# Délégation à l'Expertise Scientifique, à la Prospective et aux Etudes



# Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires

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

Rapport 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)

#### Contacts:

Eric Justes, responsable scientifique de l'étude : <a href="mailto:Eric.Justes@toulouse.inra.fr"><u>Eric.Justes@toulouse.inra.fr</u></a>
Olivier Réchauchère, chef de projet de l'étude : <a href="mailto:Olivier.Rechauchere@paris.inra.fr"><u>Olivier.Rechauchere@paris.inra.fr</u></a>

Le présent document constitue le rapport 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 a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou l'INRA.

Ce document est disponible 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., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires: conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Rapport d'étude, INRA (France), 418 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

# 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.

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





#### ► 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)

Carolyne 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-Sytèmes 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

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.

<sup>\*</sup> Entités INRA :

<sup>\*\*</sup> En gras : fonction de coordination.

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!

# Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires

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

# 1. Introduction

## Sommaire

1.1. Contexte	5
1.1.1. La dynamique de l'azote durant l'interculture	
1.1.2. Contexte réglementaire	
1.2. Objectifs et démarche de l'étude	7
1.2.1. Objectif	7
1.2.2. Périmètre de l'étude	7
1.2.3. Démarche et organisation	7
1.3. Couverture du sol, cultures intermédiaires : définitions	8
1.4. Fonctions des cultures intermédiaires et typologie des espèces	10
1.4.1. Les différentes fonctions potentielles des CI	10
1.4.2. Typologie des espèces	13
1.5. Plan du rapport	14
1.6. Etude bibliographique : analyse du corpus	17
Références bibliographiques citées	31

#### 1.1. Contexte

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 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 transfert rapide du nitrate des zones agricoles vers la mer induit une eutrophisation des zones côtières.

### 1.1.1. La dynamique de l'azote durant l'interculture

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 entrainé 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.

# 1.1.2. Contexte réglementaire

La directive n°91/676 du 12 décembre 1991 relative à la lutte contre les nitrates d'origine agricole, dite directive "Nitrates", a imposé aux Etats membres d'identifier sur leur territoire des "zones vulnérables" (Figure 1-1) selon les critères posés par la directive (concentration en nitrate des eaux supérieure à 50 mg/l, eutrophisation) et d'y mettre en œuvre un programme d'action visant à réduire la pollution des eaux. Les programmes d'actions sont quadriennaux : le 4e est en cours, le 5e en préparation. Environ 75% de la surface agricole en grandes cultures sont situés en zone vulnérable Nitrate.

**Figure 1-1.** Les zones vulnérables Nitrate 2007 en France (Source : Direction de l'Eau - Mission SIEau, décembre 2007)



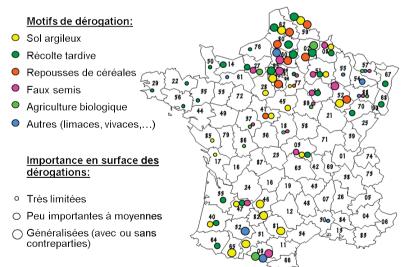
La loi du 3 aout 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement a prévu la généralisation de la couverture des sols en automne en fonction des conditions locales. Plus précisément, dans les zones vulnérables où l'enjeu majeur est la limitation des fuites d'ions nitrate vers les eaux, le 4º programme d'action Nitrate vise une généralisation de la couverture automnale des sols pour 2012. Cette couverture concerne les périodes d'interculture précédant une culture de printemps, ainsi que l'interculture entre colza et céréale d'hiver pour laquelle les repousses de colza ont été rendues obligatoires. La mise en place d'une culture intermédiaire piège à nitrate a été prévue dans toutes ces situations d'interculture, à l'exception de celles suivant un maïs grain, pour lesquelles le broyage suivi de l'enfouissement des résidus est autorisé.

Cet objectif fait l'objet de contestations, sur l'argument d'impossibilités techniques de mise en œuvre, et induit une demande de reconnaissance de pratiques alternatives (pas de couverture, maintien des résidus en surface, repousses de céréales).

Suite à la publication de la circulaire généralisant la couverture automnale des sols de l'ensemble des "zones vulnérables" prescrite en 2008 (4º 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<sup>er</sup> 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 1-2).



**Figure 1-2.** Localisation et importance (en surface) des différents motifs de dérogations à l'implantation des cultures intermédiaires par département (source : arrêtés préfectoraux régionaux)

Pour ce 4º programme d'action, les pouvoirs publics ont accepté des dérogations à cette obligation de couverture des sols dans un certain nombre de situations et sous réserve de la mise en place d'un dispositif de suivi et d'expérimentation régionale. Les références techniques dont les pouvoirs publics disposent 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.

Pour la préparation du 5° programme (qui débutera en 2013), les pouvoirs publics (ministères chargés 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.

# 1.2. Objectifs et démarche de l'étude

#### 1.2.1. Objectif

L'objectif principal de cette étude est donc d'établir un état des connaissances sur la gestion de l'azote en période d'interculture pour les différents pédoclimats en système de grande culture. 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 français métropolitain, les commanditaires ont retenu la proposition de l'INRA de compléter cet état des connaissances par un travail de simulation, permettant d'élaborer des références pour toutes les situations, 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. La fiabilité de ces références issues de simulation devra être discutée sur la base d'une confrontation avec les connaissances scientifiques disponibles.

#### 1.2.2. Périmètre de l'étude

L'étude s'attache à analyser en priorité les pratiques correspondant au registre règlementaire, c'est-à-dire les cultures intermédiaires pièges à nitrate, les repousses de colza et de céréales, les pailles finement broyées et enfouies ou laissées en surface. Elle examinera également les autres services écosystémiques rendus par les cultures intermédiaires. Pour ce qui est des effets biotiques sur les adventices, la microflore et la faune, elle se placera dans un cadre plus large que les seules cultures intermédiaires et prendra en considération l'ensemble des modalités de couverture du sol (couvert d'interculture ou culture de couverture associée, mulch vivant, mulch mort). Enfin, les cultures dérobées ne feront pas partie du périmètre de l'étude.

Cette étude traite uniquement des systèmes de grandes cultures annuelles pour la succession des cultures principales ; les cultures pérennes ne seront pas prises en considération.

Par ailleurs, la gestion de l'interculture, au-delà de son rôle dans la régulation de 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 mesure dont on attend un bénéfice sur un objectif donné ne doit pas conduire à une moindre performance environnementale globale du système. Il convient ainsi de privilégier une vision globale de l'évaluation des performances et limites des systèmes de culture. 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 autres que celle de "piège à nitrate" et que les cultures intermédiaires sont susceptibles de remplir.

## 1.2.3. Démarche et organisation

Au-delà de la fiabilité des simulations que le modèle retenu est capable de produire, la qualité de ce travail de simulation repose d'une part sur la pertinence des choix des situations que l'on soumet à la simulation (choix des situations pédoclimatiques, systèmes de culture et itinéraires techniques), et d'autre part sur la confrontation des sorties du modèle à des informations de terrain. Dans un premier temps, concernant le premier de ces enjeux, le groupe d'experts s'est appuyé sur les informations provenant des commanditaires de l'étude, l'étude bibliographique et l'analyse de l'enquête "Pratiques culturales". Concernant le second, il a recouru à la confrontation avec les connaissances scientifiques disponibles. Suite à la première réunion du comité de suivi de

l'étude<sup>1</sup>, il a été décidé de mettre en place un groupe technique pour assurer un suivi complémentaire sur ce travail de simulation, en bénéficiant de l'expérience d'ingénieurs de terrain.

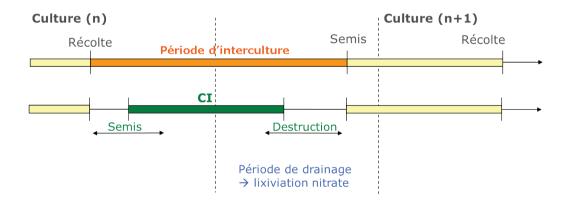
Ce groupe technique constitue une extension du comité de suivi et a travaillé à l'initiative des commanditaires et du pilote scientifique de l'étude. Il a rassemblé des ingénieurs ayant une expérience de recherche-développement et d'expérimentation sur la question de la gestion de l'azote en interculture, et donc susceptibles d'apporter des informations et de discuter du travail de simulation dans l'étude. Les compétences et les données dont disposaient ces ingénieurs ont permis :

- de discuter du choix du modèle STICS et de son paramétrage pour certaines espèces utilisées comme cultures intermédiaires<sup>2</sup> :
- de discuter les choix du collectif des experts concernant les situations agro-pédoclimatiques, les successions de culture et les itinéraires techniques à soumettre à la simulation ;
- de confronter les premières sorties de la simulation aux données de terrain pour évaluer leur cohérence vis-àvis des situations connues.

Concrètement, ce groupe est constitué d'un ingénieur de chacun des instituts techniques les plus concernés (Arvalis, Cetiom, ITB, ITAB), d'ingénieurs de Chambre d'agriculture compétents sur la question de la gestion de l'azote en interculture et d'une ingénieure d'un organisme de développement en Belgique<sup>3</sup>. Il s'est réuni à trois reprises au cours de l'étude.

## 1.3. Couverture du sol, cultures intermédiaires : 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 1-3). 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.



**Figure 1-3.** 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).

8

¹ 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).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Le groupe des experts en charge de la simulation remercie notamment Arvalis et le CETIOM pour la mise à disposition de jeux de données sur la vesce en complément de celles obtenues par l'INRA, qui ont permis de créer un nouveau jeu de paramètres utilisables dans le modèle STICS.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> 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).

Durant l'interculture, 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 intermédiaire (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. 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.

La couverture des sols et les cultures intermédiaires sont définies par un vocabulaire que l'on peut classer selon différents registres, et qu'il importe de bien clarifier pour définir le périmètre de l'étude.

#### 1) La terminologie associée au registre règlementaire de prévention des pollutions

Il s'agit de définir des modalités de couverture des sols capables de réduire la lixiviation du nitrate pendant la période où ce risque existe. Sont ainsi éligibles à l'appellation de couverture du sol : les cultures d'hiver, les cultures présentes entre deux cultures successives et implantées en vue d'absorber de l'azote, dites cultures intermédiaires pièges à nitrate et les repousses de colza. Se rattachent également à ce registre les pratiques qui ne font partie du cadre réglementaire qu'à titre dérogatoire, comme les pailles finement broyées et enfouies, ou encore celles qui sont revendiquées par les agriculteurs ou leurs représentants comme ayant une efficacité pour piéger le nitrate, comme les pailles broyées et laissées en surface ou les repousses de céréales.

#### 2) La terminologie lié à un registre agronomique/agricole

Dans ce registre, ce sont le service écosystémique et/ou la finalité agricole qui structurent les catégories :

La culture principale est implantée et conduite dans le but de tirer une production de grains ou de fourrage.

La culture intermédiaire est implantée entre deux cultures principales de façon à rendre un certain nombre de services écosystémiques (agronomiques et écologiques) par des fonctions agroécologiques 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, empêcher le développement de mauvaises herbes, vi) améliorer l'esthétique du paysage, vii) accroître la biodiversité du paysage agricole<sup>4</sup>. Elles ne sont pas destinées à être récoltées et sont détruites (ou leur croissance est stoppée) avant l'implantation de la culture principale. Leur biomasse est restituée au sol pour favoriser la restitution d'éléments nutritifs à la culture suivante et améliorer la fertilité physique, chimique et biologique du sol.

La CIPAN est une culture intermédiaire implantée dans le but principal de réduire la lixiviation dans les situations où ce risque est élevé, c'est-à-dire de façon générale là où la disponibilité en azote minéral est élevée (cas de fertilisation s'avérant en excès *a posteriori* et potentiel élevé de minéralisation du sol).

L'engrais vert est une culture intermédiaire dont le but premier est de fournir de l'azote à la culture suivante. Elle est donc pratiquée plutôt dans un contexte de bas intrants et d'enrichissement du sol en azote ; elle est généralement composée de légumineuses (plantes en symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote de l'air).

La culture dérobée est implantée entre deux cultures principales en vue d'en obtenir une production dans un temps réduit. En ce sens elle se distingue nettement de la culture intermédiaire qui ne vise que des services agronomiques ou écologiques, et dont la biomasse n'est pas exportée.

La culture de couverture est implantée pour couvrir le sol afin de limiter l'érosion hydrique et/ou jouer un rôle de structuration du sol *via* l'action de ses racines.

#### 3) La terminologie liée aux modalités de couverture du sol

On distingue quatre modalités principales qui se différencient selon les variantes de cohabitation entre les cultures principales à visée productive et des cultures "de service" :

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Une même culture intermédiaire peut cumuler des objectifs divers : par exemple piéger le nitrate et fournir du nitrate à la culture suivante, dans la perspective de diminuer les intrants tout en maintenant les objectifs de rendement des cultures principales, ou bien lutter à la fois contre l'érosion et la lixiviation, etc. Certains de ces objectifs peuvent toutefois être mutuellement contradictoires.

- Le couvert d'interculture ou culture intermédiaire en végétation : il est implanté dans (sous couvert) ou plus généralement après une culture principale et est détruit avant ou lors de l'implantation de la culture suivante.
- Le couvert associé présente un cycle de développement court, principalement pour couvrir le sol au début de la culture principale tout en évitant de la concurrencer. Il permet un contrôle biologique des adventices. Il est détruit assez précocement soit par le gel, soit par un herbicide sélectif afin de ne pas trop concurrencer la culture principale.
- Le mulch vivant est installé avant ou durant la culture principale et poursuit sa croissance pendant la période de végétation de la culture principale. Lorsque ce couvert perdure plusieurs années, ce qui suppose une absence de travail du sol, on parle de couvert permanent.
- Le mulch mort est constitué d'une couche de résidus de culture annuelle laissée à la surface du sol.

Les correspondances avec les termes en anglais

Cover crop: culture intermédiaire

Catch crop : culture intermédiaire piège à nitrate

Undersown cover crop : culture intermédiaire semée sous couvert de la culture principale

Intercropped cover crop: couvert associé

Living mulch: mulch vivant

Dead mulch ou mulch of residues: mulch mort

# 1.4. Fonctions des cultures intermédiaires et typologie des espèces

Raphaël Charles

En complément à l'objectif de réduction des pertes de nitrate principalement visé dans cette étude, les couverts végétaux peuvent exercer plusieurs autres fonctions agroécologiques rendant divers services écosystémiques. Ces différentes fonctions peuvent être couvertes par plusieurs espèces servant de cultures intermédiaires. Un choix de documents techniques de synthèse sert de références ici pour décrire les services attendus des cultures intermédiaires, mais également les espèces régulièrement cultivées en France ou offrant un intérêt potentiel (Labreuche et Beets, 2007; Labreuche et Maillet-Mezeray, 2007; Minette, 2010; Vericel, 2010; Besnard et al., 2011). Ces données sont enrichies de références d'Amérique du Nord (Clark, 2007). Les fonctions agroécologiques retenues prioritairement sont les suivantes : l'absorption d'azote minéral du sol, le maintien d'états physiques du sol favorables aux cultures, la protection contre l'érosion, une pression sur les ravageurs, les maladies et les adventices. Ces fonctions peuvent être atteintes par les grandes familles de cultures comme les crucifères, les graminées ou les légumineuses. Des traits agrophysiologiques déterminent leur efficacité notamment au niveau de la rapidité d'installation, de la durée de la phase végétative, de la tolérance aux stress abiotiques et biotiques, de la persistance des résidus végétaux après leur destruction.

#### 1.4.1. Les différentes fonctions potentielles des Cl

Une brève description des fonctions attendues des couverts et des principales espèces permet de situer les différents enjeux liés à la gestion de l'interculture, qui peuvent être nombreux, indiquant que c'est une période clé de la gestion du système de culture. Le principal enjeu de l'étude est de vérifier si ces différentes fonctions correspondent toujours à des effets tangibles et démontrés expérimentalement, le cas échéant d'en mesurer l'amplitude et d'étudier s'ils ne sont pas mutuellement incompatibles. Dans le cadre de cette étude, les fonctions agroécologiques suivantes seront retenues prioritairement : en tout premier lieu l'absorption d'azote minéral du sol et l'effet "engrais vert" sur la culture suivante, puis l'effet sur l'érosion et l'état physique du sol, l'effet sur les émissions de gaz à effet de serre, et enfin l'effet sur les ravageurs, les maladies et les adventices et la faune.

L'inventaire présenté ici est plus large : il reprend toutes les attentes relatives à la protection et à l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol ou contribuant aux spécificités des systèmes de culture.

#### Protection et amélioration des propriétés chimiques du sol

#### . Réduction des pertes de nitrate par lixiviation et fourniture d'azote à la culture suivante

La présence d'une culture durant l'interculture permet d'absorber l'azote minéral du sol et de prévenir les pertes de nitrate par lixiviation vers l'environnement. Considérant les effets des cultures intermédiaires sur les pertes de nitrate, plusieurs facteurs peuvent être contrôlés par le choix de l'espèce (Thorup-Kristensen et al., 2003). La rapidité d'installation, le taux de croissance, la profondeur d'enracinement déterminent la capacité de prélèvement d'azote. La résistance de l'espèce à l'hivernage contrôle la persistance de la végétation. La composition biochimique des tissus est l'un des facteurs qui déterminent la dynamique de la dégradation de la culture intermédiaire après sa destruction, et *in fine* la minéralisation de l'azote et sa disponibilité pour la culture suivante. Réduction des pertes de nitrate et fourniture d'azote à la culture suivante sont deux fonctions très interdépendantes car toutes deux liées à la modification du cycle de l'azote induite par l'introduction de la CI. Selon le contexte agronomique du système de culture, c'est l'une plutôt que l'autre qui est recherchée : le piégeage du nitrate à visée environnementale dans les systèmes à haut niveau d'intrants, et à l'inverse la fourniture en azote pour le suivant, d'où l'appellation d'"engrais vert" dans les systèmes à bas niveau d'intrants.

#### . Fixation d'azote atmosphérique

La capacité des légumineuses de fixer l'azote est intéressante autant durant l'interculture que pour la culture suivante. Cultivées de préférence en association, les légumineuses permettent d'accroître la performance du couvert par un apport régulier d'azote. Pour la culture suivante, les fournitures d'azote peuvent être conséquentes. Les limitations de l'utilisation des légumineuses comme couvert sont discutées plus particulièrement dans le chapitre relatif à la réduction des pertes de nitrate.

#### . Séguestration de carbone

La biomasse produite par un couvert végétal durant l'interculture constitue un amendement de carbone et d'azote organique favorable au maintien de la matière organique du sol, voire à son enrichissement. Le choix de l'espèce de couvert est important dans la mesure où la qualité biochimique de ses tissus détermine sa décomposition. La gestion du couvert pendant son cycle et le système de culture sont des facteurs supplémentaires qui permettent d'examiner dans quelle mesure un couvert végétal peut être utilisé pour séquestrer du carbone.

#### . Recyclage des éléments minéraux

Par l'absorption en profondeur dans le sol d'éléments nutritifs autres que l'azote, puis la dégradation de la biomasse du couvert, d'importantes quantités de nutriments sont amenés en surface. Cet enrichissement est favorable pour l'installation de la culture suivante. Il doit aussi être pris en compte dans la planification de la fumure minérale pour éviter tout excédent et les pertes correspondantes.

#### Protection et amélioration des propriétés physiques du sol

#### . Réduction de l'érosion, du ruissellement, de la battance

La protection du sol par une culture ou des résidus en mulch à la surface du sol permet de réduire les phénomènes d'érosion, de ruissellement ou de battance. Cette protection est d'autant plus efficace que le couvert est installé rapidement et qu'en fin de cycle des résidus sont laissés en surface pour exercer ce rôle protecteur également durant la croissance de la culture suivante.

#### Propriétés hydriques : infiltration, stockage de l'eau

La présence de végétaux, par leur enracinement, peut renforcer la stabilité structurale du sol et la circulation de l'eau. Elle permet ainsi une meilleure infiltration de l'eau. D'autre part, les résidus de couverts limitent les pertes par évaporation. Le stockage de cette eau et les conditions plus humides qui en résultent peuvent avoir un effet sur la qualité de l'implantation de la culture suivante.

#### . Entretien de la matière organique du sol

Selon des processus similaires à la séquestration de carbone, la matière organique du sol peut être entretenue par un apport régulier de biomasse de couvert végétal. Le type et la gestion de cette biomasse déterminent l'effet à court ou à long terme à escompter sur la teneur et la qualité de la matière organique.

#### . Décompaction du sol

Le système racinaire des plantes peut ameublir le sol et entretenir une structure favorable à la circulation de l'eau et de l'air dans le sol. Les racines pivotantes peuvent contribuer à réduire localement certains effets de compaction en profondeur, alors qu'un système fasciculé et dense agit sur un plus grand volume de sol, généralement dans les horizons de surface. Ces effets dépendent grandement de l'espèce cultivée, mais également de la durée de la végétation.

#### Propriétés biologiques

#### . Augmentation de la vie biologique des sols

La présence d'une couverture du sol vivante entre deux cultures permet de maintenir une vie du sol active en interaction avec la plante. Cette augmentation de la vie biologique par des couverts en croissance assure le maintien, voire permet le développement, des propriétés biologiques du sol par des effets dans la rhizosphère.

#### . Contrôle des ravageurs

Les propriétés de certains couverts réduisent la présence de ravageurs sur la culture suivante par attraction et piégeage ou intoxication, ou par répulsion. En modifiant les conditions du milieu, ils l'enrichissent aussi de divers organismes dont certains potentiellement auxiliaires. Certains couverts peuvent être utilisés spécifiquement contre des ravageurs par biofumigation.

#### . Contrôle des maladies

L'activité biologique du sol procurée par une culture intermédiaire permet de réduire la présence de certaines maladies dans la mesure où elle procure une certaine diversité, évitant la transmission ou le développement particulier de maladies. Le choix de l'espèce par rapport à la culture précédente et à la culture suivante, voire même à l'ensemble des cultures en rotation, sont des éléments essentiels à prendre en compte. Certains couverts peuvent être utilisés spécifiquement contre les maladies par biofumigation.

#### . Contrôle des mauvaises herbes

La présence d'une végétation choisie durant l'interculture offre une concurrence à l'installation et au développement de mauvaises herbes. Le maintien de résidus du couvert végétal jusque dans la culture suivante peut limiter la présence d'adventices durant sa phase d'installation. L'allélopathie peut renforcer ces processus de concurrence.

#### . Réservoir faunistique

La présence de végétation entre deux cultures constitue une possibilité d'abri et une source de nourriture pour la faune sauvage. Le type de couvert, la biomasse produite et sa hauteur déterminent la qualité faunistique.

#### Source pour pollinisateurs

Certaines espèces de couvert ont un cycle suffisamment court pour que leur floraison offre une source de nectar durant la fin de l'été et le début de l'automne. La qualité du nectar offert et sa période de disponibilité peuvent être très différentes en fonction des espèces et de la date de floraison.

#### Contribution au système de culture

#### . Diversification de la rotation

La diversité de la rotation est accrue par le choix d'un couvert d'une famille autre que celles des espèces cultivées avant et après l'interculture. Cette diversité est supposée favorable aux propriétés biologiques du sol, mais pourrait surtout être intéressante en termes de cycle des éléments nutritifs en situation de faible biodisponibilité de certains de ces éléments.

#### . Diversification du paysage

Les cultures intermédiaires contribuent à la diversité du paysage par leurs différentes structures et couleurs. Cette fonction peut être un élément d'esthétisme en région périurbaine ou touristique.

#### . Sécurisation des systèmes

La résilience des systèmes agricoles peut être accrue par les éléments d'enrichissement et de diversification procurés par les couverts végétaux, notamment lorsque les systèmes culturaux ont été par trop uniformisés. D'autre part, les cultures intermédiaires peuvent être valorisées en production de fourrage ou de biomasse énergétique, en cas de pénurie par exemple. En cas de situation exceptionnelle (ex. manque de fourrage dû à une sécheresse), elles peuvent être finalement récoltées, mais dans ce cas la culture intermédiaire devient une culture fourragère dérobée. Ces perspectives démontrent une potentielle concurrence autour de la période d'interculture entre les effets bénéfiques procurés par l'enfouissement des couverts intermédiaires et la nécessité de production.

#### 1.4.2. Typologie des espèces

Quelque 35 espèces sont décrites comme culture intermédiaire par différents instituts techniques et Chambres d'Agriculture français (Labreuche et Beets, 2007; Labreuche et Maillet-Mezeray, 2007; Minette, 2010; Vericel, 2010; Besnard *et al.*, 2011). Elles appartiennent aux familles des crucifères, graminées, papilionacées, mais aussi aux composées, hydrophyllacées, linacées et polygonacées. Pour l'ensemble de ces espèces, le facteur variétal accroît la diversité par la sélection de certains traits agro-physiologiques caractéristiques pour répondre à des attentes spécifiques.

Les **crucifères** sont largement utilisées comme couverts végétaux : moutardes, navette, colza, radis, choux. La moutarde blanche représente la culture intermédiaire la plus largement utilisée en France, en particulier avant betterave pour ces effets contre le nématode à kystes (ITB, 2003). Les petites graines des crucifères en font un couvert végétal facile à semer, peu onéreux, pour une densité élevée de plantes. Leur rapidité à la levée permet une couverture rapide du sol. Des conditions de sol fertiles, en particulier une disponibilité suffisante en azote et en eau, conduisent à la production rapide d'une végétation fournie. La transformation de glucosinolates contenus dans leurs tissus en isothiocyanates est valorisée comme principe actif régulateur de certains ravageurs, maladies et plantes (Reau *et al.*, 2005a, b). Leur système racinaire pivotant est également considéré comme intéressant. Ce caractère est notamment valorisé par la sélection et la culture de nouvelles variétés de radis chinois dont le pouvoir pénétrant et décompacteur du sol est amélioré (Chen et Weil, 2010). La présence de cultures de colza dans la rotation exige un recours limité aux brassicacées comme culture intermédiaire pour des raisons de prévention phytosanitaire.

Le ray-grass italien figure comme **graminée** herbagère régulièrement utilisée comme couvert intermédiaire piège à nitrate. Parmi les céréales à paille, de nombreuses espèces sont utilisables, notamment l'avoine commune (*Avena sativa*), plus éloignée des autres espèces couramment cultivées en rotation (seigle, blé, orge). L'avoine rude (*Avena strigosa*) apparaît désormais aussi dans les systèmes de culture simplifiés et en semis direct. Cette espèce a été introduite dans plusieurs régions du monde en s'inspirant des pratiques largement répandues en Amérique du Sud. En France, cette espèce est proposée depuis quelques années. Plus exotique, le sorgho convient pour les climats secs en été.

En raison de leur fixation symbiotique de l'azote, les **légumineuses** en culture pure sont généralement écartées des situations où le nitrate pose un problème environnemental. En revanche, ces espèces ont gagné en intérêt pour réduire la fertilisation azotée à court terme et développer l'autofertilité des sols dans les systèmes de travail réduit du sol et les exploitations sans bétail ; elles sont généralement cultivées en mélanges. Une espèce comme la vesce commune a longtemps été privilégiée, mais de nouvelles espèces font leur apparition, comme le pois fourrager, la lentille, la gesse, la féverole, le fenugrec, la vesce velue ou divers trèfles. Ces espèces sont généralement réservées pour des cultures associées. La diversité des espèces de cette famille permet de répondre à de nombreuses attentes (caractère gélif / résistant à l'hiver, bonne couverture du sol, durée de végétation, floraison pour les insectes auxiliaires, biomasse élevée, tolérances multiples aux stress, utilisation alternative comme fourrage).

Quelques autres familles disposent d'un ou deux représentants parmi les cultures intermédiaires. L'utilisation de composées telles que le niger ou le tournesol est principalement liée au développement des techniques culturales simplifiées et à la recherche de couverts procurant de nouvelles solutions (précocité, enracinement, facilité de destruction notamment par le gel). Le tournesol est surtout utilisé en mélange pour la structure qu'il apporte à la végétation par la hauteur de ses plantes. La phacélie appartient à la famille des hydrophyllacées dont aucun taxon n'est cultivé. Cette neutralité pour la rotation, mais également une croissance vigoureuse et

une floraison mellifère, expliquent le large intérêt pour cette culture intermédiaire. Toutefois l'exigence d'un lit de semence fin pour une germination dans l'obscurité limite son utilisation. Le sarrasin est la seule espèce utilisée comme culture intermédiaire de la famille des polygonacées. Sa rapidité de levée, son effet de couverture et son cycle court le rendent intéressant dans des intercultures courtes avant une céréale d'automne. Le lin, unique espèce de la famille des linacées, montre une facilité de conduite valorisée en mélange principalement.

# 1.5. Plan du rapport

L'étude se structure en deux parties. La première présente l'état des connaissances sur les principales fonctions des cultures intermédiaires et repose sur une analyse de la bibliographie scientifique et technique, et sur l'analyse de données issues de l'enquête "Pratiques culturales" (2006). Elle permet de préciser les acquis, incertitudes et questions à approfondir.

La seconde partie vient pallier l'incomplétude des informations rassemblées dans la première partie, et porte sur les questions qui intéressent plus directement les modes de gestion de l'interculture *via* la gestion des résidus de récolte, les repousses de colza et de blé, et les cultures intermédiaires (pour les conditions françaises). Les effets des cultures intermédiaires sont analysés dans leur fonctionnalité "piège à nitrate", qui reste la priorité de l'étude : problèmes liés à leur implantation, efficacité du piégeage du nitrate, effet sur la culture suivante, difficultés liées à leur destruction en fonction de la variabilité des conditions françaises. Cette deuxième partie repose sur un travail de simulation qui vise à décliner différents modes de gestion de l'interculture pour une large gamme de situations pédoclimatiques représentatives de la France métropolitaine, ceci afin d'éclairer des points où les connaissances et les références régionales font actuellement défaut.

#### 1. Introduction

#### Partie I. Analyse bibliographique

#### 2. Gestion de l'interculture : contexte règlementaire et pratiques actuelles

Le contexte règlementaire est abordé grâce à une mise en perspective historique de la règlementation visant à la réduction des pollutions des eaux par les ions nitrate, à savoir principalement les étapes de la mise en œuvre de la directive Nitrate. Un état des lieux des pratiques, basé sur une analyse de l'enquête "Pratiques culturales" 2006 du SSP (Ministère de l'Agriculture), est proposé ; il porte à la fois sur les cultures intermédiaires et sur la gestion des repousses et des résidus de la culture principale.

#### 3. Les itinéraires techniques des cultures intermédiaires

Ce chapitre examine les aspects techniques abordés dans la bibliographie scientifique et technique concernant les phases d'implantation et de destruction des cultures intermédiaires. Il aborde ensuite les questions d'organisation du travail liées aux cultures intermédiaires dans les exploitations agricoles et à l'échelle de la parcelle par une analyse de la bibliographie technique concernant les jours disponibles. Il propose enfin une étude restreinte des temps de travaux et des surcoûts entraînés par l'implantation et la destruction d'une culture intermédiaire, par l'analyse de données issues d'instituts techniques et de chambres d'agriculture.

#### 4. Nitrate et eau en période d'interculture

Ce chapitre aborde la bibliographie concernant l'objectif principal de l'étude, à savoir les cultures intermédiaires en tant que pièges à nitrate et les autres moyens de réduire la lixiviation. La bibliographie scientifique est abondante dans ce domaine. A partir d'une analyse des mécanismes de la dynamique de l'eau et de l'azote durant l'interculture, l'efficacité du piégeage par des moyens alternatifs (repousses, gestion des résidus) et par les cultures intermédiaires est étudiée. On en déduit l'impact des cultures intermédiaires sur la quantité d'eau drainée, la quantité d'azote lixivié et la teneur en nitrate de l'eau de drainage. Dans un second temps, l'analyse porte sur les conséquences des cultures intermédiaires sur la culture suivante, à savoir l'effet sur le bilan hydrique et l'azote disponible.

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

Ce chapitre aborde, par une revue de la littérature scientifique, les effets abiotiques (autres que la réduction de la lixiviation du nitrate) attribués aux cultures intermédiaires. Sont successivement abordés l'effet des cultures intermédiaires sur la réduction de l'érosion hydrique des sols, sur les propriétés physiques et sur le tassement des sols. Puis les cultures intermédiaires sont analysées sous l'angle de leur effet sur les gaz à effet de serre : séquestration de carbone dans le sol, impact des CI sur les émissions de N<sub>2</sub>O.

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

Ce chapitre synthétise les principales connaissances scientifiques concernant les effets des CI sur les adventices, la microflore et la faune d'intérêt agronomique (ou cynégétique pour ce dernier groupe). Il s'agit essentiellement des bioagresseurs rencontrés dans ces trois groupes, mais aussi des organismes utiles. La difficulté de cette étude bibliographique est qu'elle analyse des travaux n'ayant en général pas eu comme objectif principal de tester diverses modalités de conduite des cultures intermédiaires toutes choses égales par ailleurs.

#### Partie II. Etude par simulations

Cette seconde partie est constituée de trois études complémentaires, qui abordent respectivement les conditions de réussite de la phase de levée, le problème des jours disponibles pour la destruction, et la dynamique de l'azote et de l'eau durant l'interculture et ses effets sur la culture principale suivante, pour différentes modalités de gestion de l'interculture.

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

Ce chapitre présente les éléments communs aux trois études par simulation. Il s'agit essentiellement de justifier l'intérêt de mener une étude par simulation au moyen d'un modèle de culture dynamique, de justifier le choix du modèle STICS et de le présenter. Il permet également d'expliquer le choix des situations climatiques, pédologiques et techniques retenues pour ces simulations, à savoir : 24 sites climatiques répartis sur le territoire français, 20 années de données climatiques, plusieurs types de sols sur chaque site, 3 successions culturales types et différentes modalités de gestion de l'interculture.

#### 8. Simulation de la levée des cultures intermédiaires avec le modèle "SIMPLE"

L'implantation des cultures intermédiaires est une étape essentielle de l'itinéraire technique. Plusieurs facteurs et conditions influencent le déroulement de la phase semis-levée. L'objectif dans ce chapitre est d'estimer, par un travail de simulation, la fréquence de conditions favorables ou défavorables à l'implantation des CIPAN pour différents espèces, modes de semis et conditions pédoclimatiques. Cette étude utilise le modèle SIMPLE.

# 9. Evaluation par simulation des jours potentiellement disponibles pour la destruction mécanique des cultures intermédiaires à l'automne

Ce travail de simulation vise à évaluer le nombre de jours potentiellement disponibles pour la réalisation d'une destruction mécanique de la culture intermédiaire à l'automne, sur la base de la caractérisation de l'état hydrique du sol, qui détermine sa portance. Ce travail ne prend donc pas en compte les aspects d'organisation du travail sur l'exploitation mais s'intéresse uniquement à l'état hydrique du sol pour analyser les jours potentiellement disponibles pour détruire les CI dans de bonnes conditions. Il a été réalisé avec le modèle STICS et l'utilisation de seuils de teneur en eau *ad hoc* en fonction de la texture du sol.

# 10. Impacts de la gestion de l'interculture sur les bilans d'azote et d'eau, et sur le rendement de la culture suivante, simulés avec le modèle de culture STICS

Ce chapitre traite d'abord de l'acquisition d'azote par les cultures intermédiaires et des repousses de blé et colza, en étudiant notamment l'effet des dates de levée et de destruction. Puis l'efficacité des modes de gestion de l'interculture pour réduire la lixiviation et la concentration en nitrate de l'eau de drainage est étudiée, en analysant non seulement le cas des repousses et des cultures intermédiaires mais aussi l'enfouissement des résidus du précédent. L'efficacité des cultures intermédiaires pour recycler des apports de lisier et l'effet sur la lixiviation est

également abordée. Enfin, à partir de l'analyse de l'arrière effet à court terme des cultures intermédiaires et des repousses sur le reliquat d'azote minéral en début de la période de drainage suivante, leur effet sur le rendement de la culture suivante est analysé. L'ensemble de ces simulations recourt au modèle STICS.

#### 11. Conclusions

Ce chapitre fait la synthèse des résultats marquants concernant l'efficacité comparée des modes de gestion de l'interculture et notamment des cultures intermédiaires comme "piège à nitrate". Les résultats des simulations sont comparés aux données bibliographiques afin d'en évaluer la pertinence. Des conclusions sont tirées pour une gestion optimale des cultures intermédiaires.

## 1.6. Etude bibliographique : analyse du corpus

**Hugues Leiser** 

Le corpus des références bibliographiques citées dans le rapport final de l'étude comprend 886 documents. Cet ensemble est composé, d'une part, d'articles de revues à comité de lecture issus du Web of science (Wos) et, d'autre part, de références de la littérature grise, principalement rapports et revues techniques.

L'équation thématique finale utilisée pour interroger le champ Topics du Wos provient de la réunion d'équations construites dans un premier temps en fonction des champs thématiques pertinents identifiés, et qui avaient amené à constituer plusieurs groupes d'experts. Il s'est ensuite avéré préférable de constituer une seule requête transversale à tous les groupes thématiques et de distribuer les références vers chacun d'eux.

L'équation thématique appliquée au Wos a, dans un premier temps, généré un corpus d'environ 6000 références. Une phase de nettoyage a permis de réduire le corpus à environ 2000 références par suppression des documents soit uniquement indexés sur les "Keyword plus" soit jugés de faible pertinence par les experts. Au final, 886 documents de ce corpus ont été utilisés dans le rapport.

La ventilation des références s'est ensuite faite en fonction des chapitres du rapport auxquels les différents groupes d'experts ont participé. La structuration de l'analyse bibliographique en différents chapitres recouvre très largement les champs thématiques qui avaient été identifiés.

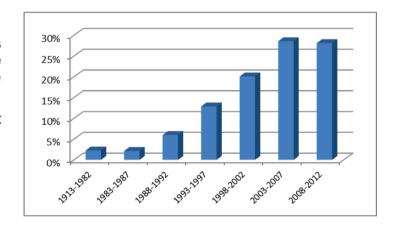
L'analyse bibliographique présente des indicateurs généraux sur le nombre de publications, la typologie documentaire et l'évolution temporelle, mais aussi des données plus qualitatives représentant les réseaux de collaborations entre auteurs et les principaux mots-clés par chapitre.

## 1.6.1. Données générales pour l'ensemble du corpus (886 références)

#### • Nombre de références par années

Les années de publication des références s'échelonnent de 1913 à 2012; afin de faciliter la lecture, des groupes ont été constitués sur des périodes de 5 ans.

Environ 75% des références sont concentrées sur la période 1998-2012.



#### • Types de documents

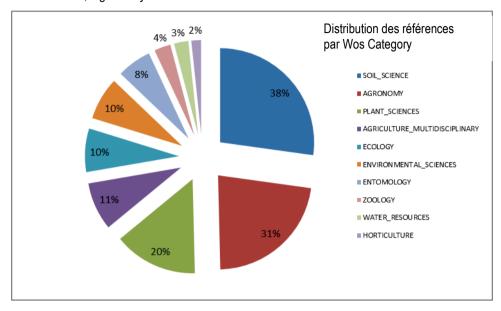
La distribution générale par type de documents montre une prédominance des articles publiés dans des revues à comité de lecture.

	Nombre de	
Type de document	références	% du total
Revue à comité de lecture	725	81,8%
Texte légal	27	3,3%
Rapport	30	3,0%
Littérature grise (*)	21	2,4%
Chapitre d'ouvrage	20	2,3%
Revue sans comité de lecture	20	2,3%
Ouvrage	19	2,1%
Congrès	17	1,9%
Thèse	8	0,9%
Total des références	886	100%

<sup>(\*)</sup> constitué principalement avec la littérature technique du chapitre 3

#### Les thématiques

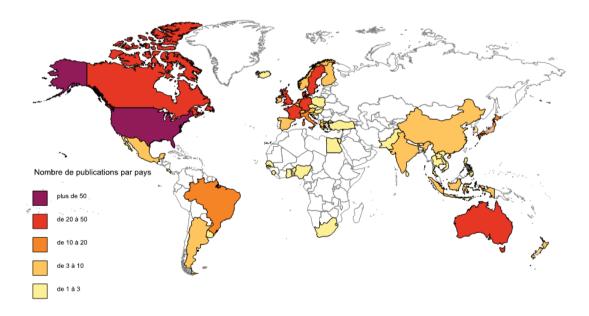
Pour l'ensemble du corpus 223 titres de revues ont été identifiés (cf. annexe). L'analyse des thématiques porte sur les 140 titres indexés dans le JCR pour lesquels une ou plusieurs Wos Category sont attribuées. On observe une multidisciplinarité importante puisque 35 thématiques différentes sont répertoriées. La figure ci-dessous montre la répartition des 10 thématiques représentant au moins 2% du corpus avec une prédominance des thématiques *Soil Science*, *Agronomy* et *Plant Sciences*.



#### Les pays

L'analyse du champ "Address" des références indexées dans le Wos montre que les auteurs sont affiliés à des structures présentes dans 51 pays. Les 11 premiers pays en termes d'occurrence représentent 75% du corpus (USA, France, United Kingdom, Denmark, Canada, Germany, Sweden, Australia, Brazil, Netherlands et Italy).

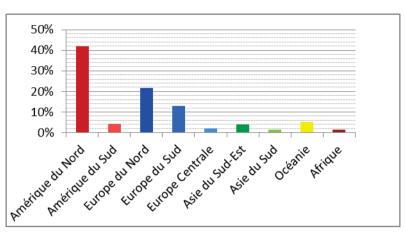
#### Distribution des références par pays



Distribution des références par zones géographiques

Le tableau et la figure ci-dessous montrent la répartition par zones géographiques. On observe que les publications sont concentrées sur l'Amérique du Nord (41,8%) et l'Europe (34,6%).

Zones géographiques	Nombre de références	% du total
Amérique_du_Nord	233	41,8%
Europe_du_Nord	121	21,7%
Europe_du_Sud	72	12,9%
Europe_Centrale	12	2,2%
Océanie	29	5,2%
Asie_du_Sud-Est	22	4,0%
Asie_du_Sud	7	1,3%
Amérique_du_Sud	24	4,3%
Afrique	7	1,3%
Total des références	557	



#### 1.6.2. Données générales par chapitre

Seules les données des chapitres 3, 4, 5 et 6 sont présentées.

Chapitre 3 (sections 3.1, 3.2 et 3.3) :

Types documentaires

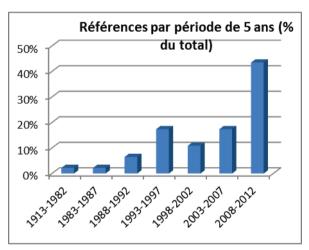
Types documentaires (% du total)

60%

40%

Congrés Ouvrage Revue à Littérature comité de grise lecture

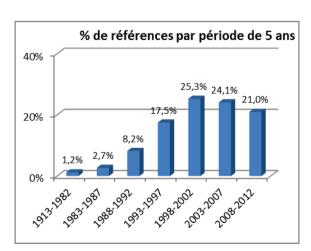
Distribution temporelle



Distribution temporelle : le nombre de références oscille entre 10% et 17% du corpus entre 1993 et 2007 pour s'accroître fortement sur la période 2008-2012 (40% du corpus).

#### Chapitre 4

Distribution temporelle:

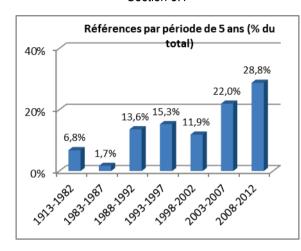


#### • Chapitres 5

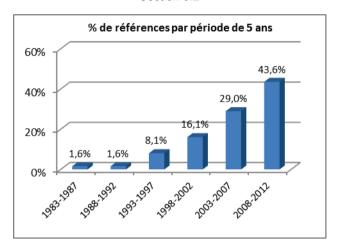
#### Distribution temporelle:

Section 5.1 : le nombre de références croit assez régulièrement dans le temps au long de la période étudiée avec toutefois un creux important pour la période 1983-87. Section 5.2 : le nombre de références croit régulièrement à partir du début des années 1990 jusqu'à 2012.

Section 5.1



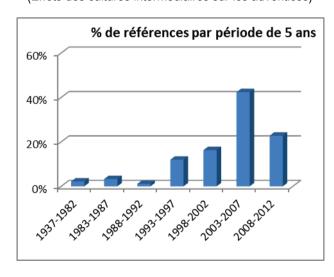
Section 5.2



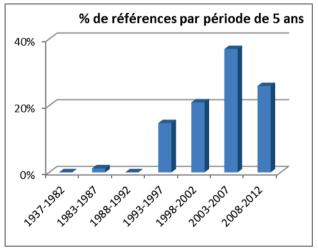
#### Chapitres 6

Les distributions temporelles pour les chapitres 6.1, 6.2 et 6.3 sont assez similaires, avec une croissance importante et régulière du début des années 1990 à 2007 pour ensuite décroitre sur les 5 dernières années.

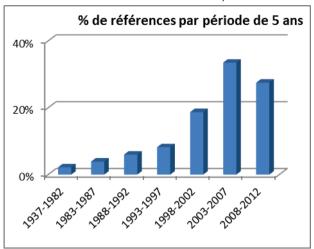
Section 6.1 (Effets des cultures intermédiaires sur les adventices)



Section 6.2 (Effets des cultures intermédiaires sur la microflore)



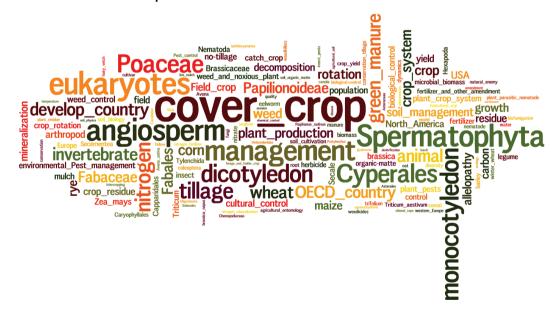
Section 6.3
(Effets des cultures intermédiaires sur la faune,
- invertébrés et vertébrés)



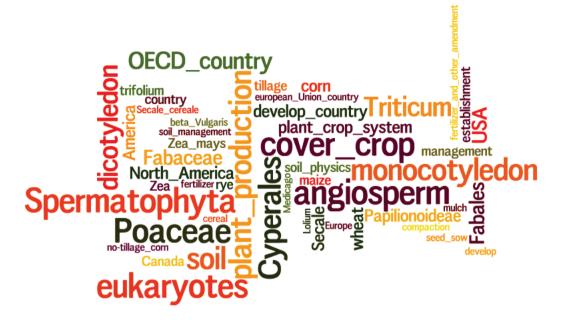
# 1.6.3. Mots-clés associés aux chapitres 3, 4, 5 et 6 (50 premiers mots de plus forte occurrence par chapitre)

Pour chacun de ces chapitres, les mots-clés des auteurs sont représentés dans des nuages où la taille des mots est proportionnelle au nombre d'occurrences. Ces nuages ont été réalisés sur la base des publications indexées dans le Wos.

#### • Pour l'ensemble du corpus



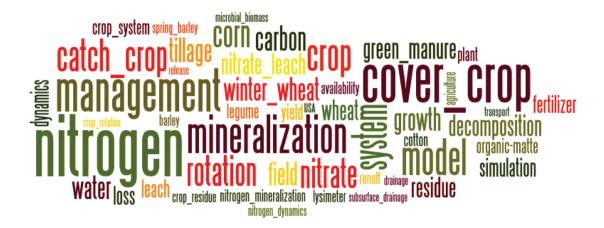
• Chapitre 3, sections 3.1 et 3.2



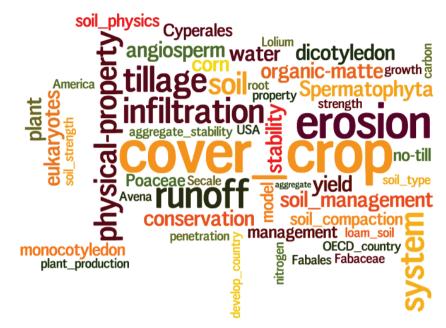
• Chapitre 3, section 3.3



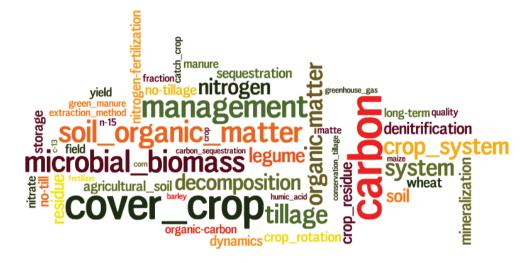
• Chapitre 4



• Chapitre 5, section 5.1



• Chapitre 5, section 5.2



• Chapitre 6

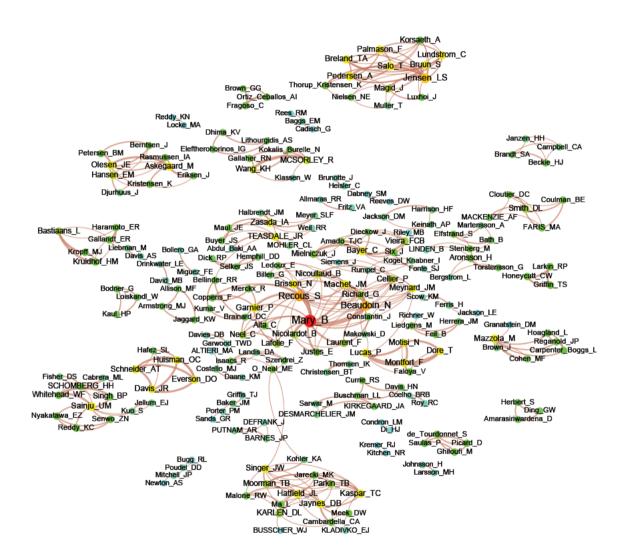


#### 1.6.4. Réseaux de collaborations des auteurs

Le réseau des collaborations a été calculé à partir de l'analyse des co-occurrences d'auteurs dans le champ "Author Address" du Wos. Chaque auteur est représenté par un nœud dont la taille est proportionnelle au nombre de co-signatures. De même l'épaisseur des liens est représentative du nombre de co-signatures partagées entre deux auteurs. Le gradient de couleur des nœuds va du bleu au rouge dans le sens croissant des occurrences. Seuls les auteurs ayant au moins deux collaborations sont représentés sur ces réseaux.

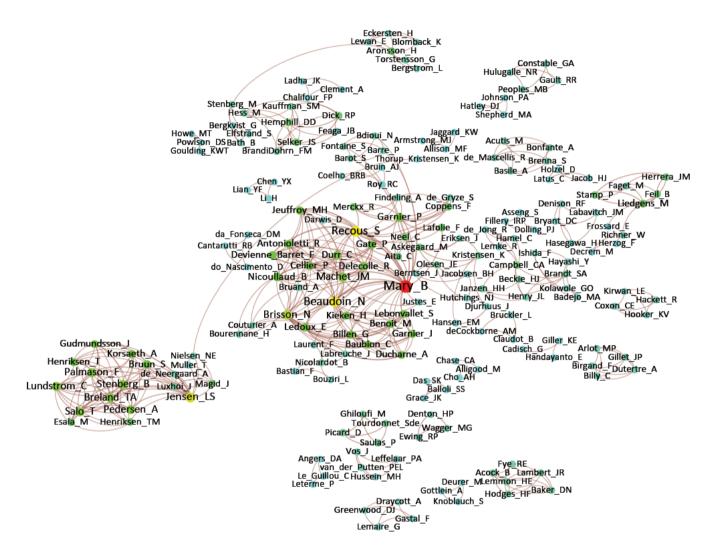
#### • Réseau général pour l'ensemble du corpus

Autour du cluster principal organisé autour de Mary B. (représentatif des références du chapitre 4), on observe d'autres clusters spécifiques des différents chapitres, comme par exemple Bayer C. (chapitre 5) ou Doré T., Teasdale J. et Mazzola M. (chapitre 6).



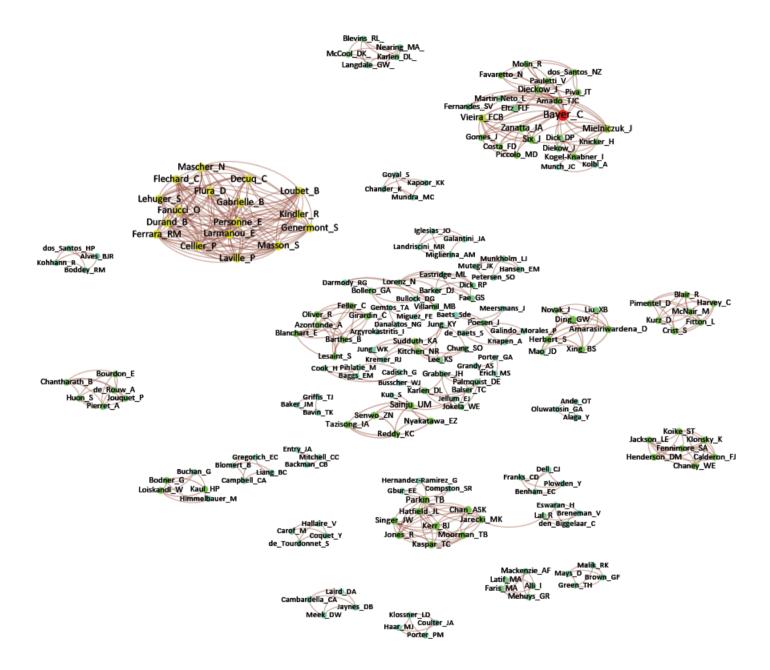
#### Réseau pour les références du chapitre 4

Le réseau de collaboration est assez homogène. A côté d'un groupe central structuré autour de Mary B. et dans une moindre mesure Beaudoin N. et Recous S., on remarque un cluster d'auteurs avec Jensen L.S. comme acteur principal, et d'autres petits clusters assez bien structurés mais sans qu'un auteur principal n'émerge.



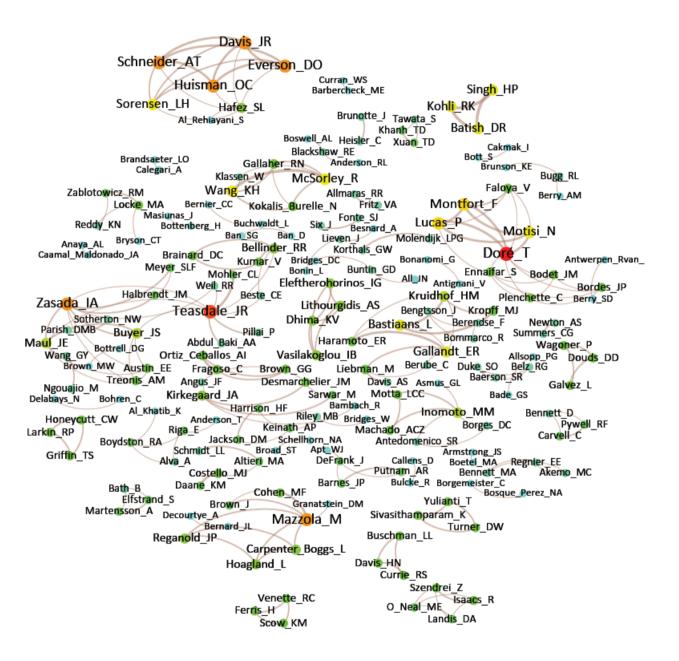
#### • Réseau pour les références du chapitre 5

Le réseau des collaborations est éclaté en plusieurs clusters de différentes tailles s'échelonnant de trois à une trentaine d'auteurs. On peut distinguer un cluster assez fortement structuré autour de Bayer C. et deux autres groupes de collaboration plus diffus sans auteur vraiment central.



#### • Réseau pour les références du chapitre 6

Les auteurs sont relativement dispersés au sein du réseau de collaboration. On remarque cependant de petits groupes structurés autour d'auteurs comme Doré T., Tesdale J.R., Zasada I.A. ou Mazzola M.



# Annexe : Liste des revues de publication

223 titres de revues ont été repérés.

31 29	4,2%
29	<del></del>
	3,9%
25	3,4%
24	3,2%
24	3,2%
24	3,2%
21	2,8%
18	2,4%
17	2,3%
	2,2%
	2,0%
	2,0%
	1,6%
	1,0%
	1,4%
	7
	1,1%
	1,1%
	1,1%
8	1,1%
7	0,9%
7	0,9%
7	0,9%
7	0,9%
6	0,8%
6	0,8%
6	0,8%
5	0,7%
5	0,7%
5	0,7%
5	0,7%
5	0,7%
5	0,7%
5	0,7%
4	0,5%
4	0,5%
4	0,5%
4	0,5%
4	0,5%
4	0,5%
4	0,5%
4	0,5%
	0,5%
	0,5%
	0,3%
	0,4%
	0,4%
3	0,4%
	24 21 18 17 16 15 15 12 10 10 9 8 8 8 8 7 7 7 7 7 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5

Cahiers Agricultures	3	0,4%
Critical Reviews in Plant Sciences	3	0,4%
Cultures intermédiaires : impacts et conduite	3	0,4%
Ecological Modelling	3	0,4%
HortTechnology	3	0,4%
International Journal of Pest Management	3	0,4%
Journal of Applied Ecology	3	0,4%
Journal of Crop Production	3	0,4%
OCL - Oleagineux, Corps Gras, Lipides	3	0,4%
Pedobiologia	3	0,4%
Swedish Journal of Agricultural Research	3	0,4%
Zeitschrift Fur Pflanzenkrankheiten Und Pflanzenschutz-Journal of Plant Diseases and Protection	3	0,4%
Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science	2	0,3%
Agricultural and Forest Meteorology	2	0,3%
Agriculture, Ecosystems and Environment	2	0,3%
Ambio	2	0,3%
American Journal of Alternative Agriculture	2	0,3%
Annual Review of Phytopathology	2	0,3%
BioControl	2	0,3%
Biogeochemistry	2	0,3%
Biological Conservation	2	0,3%
California Agriculture	2	0,3%
Cultures intermédiaires : enjeux et mise en Å"uvre	2	0,3%
Ecological Entomology	2	0,3%
European Journal of Plant Pathology	2	0,3%
European Journal of Soil Biology	2	0,3%
Fiches techniques	2	0,3%
Florida Entomologist	2	0,3%
Gesunde Pflanzen	2	0,3%
Journal of Agronomy and Crop Science	2	0,3%
Journal of Chemical Ecology	2	0,3%
Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce	2	0,3%
Journal of Plant Nutrition and Soil Science	2	0,3%
Journal of Plant Nutrition and Soil Science- Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde	2	0,3%
Journal of Soil & Water Conservation	2	0,3%
Landbauforschung Volkenrode	2	0,3%
Le Courrier de l'environnement de l'INRA	2	0,3%
Microbes and Environments	2	0,3%
New Phytologist	2	0,3%
Non-chemical weed management: principles, concepts and technology	2	0,3%
Norwegian Journal of Agricultural Sciences	2	0,3%
Oecologia	2	0,3%
Physics and Chemistry of the Earth	2	0,3%
Plant Pathology	2	0,3%
Progress in Plant Protection	2	0,3%
Revue Suisse d'Agriculture	2	0,3%
Science	2	0,3%
Transactions of the Asae	2	0,3%
Vadose Zone Journal	2	0,3%

Weed Biology and Management	2	0,3%
Action Agricole de Touraine	1	0,1%
Advances in Agronomy, Vol 67	1	0,1%
Advances in Agronomy, Vol 79	1	0,1%
African Journal of Agricultural Research	1	0,1%
Agricultural Economics	1	0,1%
Agricultural Journal	1	0,1%
Agricultural Sciences	1	0,1%
Agroforestry Systems	1	0,1%
Agroindustria	1	0,1%
Agron. J.	1	0,1%
Allelopathy.	1	0,1%
American Journal of Enology and Viticulture	1	0,1%
American Society of Agricultural Engineers	1	0,1%
Annales Agriculturae Fenniae	1	0,1%
-	1	0,1%
Annales Agronomiques	1	
Annals of Botany		0,1%
Annu. Rev. Ecol. Syst.	1	0,1%
Applied Geography	1	0,1%
Australasian Plant Pathology	1	0,1%
Australian Journal of Experimental Agriculture	1	0,1%
Australian Journal of Soil Research	1	0,1%
Berichte Über Landwirtschaft	1	0,1%
Biomass & Bioenergy	1	0,1%
Biotechnol. Agron. Soc. Environ	1	0,1%
Biotechnol. Agron. Soc. Environ.	1	0,1%
Biotechnologie Agronomie Societe Et Environnement	1	0,1%
British Sugar Beet Review	1	0,1%
Bulletin of Entomological Research	1	0,1%
C.A.B. International	1	0,1%
CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources	1	0,1%
Cahier technique	1	0,1%
Canadian Journal of Plant Pathology-Revue Canadienne De Phytopathologie	1	0,1%
Catena	1	0,1%
Chemosphere	1	0,1%
Collection les Collogues de l'INRA	1	0,1%
Comptes Rendues de l'Académie d'Agriculture	1	0,1%
Computers and electronics in agriculture	1	0,1%
Cover crop for clean water	1	0,1%
Crops Residue Management.	1	0,1%
Cultures intermédiaires - Impacts et conduite	1	0,1%
Earth Surf. Process. Land.	1	0,1%
Ecological Applications	1	0,1%
Ecological Economics	1	0,1%
Ecology	1	0,1%
Entomologia Experimentalis Et Applicata	1	0,1%
Environmental Modelling & Software	1	0,1%
Environmental Science & Policy	1	0,1%
Etudes et Recherches sur les Systèmes	1	0,1%
	1	<u>0 10/</u>
Agraires et le Développement  Experimental and Applied Acarology  Faune Sauvage	1	0,1%

Fertilizer Research	1	0,1%
Food Reviews International	1	0,1%
Fourrages	1	0,1%
Fruitteelt (Den Haag)	1	0,1%
Functional Plant Biology	1	0,1%
Great Lakes Entomologist	1	0,1%
Handbook Series Book 9	1	0,1%
Improving soil quality: implications for weed management	1	0,1%
In: Walters (Ed.), Disease Control in Crops: Biological and Environmentally Friendly Approaches. D. Wiley-Blackwell, Oxford	1	0,1%
Ingénierie EAT	1	0,1%
Insect Science and its Application	1	0,1%
International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies	1	0,1%
International Journal of Physical Sciences	1	0,1%
International Journal of Tropical Insect Science	1	0,1%
Irrigation Science	1	0,1%
Isotopes in Environmental and Health Studies	1	0,1%
Journal of Agronomy and Crop Science-Zeitschrift Fur Acker Und Pflanzenbau	1	0,1%
Journal of Apicultural Research	1	0,1%
Journal of Applied Entomology	1	0,1%
Journal of Applied Seed Production	1	0.1%
Journal of Contaminant Hydrology	1	0,1%
Journal of Ecology	1	0,1%
Journal of Entomological Science	1	0,1%
Journal of Environmental Sciences-China	1	0,1%
Journal of Food Agriculture & Environment	1	0,1%
Journal of Insect Conservation	1	0,1%
Journal of Pesticide Science	1	0,1%
Journal of Plant Pathology	1	0,1%
Journal of Production Agriculture	1	0,1%
Journal of Sugar Beet	1	0,1%
Journal of Sugar Beet Research	1	0,1%
Journal of the American Water Resources Association	1	0,1%
Journal of the Science of Food and Agriculture	1	0,1%
Journal of Wildlife Management	1	0,1%
Le travail en agriculture : son organisation et ses valeurs face à l'innovation	1	0,1%
Microbial Ecology	1	0,1%
Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision	1	0,1%
Nature	1	0,1%
Nematologia Brasileira	1	0,1%
Nematologia Mediterranea	1	0,1%
Netherlands Journal of Agricultural Science	1	0,1%
New Zealand Journal of Agricultural Research	1	0,1%
PAV-Bulletin Akkerbouw	1	0,1%
Perspectives Agricoles	1	0,1%
Pest Management Science	1	0,1%
Phytoma	1	0,1%
	1	0,1%
Phytomorphology	1	0,170
Plant Disease Reporter	1	0,1%

Plos One	1	0,1%
Proceedings of the International Symposium Towards Ecologically Sound Fertilisation Strategies for Field Vegetable Production	1	0,1%
Process studies in hillslope hydrology	1	0,1%
Recherche Agronomique Suisse	1	0,1%
Renewable Agriculture and Food Systems	1	0,1%
Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science	1	0,1%
Revue de l'Agriculture	1	0,1%
Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture	1	0,1%
Science of the Total Environment	1	0,1%
Soil Science	1	0,1%
Soil Science and Plant Nutrition	1	0,1%
Soil Technology	1	0,1%

Soil Use Manage	1	0,1%
Southwestern Entomologist	1	0,1%
Sugar Cane International	1	0,1%
Swedish University of Agricultural Sciences	1	0,1%
Terra	1	0,1%
Terre de Touraine	1	0,1%
Toxicological and Environmental Chemistry	1	0,1%
Trans. ASAE	1	0,1%
Tropical and Subtropical Agroecosystems	1	0,1%
Tropical Plant Pathology	1	0,1%
Weed Research (Oxford)	1	0,1%
Zemdirbyste, Mokslo Darbai	1	0,1%
TOTAL	743	100,0%

# Références bibliographiques citées

- Besnard A., Duval R., Hopquin B., Lieven J., Morin P., Sträbler M., 2011. Un choix d'espèces de plus en plus large. *in* Cultures intermédiaires : impacts et conduite. Arvalis Institut du végétal, Paris, pp. 137-161.
- Chen G., Weil R.R., 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soils. Plant and Soil 331, 31-43.
- Clark A., 2007. Managing Cover Crops Profitability. Sustainable Agriculture Research and Education (SARE), Beltsville, MD.
- ITB, 2003. Implantation de couverts végétaux en interculture. Cahier technique. Institut Technique Français de la Betterave Industrielle, Paris, pp. 1-14.
- Labreuche J., Beets B., 2007. De nombreuses espèces à essayer. Cultures intermédiaires : enjeux et mise en œuvre. Arvalis Institut du végétal, Paris, pp. 10-13.
- Labreuche J., Maillet-Mezeray J., 2007. De nombreuses espèces à semer. *in* Cultures intermédiaires : enjeux et mise en œuvre. Arvalis Institut du végétal, Paris, pp. 4-9.
- Minette S., 2010. Caractéristiques des principales cultures intermédiaires. Chambre régionale d'Agriculture Poitou-Charentes, Lusignan.
- Reau R., Bodet J.M., Borde, J.P., Dore T., Ennaifar S., Moussart A., Nicolardot B., Pellerin S., Plenchette C., Quinsac A., Sausse C., Seguin B., Tivoli B., 2005a. A review on Brassicas allelopathic effects through their interaction with soil borne pathogens and mycorrhizas. Part 1. OCL Oleagineux, Corps Gras, Lipides 12, 261-271.
- Reau R., Bodet J.M., Bordes J.P., Dore T., Ennaifar S., Moussart A., Nicolardot B., Pellerin S., Plenchette C., Quinsac A., Sausse C., Seguin B., Tivoli B., 2005b. A review on Brassicas allelopathic effects through their interaction with soil borne pathogens and mycorrhizas. Part 2. OCL Oleagineux, Corps Gras, Lipides 12, 314-319.
- Thorup-Kristensen K., Magid J., Jensen L.S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. Advances in Agronomy 79, 227-302.
- Vericel G., 2010. Légumineuses, comment les utiliser comme cultures intermédiaires ? Chambre régionale d'agricutlure de Poitou-Charentes, Lusignan, pp. 1-20.