plus maîtrisée possible des CIPAN sur un plan phytosanitaire, en fonction de leurs risques réels mais aussi de leurs réelles opportunités.

2.5. Conclusion : une analyse bibliographique riche mais incomplète

L'analyse bibliographique a permis de comprendre les principaux mécanismes biophysiques à l'œuvre pendant l'interculture et d'expliquer l'intérêt des cultures intermédiaires et d'autres techniques dans la gestion de l'azote à l'échelle du système de culture. Elle a également permis de décrire les autres fonctions des couverts végétaux d'interculture. Cependant, la bibliographie scientifique ne couvre pas une gamme de situations permettant d'appréhender la variabilité des situations agro-pédoclimatiques françaises et les nombreux facteurs qui déterminent l'efficacité des CIPAN et leur effet sur la culture suivante. Il en va de même pour les autres effets induits par les cultures intermédiaires, notamment vis-à-vis des bioagresseurs et auxiliaires des cultures, que la seule littérature scientifique ne permet pas de hiérarchiser ni d'intégrer.

Devant cette très grande variabilité, il est impossible d'imaginer un dispositif expérimental qui permettrait d'élaborer des références pour répondre à toutes les questions qui se posent dans les divers contextes agro-pédoclimatiques. Par conséquent, en ce qui concerne la fonction de piège à nitrate et des effets sur la culture suivante, le recours à la modélisation est pertinent. Près de 1 300 000 situations de gestion de l'interculture ont ainsi pu être simulées. La présentation des résultats de ce travail fait l'objet de la section suivante.

3. Principaux enseignements de l'étude par simulation

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

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

L'étude par simulation menée en complément de l'analyse bibliographique est réalisée dans des contextes pédoclimatiques français diversifiés et comporte 3 volets¹² (Figure 6) :

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

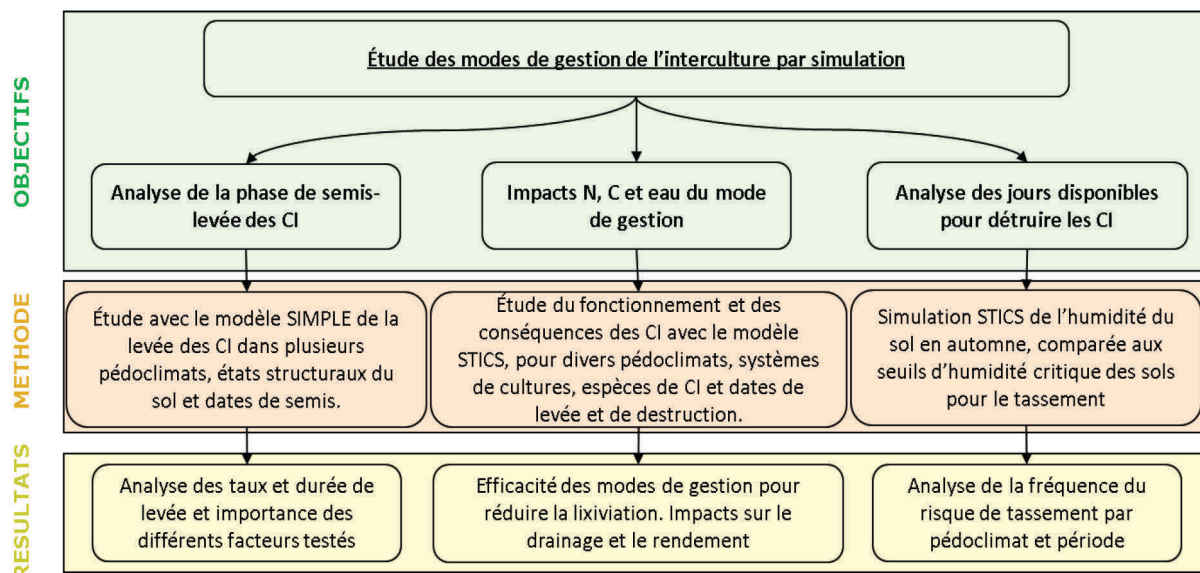


Figure 6. Récapitulatif des différents volets de l'étude par simulation, de leurs objectifs, méthodes générales et résultats attendus

Ainsi, ce travail de simulation vise à évaluer l'impact des cultures intermédiaires en fonction des espèces utilisées, de leurs modalités de gestion (dates de semis et de destruction) et de leur durée d'implantation, dépendant notamment des précédents et des cultures suivantes, semées en hiver ou au printemps (Figure 7).

¹² Pour les résultats complets de ces 3 études par simulation, voir respectivement les chapitres 10, 8 et 9 du rapport.

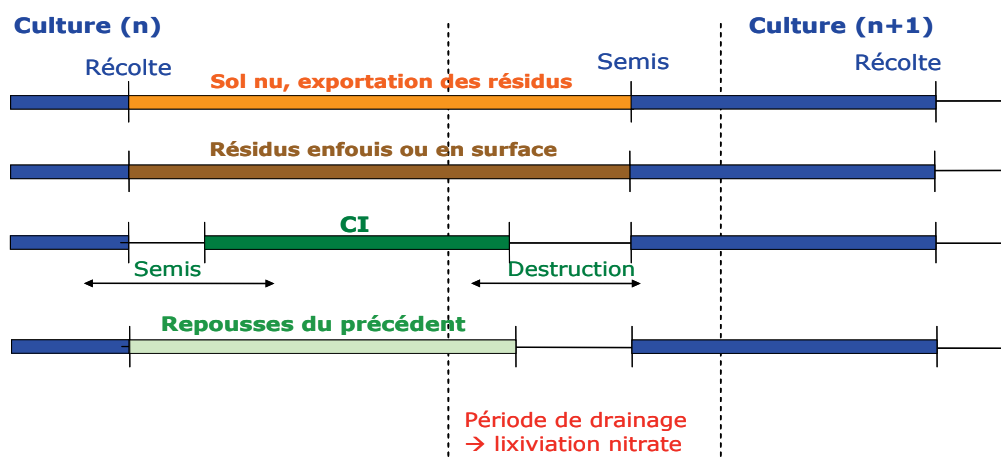


Figure 7. Représentation schématique des différentes modalités de gestion de l'interculture dans une succession de cultures annuelles ayant un impact sur les bilans d'azote, d'eau et de carbone

Les situations sélectionnées permettent de simuler une gamme variée de gestions de l'interculture dans des systèmes de culture, des climats et des sols cohérents régionalement, couvrant ainsi une large gamme des possibles, mais sans avoir l'ambition d'être exhaustif. Elles se basent sur le choix : d'une part, de sites climatiques, de types de sols, de successions de cultures et de niveaux de reliquat d'azote minéral dans le sol à la récolte du précédent ; et d'autre part, de plusieurs types de couverts intermédiaires, de différentes conduites de ces couverts et de plusieurs modalités de gestion des résidus de la culture précédente.

3.2. Méthodologie des trois volets de l'étude par simulation

3.2.1. Les situations simulées¹³

Les sites climatiques

Dans un premier temps, un zonage climatique, basé sur des données mensuelles issues du modèle SAFRAN (Météo-France) sur la période 1993-2004 et sur des mailles de 12 x 12 km environ, a été réalisé sur l'ensemble du territoire français afin d'en caractériser la variabilité climatique et de sélectionner des sites contrastés, représentant une large gamme de conditions climatiques en interculture. Les variations de la température moyenne ayant un gradient Nord-Sud en été et Est-Ouest en hiver bien marqué, une représentativité de ces contrastes est assurée par la répartition des stations climatiques choisies sur l'ensemble du territoire.

Dans un second temps, un zonage climatique a été réalisé sur la base des données journalières couvrant la période des mois d'août à mars, calendrier large concerné par la mise en place des cultures intermédiaires à l'échelle de l'ensemble du territoire français. Les variations de la température moyenne conservent un double gradient Nord-Sud et Est-Ouest, sur l'ensemble du territoire (Figure 8-a). Le cumul du déficit climatique (différence de Pluie - ETP) sur la période d'août à mars est beaucoup plus variable régionalement (Figure 8.b). Cette caractéristique a été prise en compte dans le choix des sites.

Au final, pour chacun des 24 sites retenus, 20 années climatiques, 1998 à 2008 (données du modèle SAFRAN), sont considérées. Il faut noter que le choix des stations a été fait de façon à représenter tous les contrastes du territoire français des grandes cultures (hors zones de montagne), mais sans toutefois remplir d'objectif de représentation spatialement pondérée de ces contrastes en fonction de la surface de grandes cultures. L'objectif premier est d'analyser l'effet des CIPAN pour toute la gamme des situations pédoclimatiques françaises.

¹³ Pour le détail des situations retenues pour les simulations, voir rapport, chapitre 7.

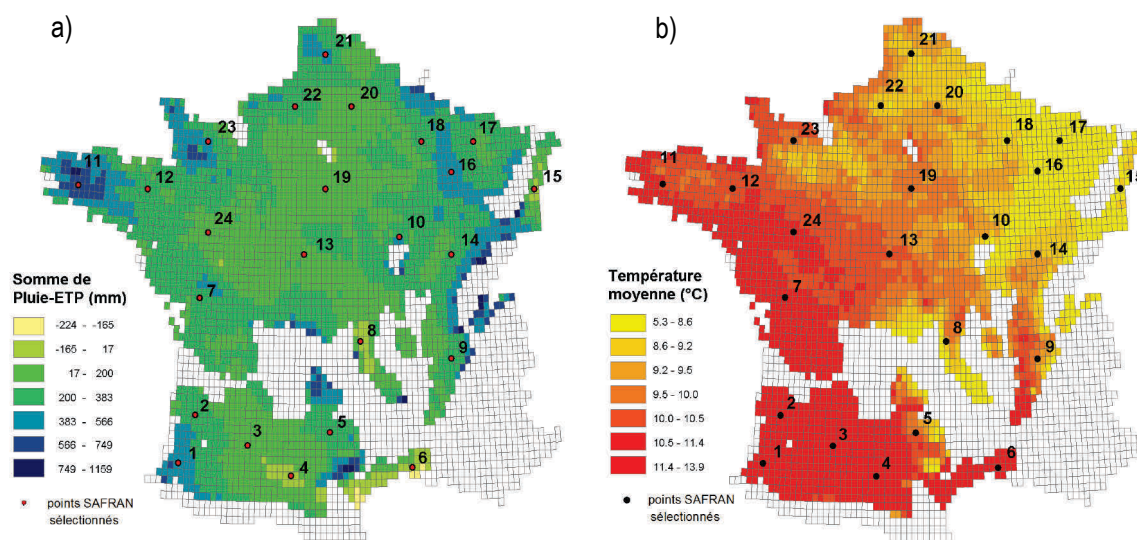


Figure 8. Zonage par (a) classes de somme (P-ETP) et (b) températures moyennes sur la période d'août à mars des mailles météorologiques situées dans les grandes régions agricoles concernées par les "zones vulnérables Nitrates" et localisation des 24 sites climatiques sélectionnés

Les sols

Pour chaque site climatique et sa région agricole environnante, 2 à 4 sols représentatifs en termes de réserve utile en eau (RU), profondeur et texture de surface ont été choisis à partir de la base de données des sols de France à l'échelle 1/1 000 000. La sélection n'a pas visé l'exhaustivité des sols mais une gamme assez large de types de sols caractérisés par des profondeurs et des RU contrastées, et représentatifs de la zone considérée (Figure 10).

Les sols retenus appartiennent à 4 des 5 classes du triangle de texture (Figure 9) : textures grossière (sols sableux), moyenne (limons), moyennement fine (sols limono-argileux) et fine (sols argileux).

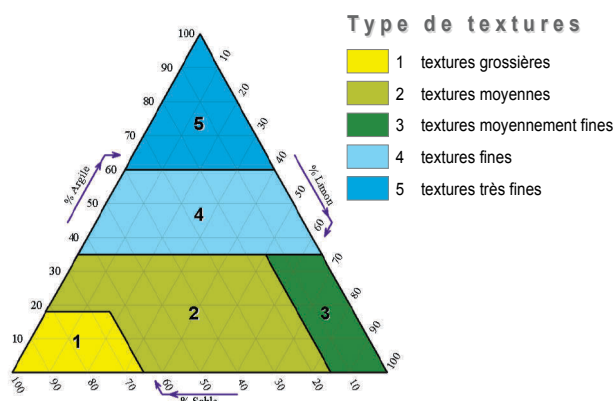


Figure 9. Diagramme triangulaire des classes de texture (CEC, 1985)

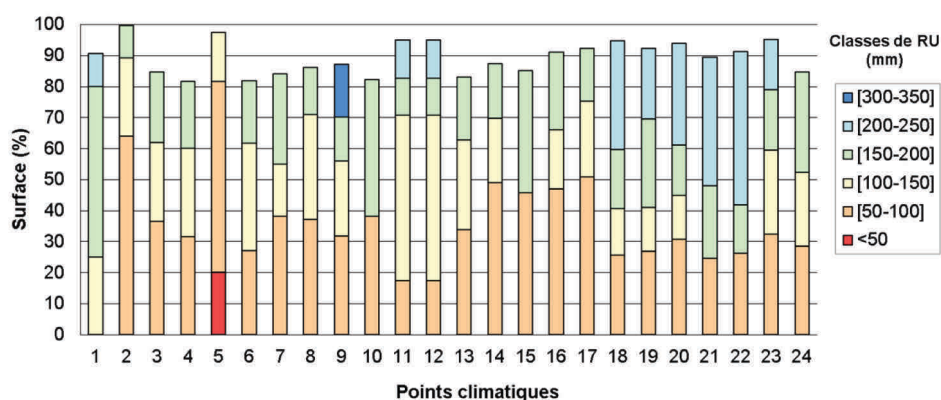


Figure 10. Surface cumulée des types de sols français représentés par leur classe de RU (exprimée en mm) associés à chaque site climatique de la Figure 8

La texture très fine (taux d'argile > 45%) n'est pas représentée car elle correspond à des sols en argile lourde très spécifiques, ayant des propriétés physiques et hydrodynamiques difficiles à prendre en compte, notamment dans des modèles de simulation de culture comme STICS (cf. section 3.2.2, ci-dessous) ; de plus, ces sols portent peu de grandes cultures.

Les successions culturales et types d'interculture

Trois types d'interculture ont été définis par le couple précédent-suivant (culture principale précédente - culture principale suivante) :

- Blé-Maïs : interculture longue après récolte estivale ;
- Colza-Blé : interculture courte avec un semis de la culture suivante à l'automne ;
- Maïs-Maïs : interculture longue avec une récolte tardive du précédent.

Le blé est du blé d'hiver, tendre ou dur et le maïs en grain ou ensilage selon la région considérée.

Ces 3 successions culturales types représentent, d'une part, une surface importante dans les systèmes de culture français, et d'autre part, la gamme des durées d'interculture pour lesquelles une culture intermédiaire peut être implantée. Enfin, on les retrouve dans toutes les régions françaises, même si leur surface est variable.

Les itinéraires techniques de gestion de l'interculture

Les modalités de gestion de l'interculture simulées sont :

- un sol nu, avec 3 gestions des résidus de la culture précédente : exportés, enfouis ou laissés en surface ;
- 5 couverts : 3 cultures intermédiaires (une crucifère : la moutarde blanche, une graminée : le ray-grass italien et une légumineuse : la vesce) et 2 repousses de la culture précédente (colza et blé). Avec, pour les repousses, 2 hypothèses : couvert dense et homogène (100%), et 50% pour simuler un couvert spatialement hétérogène ;
- un apport de lisier de porc, de 75 ou 150 kgN/ha, à la période de semis de la culture intermédiaire.

Les itinéraires techniques (labour, fertilisation, irrigation...) sont établis pour chaque type de culture suivante en fonction des pratiques régionales analysées comme dominantes dans l'enquête "Pratiques culturales" 2006. Trois hypothèses de reliquat d'azote à la récolte ont été retenues : états initiaux N1 (20 kgN/ha), N2 (60 kgN/ha) et N3 (100 kgN/ha), permettant de considérer des états variés issus d'une gestion plus ou moins stricte de la fertilisation azotée.

Pour les cultures intermédiaires, 6 dates de levée (de juillet à octobre) et 6 dates de destruction (d'octobre à mars) sont testées dans les simulations.

3.2.2. Le modèle de culture choisi : STICS (version 6.9)

Description simplifiée du modèle STICS

Le modèle de culture sol-plante-atmosphère STICS¹⁴ est un modèle monodimensionnel intégrant les variabilités et la diversité du climat, du sol et des modalités techniques, qui simule les bilans d'eau, de carbone et d'azote à un pas de temps journalier (Figure 11). Il gère les effets simples ou combinés des stress hydrique et azoté. Les stress abiotiques autres qu'hydrique et azoté ne sont pas pris en compte par le modèle, ni les stress biotiques (maladies, ravageurs).

STICS simule des variables de rendement (quantité et qualité) et des variables environnementales comme la lixiviation de nitrate. Son principal intérêt est de pouvoir simuler les conséquences des variations du milieu et du système de culture sur la production, et l'impact environnemental de cette production concernant l'eau et l'azote, et le carbone.

La culture est appréhendée globalement par sa biomasse aérienne et sa teneur en azote, son indice foliaire ainsi que le nombre, la biomasse et la teneur en azote des organes récoltés. Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales, caractérisées chacune par sa réserve en eau, et en azote minéral et organique. Les interactions entre le sol et la culture sont assurées par les racines, définies par une distribution de densité racinaire dans le profil de sol. La croissance de la culture est pilotée par le bilan de carbone, où le rayonnement

¹⁴ Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruguey F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Dürr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311-346. Cet article a été cité 227 fois (source : Web of science).

Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N. (2008), Conceptual basis, formalisations and parameterisation of the STICS crop model, Editions QUAE, INRA, 304 p.

solaire intercepté par le feuillage est transformé en biomasse aérienne via la photosynthèse. Le bilan azoté de la culture est simulé parallèlement au bilan de carbone, dont il dépend en partie, la biomasse étant simulée en fonction du statut azoté de la plante et de la disponibilité en azote minéral du sol.

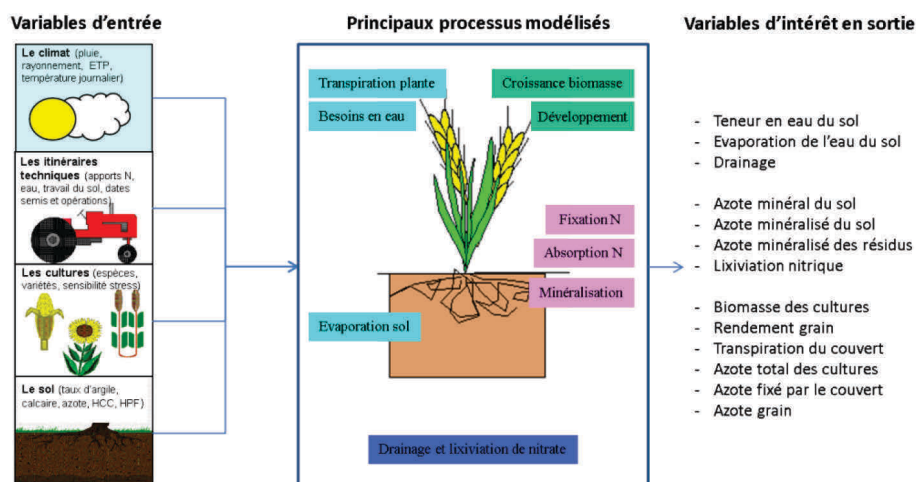


Figure 11. Représentation schématique des données d'entrée du modèle STICS, des principaux processus simulés et des variables de sortie d'intérêt pour l'étude

Qualité prédictive et domaine de validité de STICS

Préalablement à ce travail de simulation, la qualité prédictive du modèle STICS a été évaluée et son domaine de validité déterminé, pour simuler aussi bien les grandes cultures que les cultures intermédiaires, et s'assurer que les processus prépondérants dans les cycles du carbone, de l'eau et de l'azote étaient correctement simulés. A titre d'illustration, est présentée la confrontation, effectuée en phase de validation initiale du travail, entre données expérimentales et résultats des simulations concernant la quantité d'azote acquise par la culture intermédiaire (Figure 12). Les évaluations de la qualité prédictive ont aussi concerné les bilans d'eau et la minéralisation des résidus de CIPAN. L'ensemble de ces "validations" a indiqué que les simulations étaient suffisamment précises pour les considérer comme fiables.

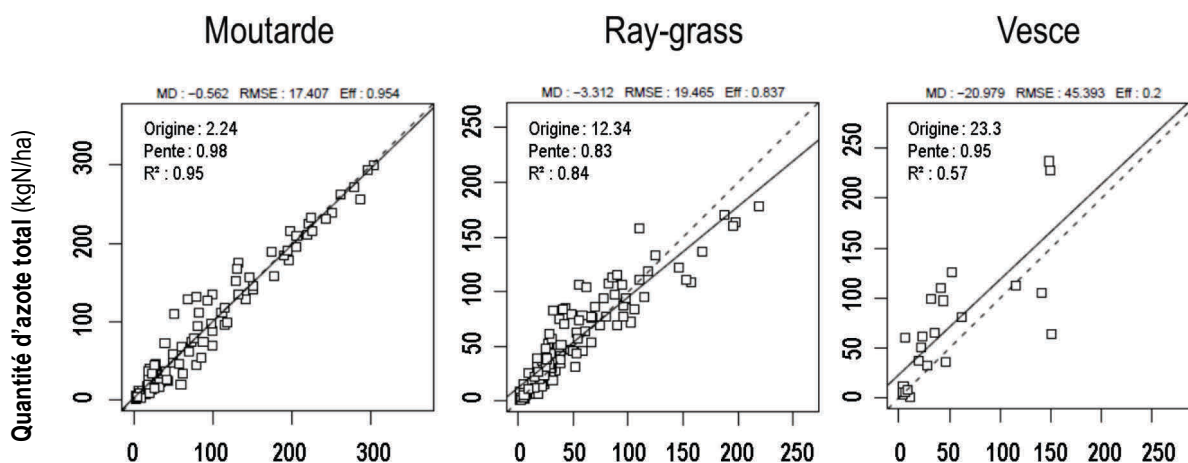


Figure 12. Comparaison des quantités d'azote absorbées par les 3 espèces de CI (valeurs simulées en ordonnée et mesurées en abscisse). MD = Déviation moyenne, RMSE = Erreur-type, Eff = Efficacité du modèle

Le modèle STICS est paramétré pour les cultures principales¹⁵ dont le blé, le maïs et le colza, mais aussi pour les cultures intermédiaires de moutarde et de ray-grass d'Italie¹⁶. Le niveau de précision des simulations est

¹⁵ Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N. (2008). Conceptual basis, formalisations and parameterisation of the STICS crop model. Editions QUAE, INRA, 304 p.

globalement de l'ordre de 15 à 20% d'erreur sur les variables d'azote absorbé, de biomasse et de rendement. La précision est généralement meilleure sur le bilan hydrique et le stock d'eau du sol (souvent moins de 10% d'erreur), mais elle est plus faible pour le stock d'azote minéral du sol (généralement entre 15 et 25%) car de nombreux processus (physiques, chimiques et biologiques) se produisent simultanément.

Par ailleurs, un nouveau paramétrage du modèle STICS pour la vesce a été réalisé, dans le cadre de ce travail, à partir des données non publiées fournies par l'INRA de Toulouse (UMR AGIR), complétées par des données d'Arvalis-Institut du Végétal et du CETIOM. Un paramétrage complémentaire a été réalisé pour simuler correctement les repousses de colza et de blé à partir du paramétrage initial de ces deux cultures principales.

Enfin, une comparaison des résultats issus des situations simulées et des données expérimentales qui ont servi à paramétrer et à évaluer le modèle STICS ont permis de s'assurer que le modèle n'est pas utilisé pour réaliser des simulations en dehors de son domaine de validité.

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

3.2.3. Evaluation des jours potentiellement disponibles à l'automne pour la destruction du couvert

Le nombre de jours potentiellement disponibles pour la réalisation d'une destruction mécanique de la culture intermédiaire à l'automne a été évalué sur la base de la caractérisation de l'état physique du sol. La portance du sol, liée à sa texture, sa masse volumique et son humidité, a été calculée journalièrement, sur cette période automnale, pour déterminer des jours permettant une destruction des cultures intermédiaires dans de bonnes conditions. Cette évaluation a été réalisée sur les 24 sites climatiques et pour les différents types de sols. Ainsi, une large gamme de sols, allant de sols argileux (37-43% d'argile) à sableux (> 80% de sable), a été étudiée. Les simulations ont été réalisées sur les 20 années climatiques.

Pour chaque type de sol, un seuil d'humidité critique par horizon de sol (0-10 et 10-30 cm) a été calculé en fonction de la texture et de l'humidité à la capacité au champ (ou capacité de rétention d'eau) du sol, ainsi que de la contrainte exercée par l'engin agricole lors de la destruction mécanique de la culture intermédiaire (40 kPa). Ces seuils d'humidité, pour des contraintes d'engins agricoles de 40 kPa, varient de 100 à 139% de l'humidité à la capacité au champ, avec des seuils critiques d'autant plus faibles que le sol a une teneur en argile élevée.

La simulation journalière de la teneur en eau des deux horizons superficiels du sol, calculée par le modèle STICS, est ensuite utilisée comme critère pour évaluer la portance du sol et en déduire le risque de tassement jour par jour. Un jour est alors considéré comme étant disponible si les humidités de chacun des deux horizons sont inférieures au seuil critique de l'horizon. Si la condition n'est pas remplie pour au moins l'une des couches de sol, le jour est considéré "à risque" pour le tassement, et donc indisponible.

3.2.4. Phase de semis-levée des CIPAN simulée avec le modèle SIMPLE

Caractérisation du modèle SIMPLE

SIMPLE¹⁷ est un modèle qui simule la germination et la levée de différentes cultures. Le modèle permet de prévoir un taux ainsi qu'une vitesse de germination et de levée. Ses variables d'entrée (Figure 13) caractérisent les espèces étudiées, et définissent les conditions environnementales dans le lit de semences (température et

¹⁶ Dorsainvil F. (2002). Evaluation par modélisation de l'impact environnemental des modes de conduite des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote dans les systèmes de culture. Thèse Docteur Ingénieur INAPG. 124 p.

¹⁷ Dürr C., Aubertot J.N., Richard G., Dubrulle P., Duval Y., Boiffin J. (2001). SIMPLE: a model for SIMulation of PLant Emergence predicting the effects of soil tillage and sowing operations. Soil Science Society of America Journal, 65, 414-42. Cet article a été cité 33 (source : Web of science).

teneur en eau) et le résultat du travail du sol et du passage du semoir dans un sol donné (taille et organisation spatiale des agrégats, positionnement des semences).

Ce modèle est de type stochastique : chaque simulation est réalisée en simulant le devenir de 1000 graines semées. Les graines sont réparties dans les couches de sol par tirage au sort dans une distribution des profondeurs auxquelles se répartissent les semences mises en sol. Cette distribution dépend du type de travail du sol et du semoir utilisés. Plusieurs causes de non-levée sont simulées : la non-germination, la mort de la plantule due à un stress hydrique sur la racine après germination, le blocage sous motte ou sous croûte de battance, une longueur de la plantule insuffisante pour atteindre la surface. Les effets des bioagresseurs et ravageurs ne sont pas simulés.

Parmi les 24 sites retenus pour les simulations sous STICS, 9 ont été sélectionnés pour cette étude de la phase semis-levée, de manière à représenter la gamme des différentes classes de (pluie-ETP) et de température moyenne pendant la période de l'interculture. Il s'agit des sites 2, 4, 6, 10, 11, 15, 20, 21 et 24 (voir Figure 8).

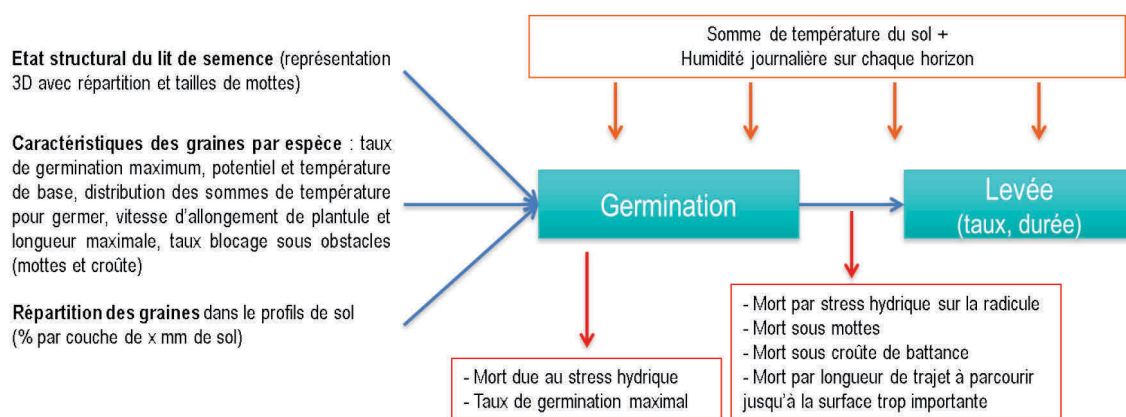


Figure 13. Représentation simplifiée du fonctionnement du modèle SIMPLE

Les simulations ont été réalisées pour les trois espèces de culture intermédiaire (moutarde, ray-grass d'Italie et vesce) et 3 dates de semis (15/07, 15/08, 15/09). Les simulations sont menées jusqu'au 10 novembre suivant. Trois états structuraux du lit de semence ont été retenus : fin, intermédiaire et grossier. Ces états se distinguent par la proportion de mottes de différentes dimensions, et par leur organisation spatiale dans le lit de semence (profondeur/surface). Trois types d'implantation ont été simulés : un semis à la volée sans travail du sol, les graines étant recouvertes par les pailles broyées ; un semis à la volée après travail superficiel ; un semis au semoir à céréales après labour puis passage de herse pour préparer le lit de semence. Les simulations tiennent compte de l'interaction entre l'état structural du sol et le profil de répartition des graines dans le lit de semences.

Domaine de validité de SIMPLE

Le modèle SIMPLE a été validé sur des expérimentations au champ de cultures intermédiaires pour divers pédoclimats et types de semis¹⁸. Il est néanmoins important de préciser le domaine de validité du modèle. Tout d'abord, les graines sont considérées comme suffisamment en contact avec le sol pour pouvoir germer lorsque l'humidité du sol est supérieure au potentiel hydrique de germination de la graine ; les situations de mauvais contact terre-graine (sols "creux") ne sont pas simulées. De la même façon, l'impact de températures très élevées (> 25°C de température moyenne, ou encore de températures maximales supérieures à 38°C qui empêchent la germination) n'est pas pris en compte dans ces simulations réalisées avec le modèle SIMPLE. Ensuite, il faut souligner que les effets de stress de type biotique (maladies et ravageurs) sur le taux de levée ne sont pas simulés par ce modèle. Ce point est d'une manière générale mal renseigné, y compris dans la littérature et les documents techniques. En conséquence, l'impact des facteurs limitants biotiques reste difficile à estimer.

¹⁸ Dorsainvil F., Dürr C., Justes E., Carrera A. (2005). Characterisation and modelling of white mustard (*Sinapis alba* L.) emergence under several sowing conditions. *European Journal of Agronomy*, 23, 146-158.

3.2.5. Analyse des simulations et présentation des résultats

Analyse des simulations

Les simulations sont analysées dans une logique d'évaluation de la sensibilité d'une variable de sortie (simulée) aux variations d'un paramètre d'entrée (climat, type d'interculture, modalité de gestion...). L'objectif est d'identifier les facteurs prépondérants de l'effet de divers modes de gestion de l'interculture (dont les cultures intermédiaires) sur les bilans d'eau et d'azote depuis la récolte du précédent jusqu'à la récolte de la culture suivante. Les simulations ne prennent pas en compte les effets cumulatifs de l'insertion "systématique" des CIPAN à long terme ; ces effets ne sont traités que par l'analyse bibliographique (cf. sections 2.2.3 et 2.3 ci-dessus).

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

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

Représentation de la variabilité

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

Les boxplots représentent la distribution de la variable considérée selon les règles suivantes (Figure 14). La médiane (trait en gras) représente le "milieu" de la distribution, c'est-à-dire que 50% des observations effectuées prennent une valeur supérieure à cette médiane, et 50% sont inférieures. La boîte rectangle correspond aux 50% de la distribution centrés autour de la médiane (25% au dessus de la médiane, 25% en dessous). Les traits en pointillés (les "moustaches") qui prolongent la boîte en haut et en bas sont bornés par des tirets à l'intérieur desquels se trouvent 95,3% de la distribution. Les ronds (ici) ou les points situés au-delà correspondent aux valeurs extrêmes, qui représentent donc moins de 5% des cas.

Cette représentation permet ainsi de visualiser la distribution et donc la variabilité de réponse de la variable, pour un ensemble de conditions données. Elle présente l'avantage de montrer la tendance centrale, mais aussi la variabilité et les dissymétries des valeurs extrêmes, en fonction des modalités étudiées.

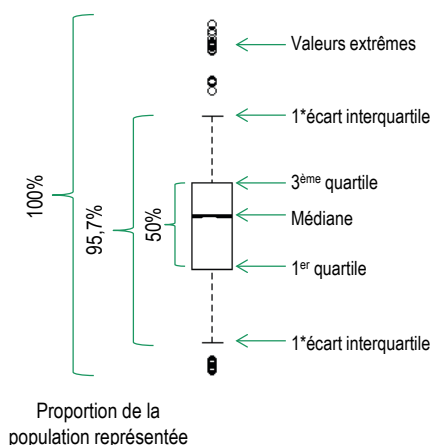


Figure 14. Répartition des valeurs dans une représentation en boxplot

Contrôle de la qualité des simulations et précautions d'usage

La qualité prédictive et le domaine de validité des modèles utilisés ont été précisés (cf. sections 3.2.2 et 3.2.4) avant la mise en œuvre des simulations proprement dites. Néanmoins, les simulations ne se substituent pas complètement à des données expérimentales, mais les complètent en précisant les ordres de grandeur et les sens de variation de l'effet des CIPAN avec une précision de l'ordre de 5 à 10% pour le bilan hydrique et de 15 à 20% pour le bilan en azote. Même si, par commodité de langage, les résultats des simulations sont présentés de façon affirmative, il faut garder à l'esprit que ces résultats correspondent à des estimations de la réalité, certes

suffisamment précises et cohérentes pour être présentées dans ce rapport. Ces résultats numériques constituent des références nouvelles. La situation idéale aurait été de pouvoir confronter ces résultats de simulation à des situations réelles, ce qui nécessiterait un travail complémentaire extrêmement lourd mais utile.

3.3. Les enseignements génériques et spécifiques de l'étude par simulation¹⁹

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% ; Figure 15), 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).

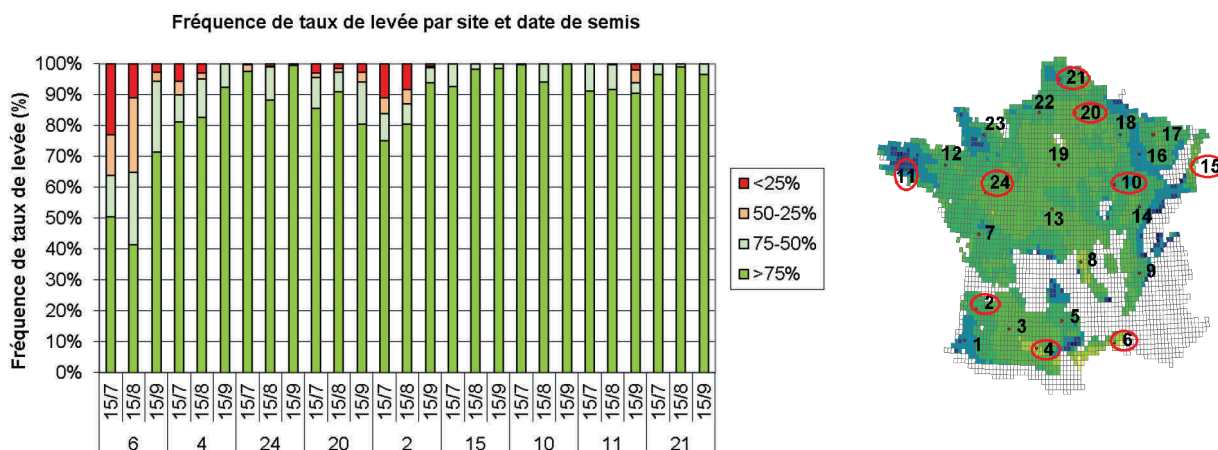


Figure 15. Fréquences sur 20 ans de taux de levée pour les trois dates de semis sur les 9 sites (cercle rouge)

Signification des classes de taux de levée :

- $\geq 75\%$: taux estimé suffisant pour avoir un couvert efficace de culture intermédiaire ;
- compris entre 75 et 50% : la densité de plantes peut être suffisante mais une répartition spatiale hétérogène ne permet pas une croissance et une absorption d'azote minéral optimales ;
- compris entre 25 et 50% : la densité de plantes est insuffisante, et ce d'autant plus que la répartition des plantes levées est hétérogène ;
- < 25% : taux correspondant à un échec complet du semis.

¹⁹ Cette section ainsi que les suivantes reprennent dans leur quasi intégralité le chapitre 11 du rapport consacré aux conclusions de l'étude.

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.

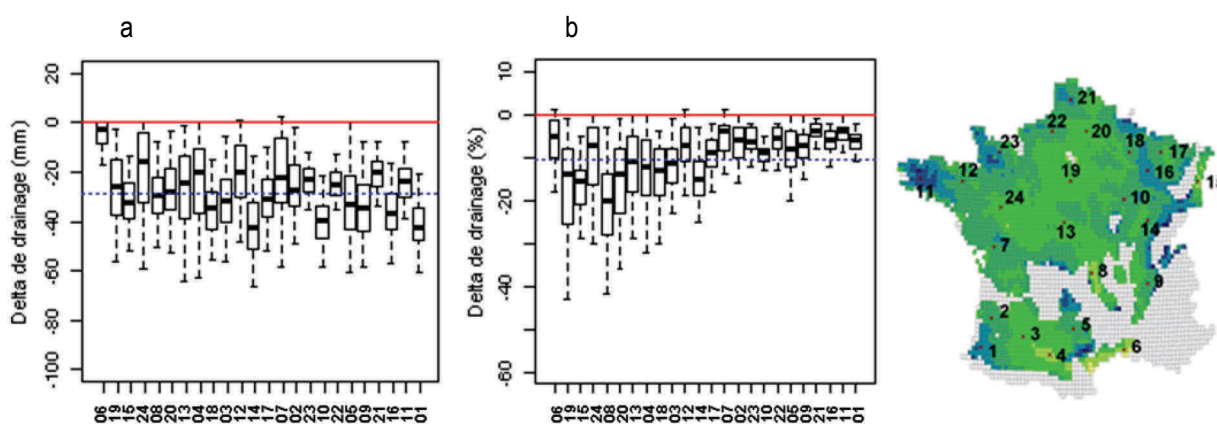


Figure 16. Effets de la culture intermédiaire sur le drainage

Différentiel (ou delta) de drainage entre moutarde et sol nu, en interculture longue (blé-maïs), en fonction des sites climatiques (trait bleu = moyenne inter-sites) en millimètres (a) et en pourcents (b).
[Moutarde levée le 25/7, le 10/8 ou le 15/8, et détruite le 10/11]

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 mgNO₃/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 (Figure 17), 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).

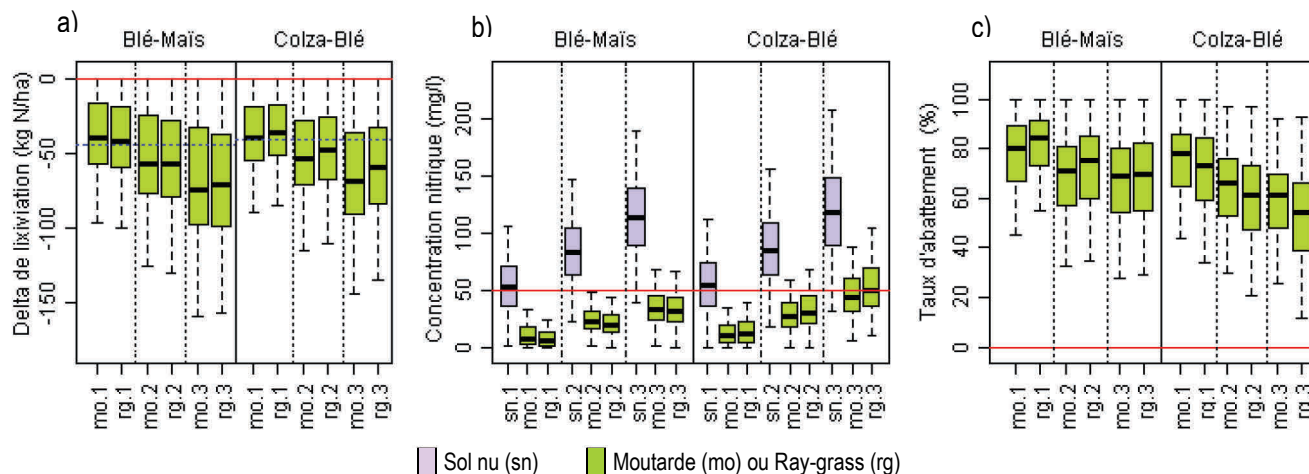


Figure 17. Effets de différentes espèces de CI sur la lixiviation de nitrate pour deux types de succession de culture
Différentiel (ou delta) de lixiviation d'azote nitrique (a), concentration nitrique (b) et taux d'abattement de la concentration (c)
par type de couverts, selon l'état initial en azote minéral du sol (1=20, 2=60, 3=100 kgN/ha) et la succession de culture
(trait bleu = moyenne par succession)
[Simulations sur tous les sites ; pour des levées aux 25/7 et 10/8, et des destructions aux 1/10 et 20/10 pour la succession
colza-blé et aux 10/11 et 10/2 pour la succession blé-maïs]

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 (Figure 17) :

- 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 nitrique 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 nitrique 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 nitrique 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 nitrique 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.

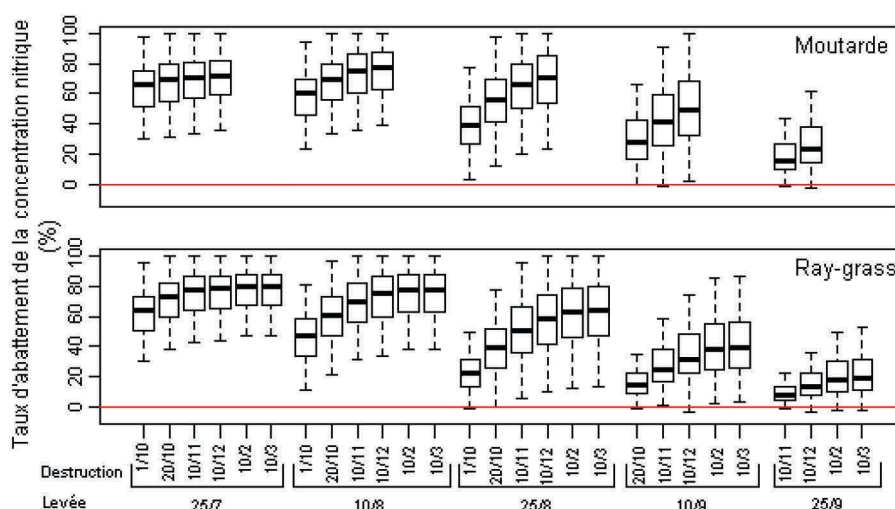


Figure 18. Effet de dates de levée et de destruction

Taux d'abattement de la concentration nitrique par rapport au sol nu de référence
en fonction des dates de levée et de destruction de la moutarde et du ray-grass
[Simulations sur tous les sites, pour un azote minéral initial de 60 kgN/ha dans la succession blé-maïs]

- 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 (Figure 18), 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 nitrique de l'eau de drainage, pour des dates de levée identiques (Figure 19). 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.

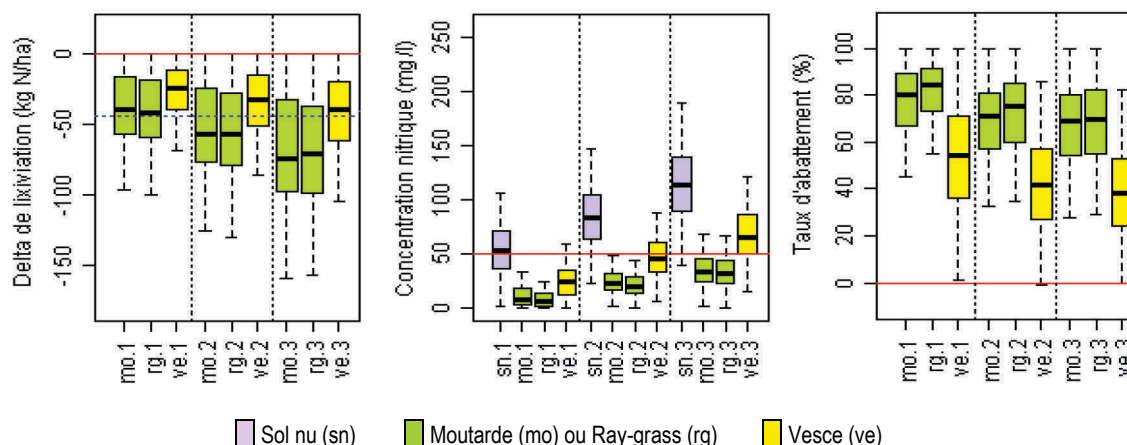


Figure 19. Effets d'une CI légumineuse sur la réduction de la lixiviation de nitrate comparée aux autres familles de CI
Différentiel (ou delta) de lixiviation d'azote nitrique (a), concentration nitrique (b) et taux d'abattement de la concentration (c)
par type de couverts selon l'état initial en azote minéral du sol (1=20, 2=60, 3=100 kgN/ha) dans la succession blé-maïs
(trait bleu = moyenne)

[Simulations sur tous les sites ; pour des levées aux 25/7 et 10/8, et des destructions aux 10/11 et 10/2]

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 nitrique de l'eau de drainage (Figure 19). 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 nitrique, mais il démontre toutefois qu'elles sont utiles puisqu'elles permettent de réduire la concentration nitrique 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 nitrique.

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 (Figure 20), 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.

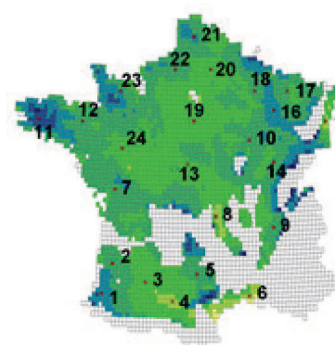
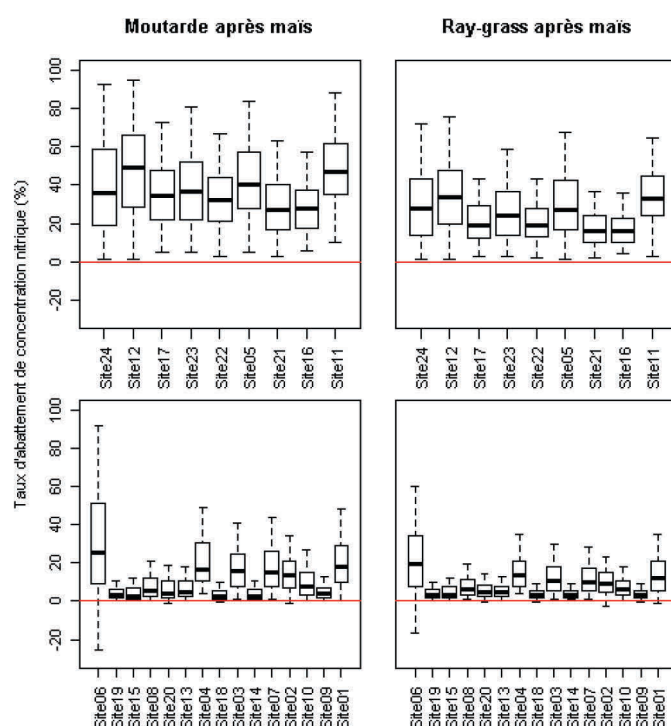


Figure 20. Taux d'abattement de la concentration nitrique avec les cultures intermédiaires (moutarde et ray-grass) en fonction des sites dans la succession maïs-maïs, fourrage (en haut) et grain (en bas)

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 mgNO₃/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 (cannes) de maïs pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage. Or les simulations indiquent qu'un mulch de résidus (cannes 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% (Figure 21).

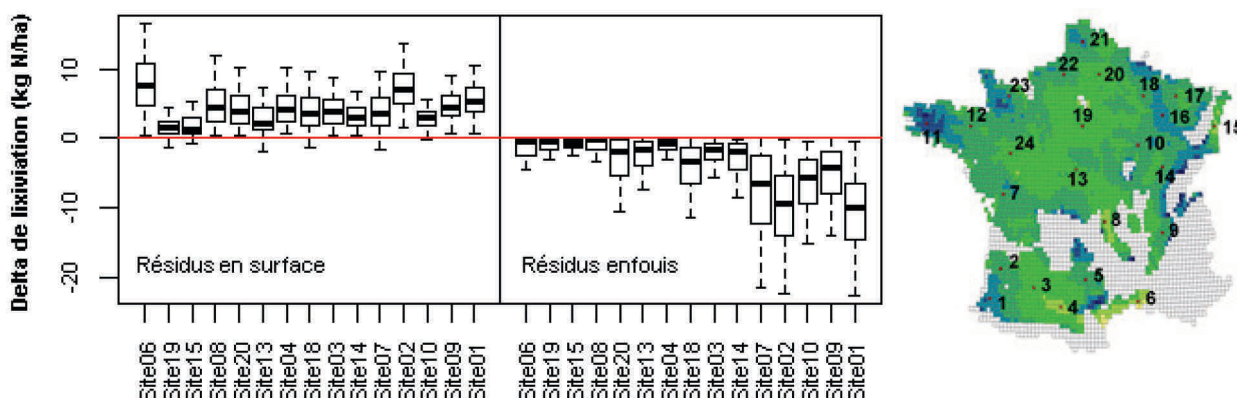


Figure 21. Différentiel (ou delta) de lixiviation avec des résidus laissés en surface ou enfouis, par rapport à une exportation des résidus de récolte du précédent, dans le cas de cannes de maïs grain

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 (Figure 22). 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.

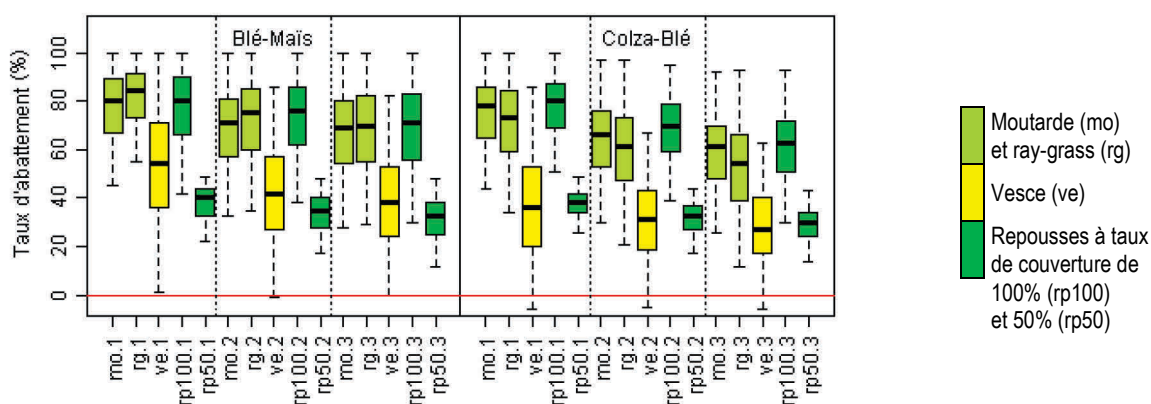


Figure 22. Efficacité des repousses comparées aux CIPAN semées

Taux d'abattement de la concentration nitrique en fonction des différents modes de couverts, de l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et de la succession de culture. [Simulations sur tous les sites ; pour des levées aux 25/7 et 10/8, et des destructions aux 1/10 et 20/10 pour la succession colza-blé et aux 10/11 et 10/2 pour la succession blé-maïs]

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.

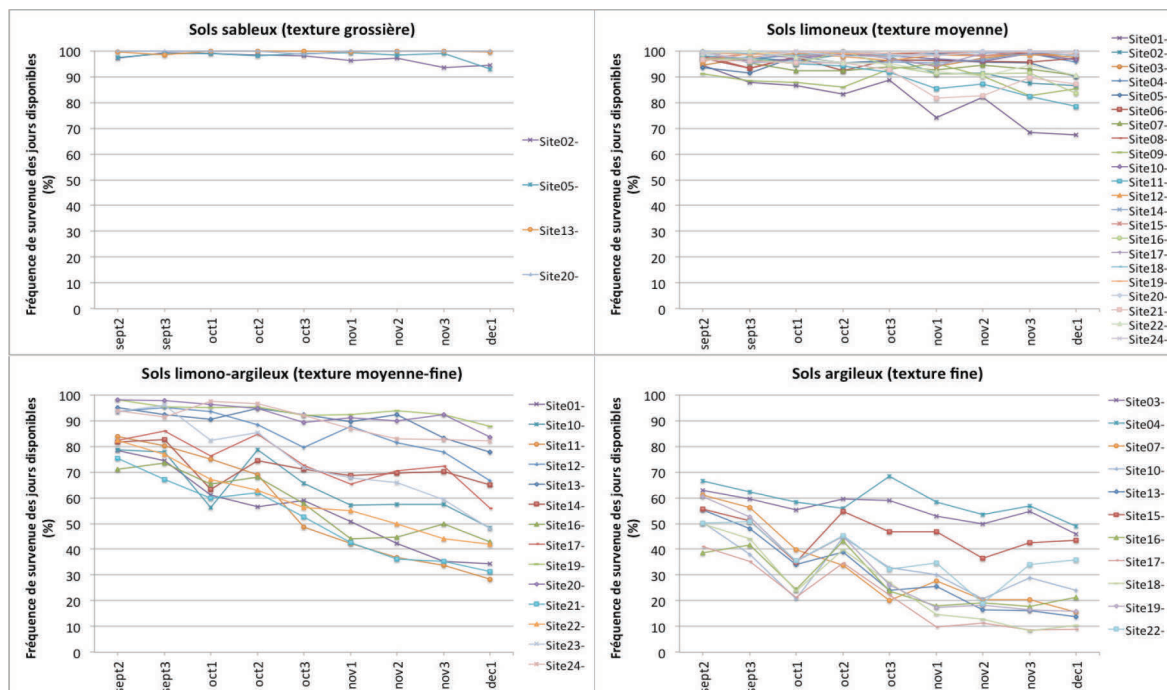


Figure 23. Fréquence sur 20 ans de jours potentiellement disponibles de chaque décade par site, pour les 4 grands types de texture des sols étudiés, durant l'automne

Le nombre de jours disponibles (Figure 23) 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 rédhibitoire 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) (Figure 24). 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.).

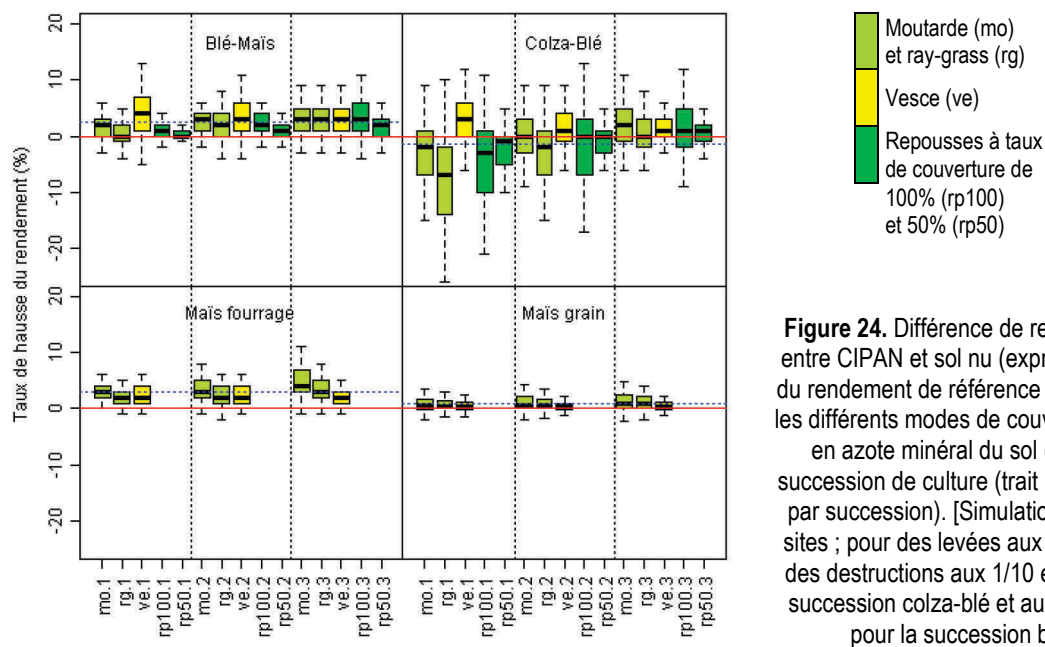


Figure 24. Différence de rendement relatif entre CIPAN et sol nu (exprimé en fonction du rendement de référence en sol nu) selon les différents modes de couverts, l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et la succession de culture (trait bleu = moyenne par succession). [Simulations sur tous les sites ; pour des levées aux 25/7 et 10/8, et des destructions aux 1/10 et 20/10 pour la succession colza-blé et aux 10/11 et 10/2 pour la succession blé-maïs]

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 (Figure 24). 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^{er} 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 (Figure 25), 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").

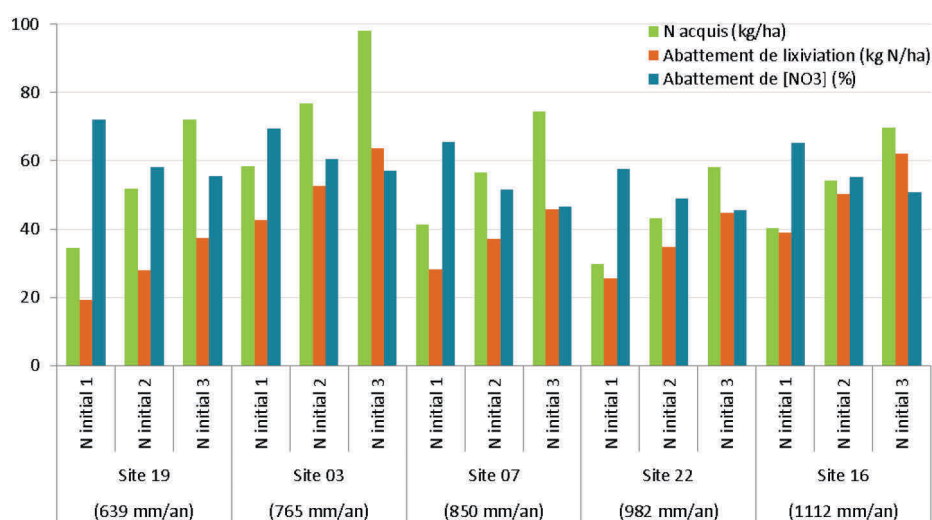


Figure 25. Azote acquis par la moutarde, abattement de la lixiviation et de la concentration nitrique en cas de destruction précoce (le 1/10) de CIPAN ayant levé entre le 25/7 et le 25/8, pour 5 sites contrastés (pour la pluviométrie), sur des sols argileux (> 37% d'argile) et pour les 3 niveaux initiaux d'azote minéral (de 20 à 100 kgN/ha)

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 (Figure 25), 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.

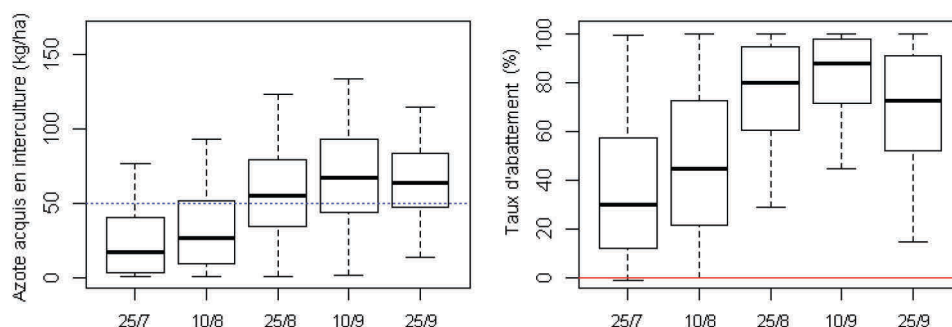


Figure 26. Effet des dates de levée en climat méditerranéen sur l'efficacité des CI

Azote acquis en interculture (à gauche) et taux d'abattement de la concentration nitrique par rapport au sol nu de référence (à droite), en fonction des dates de levée de la moutarde dans la succession blé-maïs sur le site 6

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 mgNO₃/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) (Figure 27).

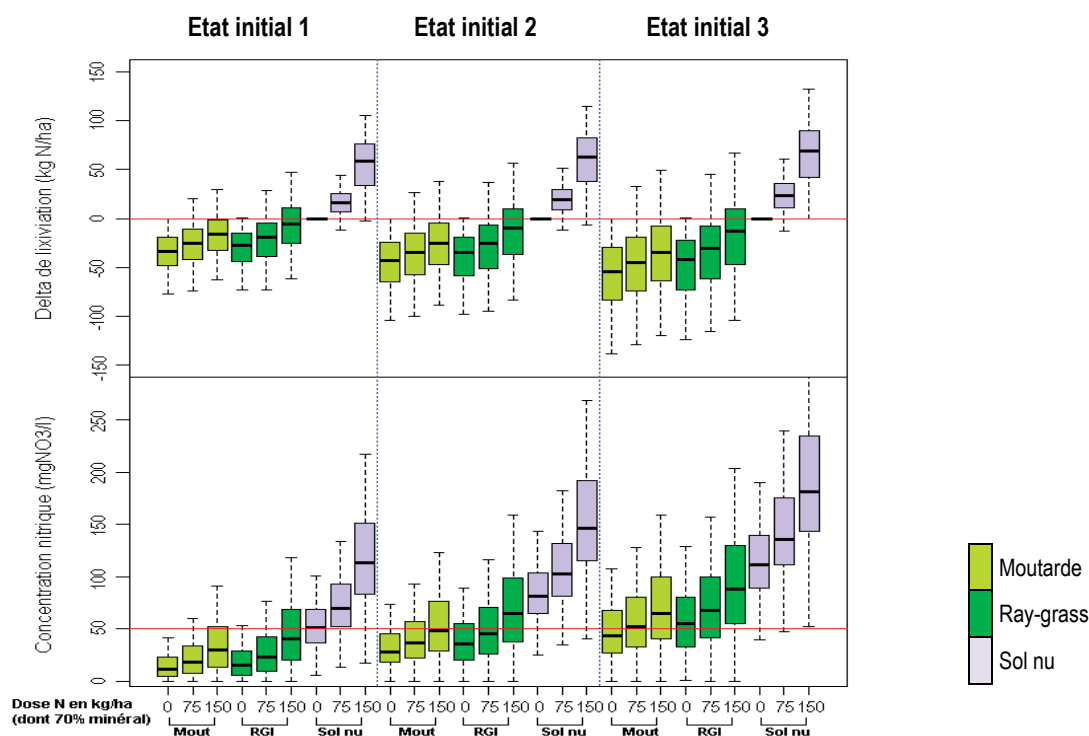


Figure 27. Différentiel (ou delta) d'azote lixivié (a) et concentration nitrique (b) par type d'interculture, selon le reliquat d'azote minéral initial (20, 60 et 100 kgN/ha) et la dose d'azote apportée par le lisier (0, 75 ou 150 kg/ha)

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.

3.4. Discussion des résultats de l'étude

3.4.1. 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 culturelles 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 culturelle. 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'appareillage sont détaillées dans le tableau 2.

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.

Interculture	Courte	Longue, récolte été	Longue, récolte automne précoce	Longue, récolte automne tardive
Succession type simulée	Colza – Blé	Blé – Maïs	Maïs fourrage - Maïs	Maïs grain - Maïs grain
Autres successions apparentées	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 ...
Commentaire	<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 > 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 2. Apparement d'autres successions culturales aux successions types simulées

3.4.2. 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 mgNO₃/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 mgNO₃/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.

3.4.3. 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-maïs 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 mgNO₃/l (ou au moins < 60 mgNO₃/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 28).

		1 ^{er} critère						2 ^{ème} critère						3 ^{ème} critère						4 ^{ème} critère					
		Concentration nitrrique (mg NO ₃ /l)						Abattement de [NO ₃] (%)						Hausse de rendement (%)						Fréquence d'abattement < 50% (%)					
Dates de destruction		1/10	20/10	10/11	10/12	10/2	10/3	1/10	20/10	10/11	10/12	10/2	10/3	1/10	20/10	10/11	10/12	10/2	10/3	1/10	20/10	10/11	10/12	10/2	10/3
Date de levée	25/7	52	44	40	39	37	37	56	63	66	67	69	69	-	0.8	1.1	1.6	1.1	-1.0	-	43	40	35	33	-
	10/8	64	48	36	30	27	27	45	59	69	74	77	78	-	0.0	1.3	1.9	2.3	-1.3	-	45	28	20	19	-
	25/8	84	65	48	37	30	29	28	45	56	69	75	75	-	-	-	1.8	2.0	-0.5	-	-	-	18	15	-
	10/9	-	95	78	65	54	53	-	19	34	45	54	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25/9	-	-	101	89	80	78	-	14	24	32	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[NO₃] < 50 mg/l+ Abattement > 75% de **78**
Rendement non réduit
Fréquence < **15** + 5%
Delta le + faible

Figure 28. 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.

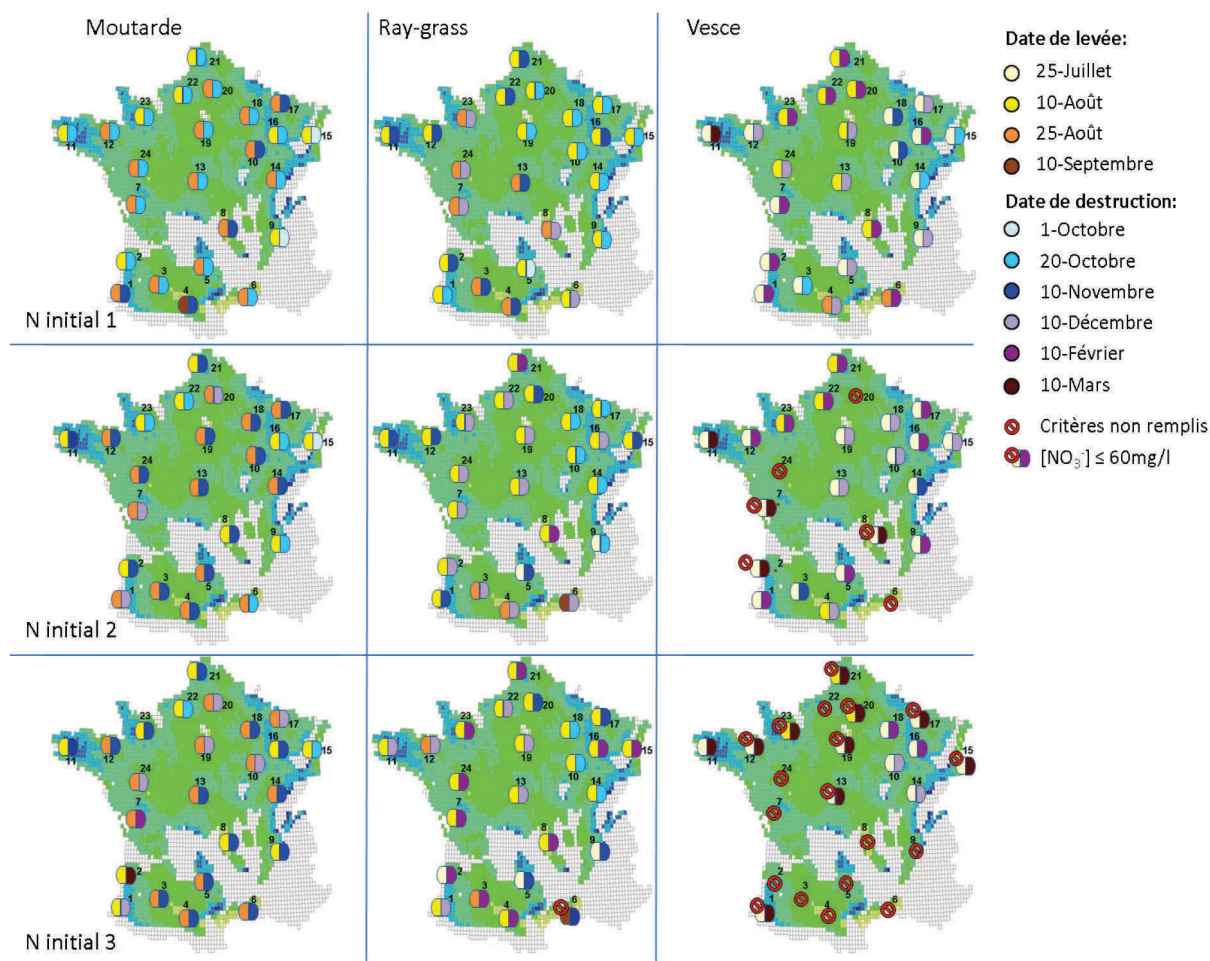


Figure 29. Dates optimales de levée et de destruction des CIPAN par site climatique (1 à 24), selon l'état initial d'azote minéral (N1, N2, N3) et l'espèce (moutarde, ray-grass et vesce), déterminées par analyse multicritère (en considérant conjointement l'impact sur la concentration nitrique, le rendement de la culture suivante et le drainage) à partir des résultats de simulation. La mention "< 60 mgNO₃/l" indique que la valeur obtenue est inférieure à une concentration nitrique de 60 mgNO₃/l (le critère < 50 mgNO₃/l n'étant, lui, pas satisfait)

Les résultats sont présentés par site, espèce et état initial d'azote minéral du sol (Figure 29), 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 mgNO₃/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 mgNO₃/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'entrait pas dans la demande des commanditaires.

3.4.4. 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 pas 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 élevée 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.

3.4.5. 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 localement (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.

4. Conclusions 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 mgNO₃/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 co-latéraux 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 létal 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_2O , 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_2 , 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 Nitrates" potentiellement concernés par l'insertion des CIPAN dans les systèmes de culture français.

► Responsable de la coordination scientifique

Eric JUSTES, INRA-EA*, Toulouse, unité Agrosystèmes et Agricultures, Gestion de ressources, Innovation et Ruralité (AGIR)

► Experts auteurs du rapport d'étude

Nicolas BEAUDOIN**, INRA-EA, Laon, unité Agrosystèmes et impacts environnementaux carbone-azote (Agro-Impact)

Patrick BERTUZZI, INRA-EA, Avignon, unité Agroclim

Raphaël CHARLES, Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW, Suisse

Julie CONSTANTIN, INRA-EA, Toulouse, unité Agrosystèmes et Agricultures, Gestion de ressources, Innovation et Ruralité (AGIR)

Carolynne DURR, INRA-EA, Angers, unité Physiologie Moléculaire des Semences (PMS)

Carole HERMON, Université Toulouse 1 Capitole

Alexandre JOANNON, INRA-SAD, Rennes, unité Paysages

Eric JUSTES, INRA-EA, Toulouse, unité Agrosystèmes et Agricultures, Gestion de ressources, Innovation et Ruralité (AGIR)

Christine LE BAS, INRA-EA, Orléans, unité INFOSOL

Bruno MARY, INRA-EA, Laon, unité Agrosystèmes et impacts environnementaux carbone-azote (Agro-Impact)

Catherine MIGNOLET, INRA-SAD, Mirecourt, unité Agro-Systèmes Territoires Ressources Mirecourt (ASTER)

Françoise MONTFORT, INRA-SPE, Rennes, Institut de Génétique Environnement et Protection des Plantes (IGEPP)

Laurent RUIZ, INRA-EA, Rennes, unité Sol Agro et hydrosystème Spatialisation (SAS)

Jean-Pierre SARTHOU, ENSAT, Toulouse, unité Agrosystèmes et Agricultures, Gestion de ressources, Innovation et Ruralité (AGIR)

Véronique SOUCHERE, INRA-SAD, Grignon, unité Activités, Produits, Territoires

Julien TOURNEBIZE, IRSTEA, Antony, unité Hydrosystèmes et Bioprocédés

Contribution ponctuelle de Thomas HENRY, stagiaire école d'ingénieurs de Purpan

► Relecteurs du rapport

Dominique ARROUAYS, Jean-Noël AUBERTOT, Marie-Odile BANCAL, Jean BOIFFIN, Yvan CAPOWIEZ, André CHANZY, Nathalie COLBACH, Isabelle DOUSSAN, Bernard ITIER, Serge KREITER, François LAFOLIE, Alexandra LANGLAIS, Marie LAUNAY, Philippe LUCAS, Nicolas MUNIER-JOLAIN, Bernard NICOLARDOT, Bernard NICOULLAUD, Guy RICHARD, Christophe VANDENBERGHE et Françoise VERTES.

Le texte définitif du rapport n'engage que leurs auteurs.

► Conduite du projet

Olivier RECHAUCHERE, INRA-DEPE*, Paris : conduite du projet, coordination éditoriale

Isabelle SAVINI, INRA-DEPE, Paris : suivi du projet, coordination éditoriale

Marion BARBIER, INRA-DEPE, Paris : logistique

Hugues LEISER, INRA, Avignon : documentation

* Entités INRA :

DEPE : Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes ;

Départements de recherche : EA : Environnement et agronomie ; SAD : Sciences pour l'action et le développement ; SAE2 : Sciences sociales, agriculture et alimentation, espace et environnement ; SPE : Santé des Plantes et Environnement.

** En gras : fonction de coordination.



Institut National
de la recherche Agronomique
147 rue de l'Université
75338 Paris cedex 07 - France
Tél: +33 1 42 75 90 00
Fax: +33 1 42 75 91 72
www.inra.fr

