



HAL
open science

Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services

Eric Justes, Guy Richard

► **To cite this version:**

Eric Justes, Guy Richard. Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services. Innovations Agronomiques, 2017, 62, pp.1-15. 10.15454/1.5174017785695195E12 . hal-01770348

HAL Id: hal-01770348

<https://hal.science/hal-01770348v1>

Submitted on 18 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Contexte, Concepts et Définition des cultures intermédiaires multi-services

Justes E.^{1,2} et Guy Richard ³

¹ INRA, UMR AGIR, Université de Toulouse, INRA, INPT, INP-PURPAN, Castanet Tolosan, France

² Depuis le 01/09/2017 : CIRAD, UMR SYSTEM, Université de Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

³ INRA, Département Environnement et Agronomie, Centre INRA Val de Loire, F-45075 Orléans

Correspondance : eric.justes@inra.fr ; eric.justes@cirad.fr

Résumé

La notion de culture intermédiaire a clairement évolué historiquement, en fonction du service recherché, passant par exemple de la notion d'engrais vert à CIPAN (piège à nitrate) dans les années 1970 à 1990, et aujourd'hui nous proposons d'utiliser l'acronyme de CIMS pour parler de cultures intermédiaires multi-services). Ces CIMS sont utilisées pour produire des services écosystémiques en période d'interculture. Ce sont des cultures qui ne sont pas récoltées, elles sont enfouies ou laissées en surface du sol. Les CIMS permettent de produire simultanément différents services écosystémiques, avec plus ou moins d'efficacité en fonction des espèces ou du mélange d'espèces semées, de leur mode de gestion, de la situation pédo-climatique et de la succession de cultures de vente dans laquelle elles sont insérées. Les services produits concernent i) la gestion de l'azote (effet piège à nitrate), ii) la protection physique du sol, iii) le stockage de carbone, iv) la réduction des bio-agresseurs (mauvaises herbes, pathogènes), v) la pollinisation, vi) l'esthétique du paysage. Le bouquet de services qui peut être produit par la CIMS et l'éventuel compromis recherché entre les services produits doit être défini explicitement afin de choisir la bonne espèce ou de concevoir l'assemblage d'espèces à implanter. Un grand nombre de familles botaniques peuvent être utilisées comme CIMS (crucifères, graminées, légumineuses, composées, autres familles). Toutefois, il convient de choisir des espèces non hôtes des maladies et ravageurs des cultures principales, ceci pour limiter les éventuels dis-services. De plus, pour maximiser les services écosystémiques rendus par les mélanges d'espèces, il est nécessaire que l'association permette une bonne complémentarité de développement et de croissance. Enfin, nous faisons l'hypothèse que les CIMS, avec des espèces bien choisies et gérés avec des itinéraires techniques adaptés, peuvent être un levier efficace d'une écologisation des systèmes de culture français, sans nécessairement avoir besoin de transformer radicalement le système, ni le niveau de travail du sol.

Mots-clés : Culture intermédiaire, Services écosystémiques, Effet piège à nitrate, Effet engrais vert, Couverture du sol, Mélange d'espèces

Abstract: Context, definition and concepts of multi-services cover crops

The notion of cover crop has clearly evolved historically, in particular in France and Europe, depending on the service provided, moving from the notion of green manure to catch crop, and today we are proposing the term of Multi-services cover crops (MSCC). These MSCC are used in agriculture to produce various ecosystem services during fallow period between two main cash crops. These MSCC are not harvested and their biomass is returning to the soil (incorporated or at soil surface). The provision of multi-services depend on the species, the mixtures of species, the management of the cover crop, the pedo-climat conditions and the cash crop succession in which the MSCC is inserted.

The services produced are the following: i) nitrogen management (nitrate catch crop and green manuring), ii) soil protection, iii) carbon storage in the soil, iv) control and suppression of weeds, diseases and pests, v) pollinisation of plants and vi) landscape aesthetic. The trade-off between services produced by the MSCC must be explicitly defined before their setting up in order to correctly select the right species or the design of species assemblage appropriate to produce the targeted services and their level of expression. Many botanical families can be used as MSCC (cruciferous, grass, legume, other families). However, it is advisable to choose non-host species of diseases and pests of main cash crops, in order to limit the possible dis-services. In addition, to maximize the ecosystem services provided by species chosen, it is necessary for the association to achieve good complementarity of development and growth. Finally, we hypothesize that MSCC, with well-chosen species and well managed, can be an effective lever for an ecologization of French cropping systems, without necessarily having to radically transform the cropping system, nor the level of soil tillage.

Keywords: Cover crop, Ecosystem services, Catch crop, Green manure, Cover crop, Species mixture.

Introduction

Dans la rotation culturale (ou succession de cultures de vente ou de rente), l'interculture est la période comprise entre la récolte d'une culture principale et le semis de la suivante ; elle peut durer de quelques jours à plusieurs mois. Des cultures intermédiaires (CI) peuvent être alors implantées pour agir sur différents compartiments de l'environnement, i.e. l'eau, l'air, le sol et la biodiversité, au travers de ce qu'on dénomme des services écosystémiques (MEA, 2005). Ces cultures intermédiaires sont définies par deux caractéristiques importantes et indissociables (Justes et al., 2012) :

- Le semis d'espèces adaptées à produire des services écosystémiques non marchands durant l'interculture ;
- Le fait que ces couverts ne sont pas récoltés et sont enfouies (destruction mécanique) ou laissées sur le sol (broyage, destruction chimique ou naturelle par le gel) plusieurs semaines ou juste avant l'implantation de la culture principale suivante.

Il convient donc de ne pas confondre deux concepts :

- L'interculture et la culture intermédiaire, bien que cela est souvent le cas dans le langage courant agricole ; **l'interculture est une période** et la CI est un couvert végétal vivant. La gestion de l'interculture peut être réalisée sans utilisation de cultures intermédiaires par les modalités de travail du sol et de gestion des repousses.
- Les cultures intermédiaires se distinguent des cultures dérobées ou des double cultures (production de fourrage, de légumes d'industrie à cycle court, etc.) et des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE, production de biomasse énergétique par méthanisation), **ces deux catégories de culture étant exportées de la parcelle et valorisées**, même si elles occupent le même créneau temporel en interculture et peuvent produire des services écosystémiques en fonction de leur gestion et du niveau de biomasse exportée.

L'acronyme de **CIMS** peut aussi s'appliquer à la notion de **Cultures Intercalaires Multi-Services**, faisant référence à des couverts végétaux intercalaires en bandes, annuels semés ou pluriannuels, localisés inter-rangs de cultures pérennes (vergers ou vignes enherbées par exemple). Cette acception n'est pas commentée ci-après. Elle mériterait une analyse et un développement d'arguments spécifiques et d'éléments de gestion technique adaptés, ce qui ne correspond pas à l'objet de ce présent texte.

1. Contexte historique et réglementaire

1.1 Une terminologie qui a évolué historiquement

De façon synthétique, on peut résumer l'évolution historique récente de la terminologie qui fait référence aux cultures intermédiaires en fonction notamment du service recherché, concomitant aux grandes préoccupations conjoncturelles de l'agriculture. Ainsi, pour simplifier, on peut repérer 3 grandes périodes dans l'agriculture récente :

- Dans les années 1970-1980, on parle surtout d'engrais vert en lien avec la structuration du sol et la fourniture d'azote.
- Dans les années 1990-2000, le terme CIPAN (Culture intermédiaire piège à nitrate) est très utilisé pour traiter de la question de la pollution nitrique (cf. Directive nitrate européenne de 1991) ; la fonction recherchée est d'abord celle de l'immobilisation du nitrate et l'amélioration de qualité de l'eau drainée.
- Dernièrement, dans les années 2010, les cultures intermédiaires sont clairement vues comme multiservices (CIMS), faisant référence aux services d'amélioration des impacts de l'agriculture sur les trois grands compartiments sol/eau/air permettant le vivant et la biodiversité au sens large.

1.2 Le contexte réglementaire qui a fait émerger la notion de CIPAN

1.2.1 Le contexte de la directive européenne sur la réduction des pollutions nitriques des eaux

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 mg NO₃/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 ions nitrate d'origine agricole. Les États membres doivent, d'une part, identifier sur leur territoire les 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 arriver 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 à 2015, fixant ainsi clairement une obligation de résultats, sauf dérogations strictement encadrées par l'article 4.4 et 4.5 de la directive.

1.2.2 L'obligation de couvert dans les programmes d'action issus de la « directive nitrate »

Les textes de mise en application du premier programme d'action nitrate (1996) n'ont pas repris les dispositions sur la couverture des sols qui étaient indiquées dans le 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 lixiviation (ou 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 2e programmes d'action « nitrate » en 2001 dans les 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 (4e programme 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.

Dans les 5^{ème} programmes d'action actuellement toujours en cours mise en œuvre, le décret du 10 octobre 2011 a inscrit les couverts en interculture dans le plan d'action national. L'arrêté du 7 mai 2012, relatif aux actions renforcées à mettre en œuvre dans certaines zones ou parties de zones vulnérables en vue de la protection des eaux contre la pollution par le nitrate d'origine agricole, indique que dans les programmes régionaux, l'utilisation des CIPAN (terme utilisé) est une mesure obligatoire sauf dans des cas explicites où elles ne peuvent être implantées, comme indiqué dans l'Arrêté du 23 octobre 2013 relatif aux programmes d'actions régionaux. Cet arrêt précise que les plans régionaux, incluant la mise en œuvre des CIPAN, ont pour objectif le renforcement des mesures nationales afin de permettre de s'assurer que le programme d'actions composé du programme d'actions national et du programme d'actions régional garantisse un niveau de protection de l'environnement comparable à celui obtenu par le programme d'actions précédent. Les CIPAN sont donc reconnues par la réglementation explicitement comme efficaces pour réduire la pollution nitrique et doivent être largement mises en œuvre en France.

1.2.3 L'obligation de couverts 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 "nitrate", 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" (prescrit dans le chapitre consacré à l'agriculture).

2. Définitions des concepts et de la terminologie

2.1 Rappel de la définition des services écosystémiques

La définition communément admise de services écosystémiques est celle de l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire (Millenium Ecosystem Assessment, 2005) qui indique que ce sont les bénéfices que les humains retirent des écosystèmes. Un service écosystémique est un avantage matériel ou immatériel que l'homme retire des écosystèmes. Il faut distinguer les « services » des « fonctions écologiques » qui les produisent. Les fonctions écologiques sont les processus naturels écologiques de fonctionnement et de maintien des écosystèmes (basées sur la biodiversité), alors que les services représentent les avantages de ces fonctions pour les humains. Ces services écosystémiques sont par exemple : i) la production de l'oxygène de l'air, via la fonction de photosynthèse des plantes, ii) l'épuration naturelle des eaux via les processus microbiens du sol, iii) la production de biomasse qui nourrit les animaux domestiqués, pêchés ou chassés, iv) l'activité des pollinisateurs dans les cultures et celle des organismes qui produisent et entretiennent l'humus, v) la séquestration de carbone dans le bois, les sols, les mers et le sous-sol, ou encore vi) le recyclage permanent des nutriments et de la nécromasse par les animaux, champignons, bactéries. On y inclut également les aménités offertes par la nature comme la beauté des paysages qui est un service pour le tourisme ou l'éveil de l'Homme.

La stratégie nationale pour la biodiversité (2011-2020) les définit comme « Utilisation par l'homme des fonctions écologiques de certains écosystèmes, à travers des usages et une réglementation qui encadrent cette utilisation. Par souci de simplicité, on dit que les écosystèmes « rendent » ou « produisent » des services. Toutefois, une fonction écologique ne prend la forme d'un service à l'homme que dans la mesure où les pratiques sociales reconnaissent le service comme tel, c'est-à-dire reconnaissent l'utilité de la fonction écologique pour le bien-être humain.

En agriculture, les services écosystémiques sont constitués par la production de biens directement consommables (grains, fourrage, semence, biomasse, fibre...), l'autoépuration des eaux par le sol « système épurateur » qui permet la restitution d'une eau aux nappes ou de surface, non ou peu chargée, avec une teneur inférieure à la norme en molécules potentiellement polluante, comme les ions nitrate, sulfate ou les molécules pesticides ou leur métabolites secondaires. Les services produits sont aussi liés à la stabilisation des propriétés des sols ou encore à la pollinisation. Les services immatériels, influant sur les activités récréatives ou culturelles, constituent l'identité paysagère et esthétique d'une région, due à la composition diversifiée et/ou structurée du paysage via les cultures ayant différentes couleurs de floraison, durée de la période « verte », haies, agroforesterie en parcelle...

2.2 La terminologie des cultures intermédiaires et définition de CIMS

La terminologie est liée à un registre agronomique/agricole.

Dans ce registre, ce sont le service écosystémique et/ou la finalité agricole qui structurent les catégories et la définition des termes utilisés, comme explicité ci-après.

La culture principale (cash crop en anglais) : elle est implantée et conduite dans le but de tirer une production de grains ou de fourrage : c'est donc une culture de vente ou culture de rente.

La culture dérobée (double crop en anglais) : elle est implantée entre deux cultures principales sur deux campagnes culturales différentes, où le semis de la seconde culture se généralement au printemps suivant, en vue d'en obtenir une production dans un temps réduit, comme par exemple du fourrage, ou de la biomasse énergétique. En ce sens elle se distingue conceptuellement de la culture intermédiaire qui ne vise que des services sans exportation de biomasse.

La culture intermédiaire : elle est implantée entre deux cultures principales de façon à rendre un service écosystémique, hormis la production de graines et de biomasse. Les cultures intermédiaires sont semées avec des espèces adaptées à produire des services écosystémiques et sont pas récoltés ; elles sont enfouies par destruction mécanique ou laissées sur le sol (broyage ou destruction chimique) plusieurs semaines ou juste avant l'implantation de la culture principale suivante.

La culture intermédiaire piège à nitrate ou **CIPAN** (catch crop en anglais) : 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 est élevée (cas de fertilisation s'avérant en excès a posteriori et potentiel élevé de minéralisation du sol). Le principal service écosystémique visé est l'épuration de l'eau de drainage et des nappes vis-à-vis du nitrate.

L'engrais vert (green manure en anglais) : culture intermédiaire dont le but est double : celui de fournir de l'azote (ou d'autres éléments minéraux) à la culture suivante et de permettre une amélioration de la stabilité structurale des sols. 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 les bactéries fixatrices d'azote de l'air). Le principal service écosystémique visé est la production d'intrant d'origine « naturelle » et l'amélioration de la fertilité des sols, support important de la production végétale agricole.

La culture de couverture (cover crop en anglais) : elle 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. La terminologie

« cover crop » est souvent utilisée en anglais pour parler aussi bien de culture intermédiaire de type CIPAN, engrais ou encore plante de couverture. Le principal service écosystémique visé est la protection des sols contre l'érosion et l'épuration des eaux des matières en suspension et molécules potentiellement polluantes des eaux de surface.

La culture intermédiaire multi-services ou CIMS : c'est une culture intermédiaire qui permet de produire un certain nombre de services écosystémiques (agronomiques et écologiques) par la production de fonctions agroécologiques qui peuvent être principalement de : i) réduire la lixiviation de nitrate et de sulfate, 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. Elles ne sont pas destinées à être récoltées et sont détruites 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 produire ainsi différents services écosystémiques avec des niveaux d'expression variables en fonction des espèces et de leur itinéraire technique, et notamment la période et le mode de destruction et d'incorporation dans le sol.

Ainsi, une CIMS peut produire divers services écosystémiques, et est donc multi-services comme par exemple ceux de piéger le nitrate et de fournir de l'azote minéral à la culture de vente suivante, dans la perspective de diminuer les intrants, d'épurer l'eau de drainage des ions nitrate, tout en maintenant les objectifs de rendement des cultures principales, ou bien lutter à la fois contre l'érosion par une couverture du sol, etc. Toutefois certains de ces objectifs peuvent être mutuellement contradictoires, ce qui **nécessite de définir des compromis entre services recherchés pour déterminer le niveau d'expression visé pour chacun d'eux**. En effet, il est illusoire de penser que l'on pourra avec une CIMS produire tous les services écosystémiques avec un haut niveau d'expression dans toutes les situations. La conception des assemblages d'espèces et la gestion de la CIMS, qui définit l'itinéraire technique de la CIMS, détermineront le compromis de services écosystémiques qui sera produit par la CIMS dans une situation de production et pédoclimatique donnée. Enfin les CIMS, si les espèces sont mal choisies et leur itinéraire technique mal ajusté, peuvent aussi produire certains dis-services, comme l'augmentation de certaines pathogènes ou mauvaises herbes ; il faut être vigilant pour réduire autant que possible l'expression de ces dis-services en concevant avec soin le mélange d'espèces ou la date de destruction et d'incorporation de la CIMS.

Enfin, le terme « couvert végétal » ou « couverts végétaux » est souvent utilisé dans le langage courant agricole, notamment en situation d'agriculture de « conservation des sols » (« conversation agriculture » en anglais) pour désigner une culture intermédiaire qui est généralement une CIMS. Cette forme d'agriculture est basée sur 3 piliers : i) pas ou peu de travail sol, sans labour, ii) diversification des espèces de vente), et utilisation de couvert végétal en interculture, qui est le plus souvent une CIMS (couvert végétal vivant) afin de produire des fonctions de structuration du sol en substitution du travail du sol et notamment du labour.

3. Les services produits par les CIMS

Les différents services produits par des CIMS peuvent être fournis par plusieurs espèces semées simultanément et donc en mélange pour concevoir des couverts de cultures intermédiaires. De nombreux documents techniques existent pour décrire les services attendus par les cultures intermédiaires, mais également les espèces régulièrement cultivées en France ou offrant un intérêt potentiel (Labreuche et Beets, 2007 ; Labreuche et Maillat-Mezeray, 2007 ; Minette, 2010 ; Vericel, 2010 ; Besnard et al., 2011 ; Justes et al., 2012). Ces données peuvent être enrichies par de nombreuses références issus de travaux réalisés en Amérique du Nord sous le même type de pédoclimat qu'en France (Meisinger et al., 1991 ; Clark, 2007).

Les services écosystémiques les plus souvent analysées concernent : i) l'immobilisation temporaire par absorption d'azote minéral du sol, ii) le maintien d'états physiques du sol favorables à la production végétale agricole et donc aux cultures principales, iii) la protection contre l'érosion, iv) la régulation des ravageurs, maladies et adventices. Ces services peuvent être produits par les grandes familles de cultures comme les crucifères, les graminées ou les légumineuses. Des traits agro-physiologiques 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 (Justes et al., 2012). On peut aussi parler de la production de bouquet de services écosystémiques par les CIMS.

3.1 Protection et amélioration des propriétés chimiques du sol

Le chapitre de synthèse de Beaudoin et al. (2012) in Justes et al. (2012) permet de mettre en évidence les effets suivants :

3.1.1 Réduction des pertes de nitrate par lixiviation

La présence d'un couvert végétal 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 de type CIPAN 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 qualité biochimique des tissus agit sur sa dégradation notamment à travers le rapport C/N, la teneur en lignine, en nitrate et en autres composés solubles agissant sur la décomposition des résidus végétaux et *in fine* sur la minéralisation de l'azote (Justes et al., 2009).

3.1.2 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 CIPAN sont connues bien que leur efficacité soit toutefois significative, correspondant à environ la moitié de l'effet de piège à nitrate des espèces non-légumineuses (Tribouillois et al., 2015).

3.1.3 Séquestration de carbone

La biomasse produite par une CIMS 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 est efficace pour séquestrer du carbone.

3.1.4 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 de la CIMS, après destruction, libère d'importantes quantités de nutriments (P, K, S notamment) sont « ramenés » en surface (Minette, 2010). Cet enrichissement est favorable pour l'installation de la culture suivante. Elle doit aussi être prise en compte dans la planification de la fumure minérale pour éviter tout excédent et pertes correspondantes.

3.2 Protection et amélioration des propriétés physiques du sol

Le chapitre de synthèse de Bertuzzi et al. (2012) in Justes et al. (2012) permet de mettre en évidence les effets suivants :

3.2.1 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 la CIMS est installée 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.

3.2.2 Propriétés hydriques : infiltration, stockage de l'eau

La présence de végétaux, par leur enracinement, renforce la stabilité structurale du sol et la circulation de l'eau. Elle permet ainsi une meilleure infiltration de l'eau grâce à l'implantation de CIMS, si la structure du sol n'est pas dégradée lors de son installation et semis. 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 dus à la présence de la CIMS peuvent avoir un effet sur la qualité de l'implantation de la culture suivante.

3.2.3 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 des CIMS (Constantin et al., 2012).

3.2.4 Structuration du sol

Le système racinaire des plantes ameublissent le sol et entretiennent une structure favorable à la circulation de l'eau et de l'air dans le sol. Les racines pivotantes, par exemple de certaines crucifères (moutarde, navette, etc.) et légumineuses (féverole, luzerne, ect.), peuvent contribuer à réduire localement certains effets de compaction en profondeur, alors qu'un système fasciculé et dense, par exemple de certaines graminées (seigle, avoine rude, ect.) 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 des CIMS.

3.3 Propriétés biologiques et diversité des paysages

Le chapitre de synthèse de Charles et al. (2012) in Justes et al. (2012) permet de mettre en évidence les effets suivants :

3.3.1 Augmentation de la vie biologique des sols

La présence d'une couverture du sol vivante et donc d'une CIMS entre deux cultures permet de maintenir une vie du sol active en interaction avec la plante. Cette augmentation de la vie biologique par des CIMS en croissance assure le maintien, voire permet le développement des propriétés biologiques du sol par des effets dans la rhizosphère, notamment dus aux exsudations de molécules organiques par les plantes.

3.3.2 Contrôle des ravageurs

Les propriétés de certaines espèces utilisées comme CIMS réduisent la présence de ravageurs sur la culture suivante par attraction et piégeage ou intoxication, ou par répulsion. En modifiant les conditions du milieu, les CIMS enrichissent aussi l'écosystème de divers organismes dont certains potentiellement auxiliaires. Certaines CIMS, notamment les crucifères, peuvent être utilisées spécifiquement contre des ravageurs par biofumigation, par exemple via la production de glucosinolates par les crucifères.

3.3.3 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. Certaines CIMS peuvent être utilisées spécifiquement contre les maladies par biofumigation.

3.3.4 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 produite par les crucifères ou certaines graminées ou le sarrasin, via l'exsudation de molécules biocides dans le milieu, peut renforcer ces processus de concurrence des CIMS.

3.3.4 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 des CIMS.

3.3.5 Source alimentaire 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 des CIMS.

3.3.6 Diversification du paysage

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

3.4 Contribution au système de culture

La synthèse de Justes et al. (2012) permet de mettre en évidence les effets suivants :

3.4.1 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.

3.4.2 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 la restauration du sol procurée par les plantes de couverture et la nécessité de production.

4. Typologie des espèces utilisées comme CIMS

Une quarantaine d'espèces sont décrites comme culture intermédiaire par différents chercheurs, Instituts techniques et Chambres d'Agriculture français (Thorup-Kristensen et al., 2003 ; Labreuche et Beets, 2007 ; Labreuche et Mailet-Mezeray, 2007 ; Minette, 2010 ; Justes et al., 2012). Elles appartiennent essentiellement aux familles des crucifères, graminées, légumineuses, 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.

4.1 Les crucifères

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 limitant le développement du nématode à kystes (ITB, 2003 ; Justes et al., 2012). 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. En conditions de sol fertiles, en particulier une disponibilité suffisante en azote et en eau, ces espèces conduisent à la production rapide d'une végétation fournie (Tribouillois et al., 2016a, 2016b). La transformation de glucosinolates contenus dans leurs tissus en isothiocyanates dans le sol est valorisée comme principe actif régulateur de certains ravageurs, maladies et plantes (Reau et al., 2005a, 2005b). Leur système racinaire pivotant est également considéré comme intéressant d'une part pour capter rapidement les ressources et d'autre part pour produire un effet positif sur la structure du sol. Ce caractère est notamment valorisé par la sélection et la culture de nouvelles variétés de radis chinois dont le pouvoir pénétrant et en partie 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.

4.2 Les graminées ou poacées

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 exotiques, le sorgho et le moha conviennent pour les climats secs et germent mieux en été chaud et sec que les autres espèces (Tribouillois et al., 2016b).

4.3 Les légumineuses

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 (Tribouillois et al., 2015, 2016). 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).

4.4 Les autres familles utilisées

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 hauteur de ses plantes qui structure la végétation. 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 cultures intermédiaires courtes avant une céréale d'automne. Le lin, unique espèce de la famille des linacées, montre une facilité de conduite valorisée en mélange principalement.

5. Associer différentes espèces pour produire plus efficacement et simultanément différents services écosystémiques

5.1 Produire des bouquets de services écosystémiques avec les CIMS

Les crucifères et graminées semées en mélange permettent de produire simultanément des effets CIPAN et « engrais verts » efficaces. Ces mélanges permettent de réduire efficacement les pertes d'azote par la lixiviation des ions nitrate, et après leur incorporation dans le sol, enrichir le système en azote par un effet d'« engrais vert », correspondant à la fourniture d'azote minéral à la culture de vente suivante (ex: Thorup-Kristensen et al., 2003 ; Justes et al., 2012 ; Tribouillois et al., 2015). En particulier, même si toutes les espèces peuvent produire des services écosystémiques liés à la gestion de l'azote, les espèces de légumineuses sont plus efficaces que les autres espèces pour fournir un effet d'« engrais vert » en raison de leur capacité à acquérir l'azote atmosphérique par la fixation symbiotique (Tribouillois et al., 2016). En effet, du fait de cette propriété, les légumineuses sont capables d'acquérir une grande quantité d'azote avec un faible rapport C/N favorisant ainsi une minéralisation rapide de cet azote après leur destruction (ex: Justes et al., 2009 ; Tonitto et al., 2006). Au contraire, les espèces autres que les légumineuses et notamment les crucifères sont globalement plus efficaces pour capter ou piéger l'azote minéral résiduel du sol – effet « piège à nitrate » – et ainsi réduire la lixiviation potentielle du nitrate et donc la pollution des aquifères (Thomsen et Hansen, 2014). Une façon potentiellement intéressante de combiner simultanément ces deux services écosystémiques de « piège à nitrate » et « engrais vert » est de semer des mélanges d'espèces comprenant des légumineuses et des non-légumineuses (Kramberger et al., 2013 ; Summers et al., 2014 ; Tosti et al., 2012 ; Tribouillois et al., 2016).

Afin de maximiser les services écosystémiques rendus par les mélanges d'espèces, il est nécessaire que les différentes espèces associées puissent se développer de manière suffisante et en complémentarité (Kramberger et al., 2013).

5.2 Les synergies ou antagonismes entre services écosystémiques : exemples pour illustrer la problématique à analyser

Plusieurs services écosystémiques peuvent être remplis de façon concomitante par une CIMS, avec plus ou moins d'efficacité selon l'espèce et l'itinéraire technique (Justes et al., 2012). Dans certains cas toutefois, des interactions entre services écosystémiques peuvent se produire, ce qui nécessite de réfléchir à la façon de rechercher le compromis via le choix des espèces et le mode de conduite des couverts de CIMS. **Un arbitrage entre services recherchés est alors nécessaire en fonction des priorités locales et des objectifs de l'agriculteur.** Par exemple, sur les terrains en pente, un arbitrage

peut être nécessaire entre, d'une part, les effets « piège à nitrate » et surtout « anti-érosion » qui peut conduire à privilégier une destruction de la CIMS après l'hiver, et, d'autre part, un objectif de recharge en eau des nappes souterraines (que la CIMS peut cependant aussi favoriser en réduisant le ruissellement au profit de l'infiltration de l'eau). De même, les faux-semis pour limiter les infestations d'adventices « non vivaces » s'avèrent compatibles avec une CIMS à condition d'en décaler le semis de 2 ou 3 semaines pour réaliser au préalable un travail du sol. Avec une levée fin août, voire mi-septembre (dans le Sud), la CIMS conserve une efficacité (certes sub-maximale) pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage. Une destruction à l'automne du couvert de CIMS élimine aussi, avant qu'elles ne grainent, les adventices ayant germées plus tard. Ces exemples illustrent la nécessité d'adapter le mode de gestion des CIMS en fonction des services visés.

6. Conclusion et perspectives

6.1 Parler dorénavant de CIMS plutôt que de CIPAN

Les cultures intermédiaires peuvent produire plusieurs services écosystémiques utiles pour la société et l'agriculteur, dont le niveau de services rendus varie selon le choix des espèces semées et leur mode de gestion (ex. : date et mode de semis et de destruction). Cet ensemble de services écosystémiques dépasse le rôle bien connu de culture intermédiaire « pièges à nitrate » (CIPAN) ; les CIPAN étant spécifiquement implantées pour réduire les fuites de nitrate vers les aquifères et maîtriser la pollution nitrique (notamment en zone vulnérable « nitrate »). Les CIMS sont efficaces pour produire un effet CIPAN, y compris lorsqu'une fertilisation bien raisonnée de la culture précédente laisse peu de nitrate, puisque la minéralisation des matières organiques du sol produit en continu de l'azote, dont le nitrate qui peut alors être lixivié (Justes et al., 2012).

Les cultures intermédiaires, en plus de l'effet CIPAN, peuvent permettre la réduction de l'érosion par la couverture du sol, l'amélioration de l'état physique du sol, le stockage du carbone et d'azote organique dans le sol (grâce au supplément de photosynthèse produite sur l'année culturale), le recyclage de l'azote et d'autres éléments minéraux (P, K, S, ...) ou des effets biocides (Thorup-Kristensen et al., 2003). **Aussi, il nous semble dorénavant plus opportun de parler de CIMS** ; de plus la signification usuelle de CIPAN est généralement associée à l'application de la Directive Nitrates Européenne (qui traduite dans le droit français a conduit à 5 plans d'actions « nitrate » successifs) et revêt donc une connotation contraignante par les agriculteurs. Par ailleurs, parler de couverts ou couverts végétaux semble aussi trop restrictif, ce qui nous fait proposer d'utiliser dorénavant le vocable CIMS pour les cultures intermédiaires qui produisent divers services au-delà de l'effet CIPAN.

6.2 La performance des CIMS dépend des espèces et de leur itinéraire technique

La performance des mélanges d'espèces de CIMS dépend de la complémentarité entre les espèces notamment vis-à-vis de la capture des ressources du milieu. Toutefois, lorsque les complémentarités sont optimisées, les mélanges d'espèces associant légumineuses et non-légumineuses peuvent permettre d'atteindre des performances à la fois de piégeage du nitrate et « engrais vert » pour les CIMS proche de celles produites par la moyenne des cultures monospécifiques correspondantes (Tribouillois et al., 2015).

Les facteurs influençant la performance des mélanges de CIMS sont nombreux. Parmi eux, le choix des densités de semis et le nombre d'espèces à associer sont probablement des facteurs essentiels dont l'étude doit être approfondie. Enfin, les effets des mélanges de CIMS restent à étudier pour bon nombre de services ce qui ouvre un vaste champ de recherche à approfondir. Cela montre notamment les limites de l'expérimentation classique et laisse entrevoir les possibilités offertes par les modèles de cultures pour explorer cette riche diversité de pratiques et de services (Justes et al., 2012).

Les itinéraires techniques des CIMS doivent être adaptés aux conditions pédoclimatiques locales et au système de culture pour produire, avec un bon niveau d'expression, simultanément divers services écosystémiques, comme par exemple conjointement maximiser l'efficacité « piège à nitrate » et l'effet « engrais vert » et conjointement minimiser les éventuels dis-services sur la culture principale suivante pour sa nutrition hydrique. Afin que le compromis entre services écosystémiques permettant de répondre aux objectifs des CIMS, il faut réaliser un travail de conception d'itinéraire technique des CIMS, au même titre que pour les cultures de vente. Ce travail de conception et l'optimisation de la gestion des CIMS doit aussi intégrer les autres services écosystémiques, non visés prioritairement, et surtout les potentiels « dis-services » qu'elles sont susceptibles de rendre. Cette analyse ne pourra se faire efficacement que si la conception est pensée en fonction des enjeux locaux (lutte contre l'érosion, stockage de carbone ou « remontée » du taux de matière organique du sol, amélioration de certaines propriétés chimiques et biologiques, des propriétés d'infiltration de l'eau en surface, etc.) du système de production (ou du système de culture) et des conditions pédoclimatiques.

6.3 Les CIMS, un des piliers de l'Agroécologie en France

Globalement, l'impact d'une généralisation des CIMS à l'échelle d'un territoire donné dépendra des assolements que les agriculteurs mettront en œuvre et des enjeux locaux. Toutefois, il est généralement admis que les CIMS sont nécessaires en interculture longue pour réduire les fuites de nitrate (effet CIPAN). Mais il faut aussi souligner, sans sous-estimer leur efficacité, que les CIMS sont utiles dans certaines successions culturales en interculture plus courte pour produire un effet CIPAN, notamment après une légumineuse à graines afin de valoriser au mieux l'azote minéral résiduel (Plaza-Bonilla et al., 2015). **Le mélange d'espèces de légumineuses et de non-légumineuses apparaît une voie prometteuse pour concilier différents services** (Tribouillois et al., 2016), et c'est certainement celle qu'il convient de promouvoir dorénavant en France pour amplifier les services produits et éviter les dis-services.

Enfin, **les CIMS peuvent être un levier puissant et efficace d'une écologisation des systèmes de culture, d'autant plus qu'elles n'induisent que de faibles modifications agronomiques, sans nécessairement avoir besoin de transformer le système en agriculture de conservation des sols**, et peuvent conduire également à une forte économie d'énergie et de réduction des gaz à effet serre à l'échelle globale, via une réduction des pertes d'azote nitrique et d'oxyde nitreux, notamment par un recyclage efficace de l'azote dans le système sol-plante à l'échelle du système de culture (Justes et al., 2012).

Références bibliographiques

- Beaudoin N., Saad J.K., Van Laethem C., Machet, J., Maucorps J., Mary B., 2005. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 111, 292–310. doi:10.1016/j.agee.2005.06.006.
- Besnard A., Duval R., Hopquin B., Lieven J., Morin P., Sträbler M., 2011. Un choix d'espèces de plus en plus large. *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.
- Constantin J., Beaudoin N., Launay M., Duval J., Mary B., 2012. Long-term nitrogen dynamics in various catch crop scenarios : Test and simulations with STICS model in a temperate climate. *Agric. Ecosyst. Environ.* 147, 36–46. doi:10.1016/j.agee.2011.06.006

- Constantin J., Beaudoin N., Laurent F., Cohan J., Duyme F., Mary B., 2011. Cumulative effects of catch crops on nitrogen uptake, leaching and net mineralization. *Plant Soil* 341, 137–154. doi:10.1007/s11104-010-0630-9
- Dam N.M., Tytgat T.O.G., Kirkegaard J., 2009. Root and shoot glucosinolates: a comparison of their diversity, function and interactions in natural and managed ecosystems. *Phytochem Rev* 8, 171–186.
- Eriksen J., Thorup-Kristensen K., 2002. The effect of catch crops on sulphate leaching and availability of S in the succeeding crop on sandy loam soil in Denmark. *Agric Ecosyst Environ* 90, 247–254.
- Haramoto E.R., Gallandt E.R., 2005. Brassica cover cropping: I. Effects on weed and crop establishment. *Weed Sci* 53, 695–701.
- ITB, 2003. Implantation de couverts végétaux en interculture. Cahier technique. Institut Technique Français de la Betterave Industrielle, Paris, pp. 1-14.
- Justes É., 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.
- Justes E., Mary B., Nicolardot B., Justes É., Mary B., Nicolardot B., 2009. Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant Soil* 325, 171–185. doi:10.1007/s11104-009-9966-4
- Kramberger B., Gselman A., Kristl J., et al., 2014. Winter cover crop: the effects of grass–clover mixture proportion and biomass management on maize and the apparent residual N in the soil. *Eur J Agron* 55, 63–71.
- Kramberger B., Gselman A., Janzekovic M., et al., 2009. Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize. *Eur J Agron* 31, 103–109.
- Kristensen H.L., Thorup-Kristensen K., 2004. Root Growth and Nitrate Uptake of Three Different Catch Crops in Deep Soil Layers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 529–537.
- Kuo S., Sainju U.M., 1998. Nitrogen mineralization and availability of mixed leguminous and non-leguminous cover crop residues in soil. *Biol Fertil Soils* 26, 346–353.
- 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., Maillat-Mezeray J., 2007. De nombreuses espèces à semer. Cultures intermédiaires : enjeux et mise en œuvre. Arvalis - Institut du végétal, Paris, pp. 4-9.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC. ISBN 1-59726-040-1
- Meisinger J.J.J., Hargrove W.L., Mikkelsen R.L., et al., 1991. Effects of cover crops on groundwater quality. In: Hargrove eds. WL (ed) Cover Crop. clean water. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA: SWCS, pp 57–68
- Minette S., 2010. Caractéristiques des principales cultures intermédiaires. Chambre d'Agriculture Poitou-Charentes, Lusignan.
- Plaza-Bonilla D., Nolot J.-M., Raffaillac D., Justes E., 2015. Cover crops mitigate nitrate leaching in cropping systems including grain legumes: field evidence and model simulations. *Agriculture, Ecosystem and Environment*. 212, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.014>
- 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., 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.

- Thomsen I.K., Hansen E.M., 2014. Cover crop growth and impact on N leaching as affected by pre- and postharvest sowing and time of incorporation. *Soil Use Manag* 30, 48–57.
- Thorup-Kristensen K., 2001. Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured? *Plant Soil* 230, 185–195.
- Thorup-Kristensen K., Magrid J., Jensen L.S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Adv. Agron.* 79, 227–301.
- Tonitto C., David M.B., Drinkwater L.E., 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 58–72. doi:10.1016/j.agee.2005.07.003
- Tosti G., Benincasa P., Farneselli M., et al., 2014. Barley–hairy vetch mixture as cover crop for green manuring and the mitigation of N leaching risk. *Eur J Agron* 54, 34–39.
- Tribouillois H., Cruz P., Cohan J-P., Justes É., 2015. Modelling agroecosystem nitrogen functions provided by cover crop species in bispecific mixtures using functional traits and environmental factors. *Agric Ecosyst Environ* 207, 218–228.
- Tribouillois H., Cohan J.P., Justes E., 2016a. Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modelling. *Plant Soil* 401, 347–364.
- Tribouillois H., Dürr C., Demilly D., Wagner M.-H., Justes E., 2016b. Determination of germination response to temperature and water potential for a wide range of cover crop species and related functional groups. *Plos One*. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0161185>

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL).