

Choisir et gérer des légumineuses gélives associées au colza d'hiver pour le contrôle des adventices et la fourniture d'azote

Lorin M.¹, Butier A.¹, Jeuffroy M-H.¹, Valantin-Morison M.¹

¹ UMR 211 Agronomie, INRA AgroParisTech, Université Paris-Saclay, F-78850 Thiverval-Grignon

Correspondance : m.lorin@groupe-esa.com

Résumé

L'introduction, dans une culture de colza d'hiver, de légumineuses gélives en tant que plantes de service pourrait constituer une voie d'amélioration des performances de la culture *via* la fourniture de deux services écosystémiques : la régulation des adventices et la fourniture d'azote (N) au colza au printemps. Issus d'un dispositif expérimental analytique, nos résultats montrent que des traits fonctionnels simples traduisant la compétitivité des légumineuses vis-à-vis de l'interception du rayonnement durant l'automne, ainsi que des traits caractérisant les propriétés physico-chimiques des mulchs permettent de comprendre les performances obtenues pour chaque espèce et chaque service. La construction de profils fonctionnels des plantes de service candidates permet *in fine* de classer les espèces suivant leur potentiel pour fournir l'un ou l'autre des services visés et d'aider à la construction de mélanges d'espèces permettant d'aboutir à des bouquets de service écosystémiques.

Mots-clés : Plante de service, Trait fonctionnel, Service écosystémique, Profil fonctionnel

Abstract: Undersowing winter oilseed rape with frost-sensitive legume living mulches to improve weed control and provide biological nitrogen supply

The introduction of frost-sensitive legume living mulches potentially improves the crop performances by providing two ecosystem services: weed regulation and biological nitrogen supply to the cash crop during spring. From a two-years experimental assessment, our results showed that simple functional traits, related to the legume radiation interception ability during the autumn and some mulch physico-chemical traits, led to a better understanding of the legume performances and the mechanisms involved. The construction of legume living mulch functional profiles finally allowed to rank species according to their potential to provide the two ecosystem services expected and helped the construction of legume living mulch mixtures to achieve trade-off between services

Keywords : Living mulch, Functional trait, Ecosystem service, Functional profile

Introduction

Au cours des dernières décennies, la simplification des systèmes de culture a conduit à une augmentation de la consommation d'intrants de synthèse, induisant d'importants dommages environnementaux (Tilman *et al.*, 2001 ; Steffen *et al.*, 2015). Le colza d'hiver est une culture emblématique de cette tendance, du fait d'une consommation d'intrants chimiques particulièrement élevée sur cette culture (AGRESTE 2013 ; AGRESTE 2014), et de l'augmentation très importante des surfaces consacrées à cette culture en France (Schott *et al.*, 2010). Il est donc urgent de recourir aux

principes de l'agroécologie, basés sur la valorisation de régulations naturelles, pour conjuguer production alimentaire et renouvellement des ressources mobilisées (Wezel *et al.*, 2014 ; Bommarco *et al.*, 2013), afin d'améliorer les techniques mises en œuvre et les performances agro-environnementales de cette culture.

L'utilisation de plantes de service, implantées avant, pendant ou après le semis de la culture de vente, et non récoltées (Hartwig et Ammon, 2002), est une innovation testée depuis plusieurs années afin d'améliorer les performances du colza (Cadoux *et al.*, 2015 ; Valantin-Morison *et al.*, 2014; Lorin *et al.*, 2015). Choies parmi les légumineuses gélives, ces plantes de service sont supposées permettre de procurer plusieurs services écosystémiques. Parmi eux, on peut citer le service de régulation, grâce à l'accroissement de la compétitivité du couvert associé vis-à-vis des adventices au cours de l'automne, et le service intrant de ressources, *via* la fourniture d'azote d'origine biologique au colza après la destruction naturelle des légumineuses (Lavorel et Sarthou, 2008 ; Zhang *et al.*, 2007). Ces bénéfices ont régulièrement été obtenus (Cadoux *et al.*, 2015 ; Lorin *et al.*, 2015 ; Valantin-Morison *et al.*, 2014). Cependant, le choix de l'espèce ou du mélange d'espèces à associer est délicat, du fait de la difficulté de considérer simultanément plusieurs services écosystémiques et d'appréhender la variabilité des performances obtenues dans une diversité de conditions de milieu.

La notion de trait fonctionnel, largement utilisé en écologie (Garnier et Navas, 2012 ; de Bello *et al.*, 2010), définie comme une caractéristique morphologique, physiologique ou phénologique qui impacte la performance d'une espèce, (Violle *et al.*, 2007), pourrait être utile en agronomie pour aider à sélectionner des plantes de service candidates à l'atteinte de services visés. En effet, l'un des avantages liés à l'utilisation de ces traits réside dans le fait qu'ils sont définis indépendamment du milieu dans lequel ils sont mesurés et que le classement des espèces, pour un trait donné, ne varie que très peu d'un milieu à un autre (Lavorel *et al.*, 2007 ; Violle *et al.*, 2007). Une fois identifiés les traits fonctionnels déterminants des fonctions permettant de remplir ces services, la recherche d'une diversité de services peut être gérée via la caractérisation des profils fonctionnels (Damour *et al.*, 2014) des espèces candidates, afin de faciliter le choix de l'espèce la plus appropriée pour fournir les compromis entre chacun des services et/ou dis-services potentiels. L'utilisation de ces profils fonctionnels pourrait également faciliter la construction de mélanges de légumineuses, plus à même de remplir simultanément plusieurs fonctions déterminantes des différents services écosystémiques visés (Tribouillois *et al.*, 2015 ; Storkey *et al.*, 2015 ; Damour *et al.*, 2014). En effet, le choix d'une espèce relève d'un compromis à trouver entre chacun des services et/ou dis-services potentiellement rendus (Tixier *et al.*, 2011 ; den Hollander *et al.*, 2007), une espèce n'étant bien souvent pas capable de remplir toutes les fonctions nécessaires pour un usage donné (Damour *et al.*, 2014).

Le premier objectif de cet article est de faire le point sur les fonctions et mécanismes impliqués dans l'obtention de deux services écosystémiques fournis par une gamme de légumineuses associées, la régulation des adventices en automne et la fourniture d'azote au colza au cours du printemps, ainsi que sur les traits fonctionnels impliqués dans leur obtention. Le second objectif est de construire les profils fonctionnels des légumineuses candidates, de discuter du potentiel de chacune des espèces pour remplir les deux services étudiés et des compromis à trouver pour les obtenir. Pour cela, nous nous appuyons sur les résultats d'un essai analytique conduit au cours de deux campagnes culturales sur le domaine expérimental INRA de Grignon.

1. Expliciter les relations entre traits, fonctions et services

1.1 Régulation des adventices au cours de l'automne

1.1.1 Quels mécanismes de compétition entre espèces au cours de l'automne?

Plusieurs essais, comparant des associations colza-légumineuses à un témoin colza seul, ont permis de montrer une amélioration de la régulation des adventices, mesurée en termes de couverture du sol,

d'abondance ou de biomasse aérienne de ces espèces (Cadoux *et al.*, 2015 ; Valantin-Morison *et al.*, 2014). Sur notre dispositif (cf. encadré ci-dessous), nous avons ainsi mis en évidence une réduction de l'abondance des adventices, mesurée en entrée d'hiver, pouvant atteindre 80% par rapport au témoin colza seul (Figure 1).

Dispositif analytique de Grignon

Deux facteurs étudiés sur ce dispositif

- Sept espèces de légumineuses et trois mélanges de légumineuses associés au colza et comparés à un témoin colza seul.

Fénu grec (cv. Fenusol) Féverole (cv. Espresso) Gesse (Fertigess) Lentille (cv. Fentille) Pois fourrager (cv. Rif)



Vesce commune (cv. Marianna)



+ 3 mélanges d'espèces
Lentille/gesse/fénu grec
Vesce/féverole/trèfle A
Lentille/féverole

75% de la densité de semis recommandée en pur pour les légumineuses

Colza (cv. Alpaga) semé à densité inchangée par rapport au témoin

Trèfle d'Alexandrie (Tigri)



- 2 niveaux de disponibilité initiale en azote

Faible disponibilité initiale en N

Forte disponibilité initiale en N (+ 100kgN.ha⁻¹ ajoutés au semis)

Un même dispositif, reconduit au cours de deux campagnes culturales, dupliqué en deux parties, permettant chacune d'étudier les deux services écosystémiques

- **Une partie « adventices »** sur laquelle un cocktail de huit espèces d'adventices, choisies parmi celles qui posent particulièrement problème pour le colza, a été semé (aucun herbicide n'a été appliqué). Plusieurs prélèvements ont été réalisés au cours de l'automne afin de (i) mesurer les niveaux d'infestation en adventices (ii) comprendre les performances dynamiques des différentes espèces (en termes de biomasse aérienne, de surface foliaire, d'interception du rayonnement) et (iii) mesurer des traits fonctionnels des légumineuses explicatifs des performances obtenues.
- **Une partie « azote »** (désherbée) sur laquelle des bilans azotés ont été effectués en entrée et sortie d'hiver ainsi qu'à la fin de la floraison du colza, nous permettant de suivre les flux d'azote dans les différents compartiments. En utilisant une fertilisation azotée marquée au ¹⁵N au printemps nous avons également pu déterminer, la part de l'azote absorbé par le colza à la fin de la floraison issue de la fertilisation, de celle issue de la minéralisation de l'azote contenu dans les résidus de légumineuses ainsi que dans la matière organique du sol.

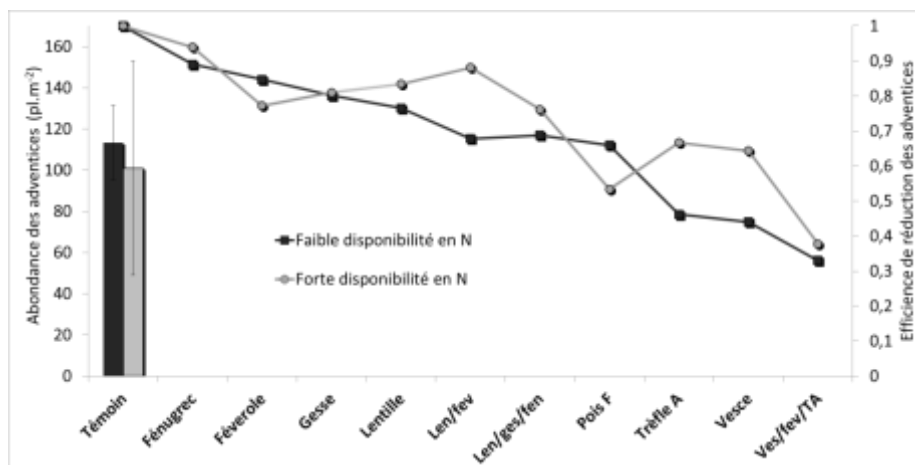


Figure 1 : Efficacité de réduction de l'abondance des adventives pour les modalités associées par rapport au témoin colza seul suivant le niveau de disponibilité initiale en azote. L'abondance moyenne des adventives mesurée sur le témoin est représentée sous forme d'histogramme. Chaque point correspond à la moyenne des valeurs obtenues pour les deux années étudiées.

Comme pour Cadoux *et al.* (2015), quelles que soient les conditions de milieu, on observe une corrélation entre la biomasse aérienne (ou la surface foliaire) totale du couvert colza+légumineuses et l'efficacité de régulation des adventives (en termes de biomasse aérienne ou d'abondance), ainsi qu'entre la proportion de légumineuses dans le couvert et la réduction de l'abondance des adventives. Les espèces de légumineuses les plus productives permettent de maximiser la croissance du couvert associé, et sont ainsi les plus à même de réguler efficacement les adventives.

Du fait du laps de temps très court durant lequel la compétition s'exerce (entre la levée, début septembre et l'entrée de l'hiver), nous avons analysé la capacité des performances dynamiques du colza et des légumineuses à rendre compte des mécanismes de compétition qui s'exercent (Poorter et Garnier, 2007 ; Tribouillois *et al.*, 2015). Nous avons en particulier distingué la phase d'établissement du couvert (comprise entre la levée et le stade B4 du colza), de la phase de consolidation (comprise entre B4 et l'entrée de l'hiver), en faisant l'hypothèse que la compétition qui s'exerce durant la phase d'établissement détermine les rapports de dominance entre espèces pendant la phase suivante (Fayaud *et al.*, 2014). Nos résultats montrent que les vitesses d'accroissement de la biomasse aérienne et/ou de la surface foliaire du couvert dans son ensemble (et en particulier celles des légumineuses), au cours de la phase de consolidation, sont particulièrement explicatives du service de régulation des adventives (Figure 2).

Les légumineuses qui présentent les vitesses de croissance les plus élevées au cours de la phase de consolidation sont donc celles qui permettent de maximiser la biomasse et la compétitivité du couvert, et *in fine* de réguler le plus efficacement les adventives. En revanche, contrairement à notre hypothèse initiale, les vitesses de croissance des légumineuses durant la phase d'établissement du couvert sont peu explicatives du service de régulation, à l'exception des situations où la disponibilité initiale en azote est élevée. Dans ces situations, la vitesse de croissance du colza étant très forte, seules les légumineuses capables d'accumuler rapidement une biomasse aérienne et une surface foliaire importantes présentent un intérêt pour accroître la compétitivité du couvert vis-à-vis des adventives.

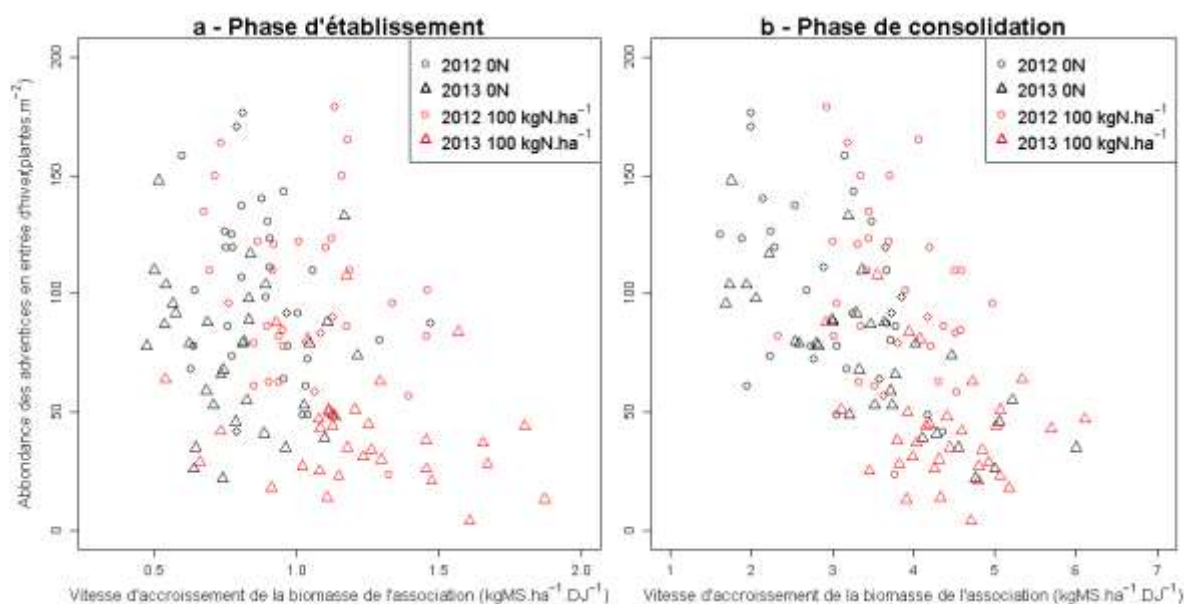


Figure 2 : Relation entre l'abondance des adventices (mesurée en entrée d'hiver) et la vitesse d'accroissement de la biomasse aérienne de l'association colza + légumineuses durant les phases d'établissement (Figure a) et de consolidation (Figure b).

1.1.2 Quels traits fonctionnels explicatifs des performances des légumineuses ?

Nous avons ensuite cherché à identifier les traits fonctionnels explicatifs de la variabilité des vitesses de croissance des légumineuses.

Nous avons ainsi mesuré, pour toutes les espèces et pour les deux niveaux de disponibilité initiale en azote, quatre traits fonctionnels couramment utilisés en écologie fonctionnelle pour caractériser la compétitivité des espèces: la surface foliaire spécifique (SLA, specific leaf area, correspondant au rapport entre la surface et la biomasse des feuilles), le taux de matière sèche des feuilles (LDMC, leaf dry matter content), la surface foliaire unitaire (LA, leaf area, correspondant à la surface foliaire d'une feuille) et la masse des graines (au semis). Nous avons également mesuré deux autres traits potentiellement explicatifs, spécifiques des deux périodes de croissance considérées: le ratio de biomasse tige/feuille et la vitesse d'accroissement en hauteur.

Nos résultats montrent que deux traits sont particulièrement explicatifs des vitesses de croissance en biomasse aérienne et en surface foliaire des légumineuses: la surface foliaire unitaire (LA) et la vitesse de croissance en hauteur (durant les phases d'établissement et de consolidation). Cela indique que la capacité d'interception du rayonnement est déterminante pour expliquer les performances des légumineuses: les espèces à feuilles larges, capables de croître rapidement en hauteur sont celles qui accumulent le plus rapidement une biomasse aérienne et une surface foliaire élevée et qui sont susceptibles de se montrer les plus compétitives vis-à-vis des adventices, mais aussi du colza. Cependant, comme dans d'autres études analogues (Tribouillois *et al.*, 2015), ces traits fonctionnels ne permettent d'expliquer que 50% environ de la variabilité des performances obtenues par les légumineuses. La prise en compte d'autres mécanismes de compétition/facilitation au sein de ces peuplements complexes, notamment ceux intervenant au niveau du compartiment racinaire (Hauggaard-Nielsen et Jensen 2005 ; Jamont *et al.*, 2013), et des traits des légumineuses impliqués dans ces mécanismes, pourraient probablement améliorer notre compréhension de cette variabilité.

1.2 Effets des légumineuses sur la nutrition azotée du colza au printemps

1.2.1 Bonus azoté mesuré à la fin de la floraison

En effectuant un bilan azoté à la fin de la floraison du colza (correspondant au pic d'absorption d'N par la culture), nous avons pu quantifier le bonus azoté permis par la présence des légumineuses à l'automne, défini comme la différence entre la quantité d'azote contenue dans les colzas associés et celle contenue dans le témoin colza seul. Pour la plupart des modalités étudiées, les colzas associés ont absorbé en moyenne entre 20 et 40 kgN.ha⁻¹ de plus que le témoin colza seul à la fin de la floraison (figure 3), bien que les quantités d'azote contenu dans les légumineuses soient très différentes et bien supérieures en 2013-2014 (en moyenne 55 kgN.ha⁻¹ en 2013-2014 contre 12 kgN.ha⁻¹ en 2012-2013, principalement expliquées par un automne et un hiver plus doux).

L'effet bénéfique des légumineuses sur le bonus azoté au printemps peut avoir plusieurs origines, résultant de différents effets de facilitation ayant lieu durant la période de croissance simultanée ou bien après la destruction des légumineuses : « effets mulch » sur la régulation de la température et de l'humidité à la surface du sol, effet priming sur la minéralisation de la matière organique du sol au printemps, effet des légumineuses en automne sur l'architecture racinaire du colza, etc. En utilisant une fertilisation marquée au ¹⁵N au printemps, et en effectuant le bilan du ¹⁵N recouvré dans les plantes de colza à la fin de la floraison, nous avons pu identifier quelle part de ce bonus provenait (i) de la minéralisation de l'N contenu dans les résidus de légumineuses et de la matière organique (MO) du sol, et (ii) de la fertilisation azotée apportée au printemps.

La majeure partie du bonus azoté provient de la minéralisation des résidus de légumineuses et de la MO du sol (Figure 3), en particulier en 2012-2013. La date de destruction, précoce en 2012-2013 (mi-décembre), très tardive en 2013-2014 (application d'herbicide début-mars, suite à l'absence de gel hivernal), a probablement permis de favoriser une minéralisation rapide de l'N contenu dans les résidus de légumineuses et donc une mise à disposition rapide de cet azote pour le colza.

Les résultats montrent également qu'une part de ce bonus azoté provient de l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote issu de la fertilisation apportée au printemps, plus marquée en 2013-2014 (+13 points d'amélioration du coefficient réel d'utilisation de l'N pour les colzas associés par rapport au colza seul en moyenne) qu'en 2012-2013 (+5 points seulement en moyenne).

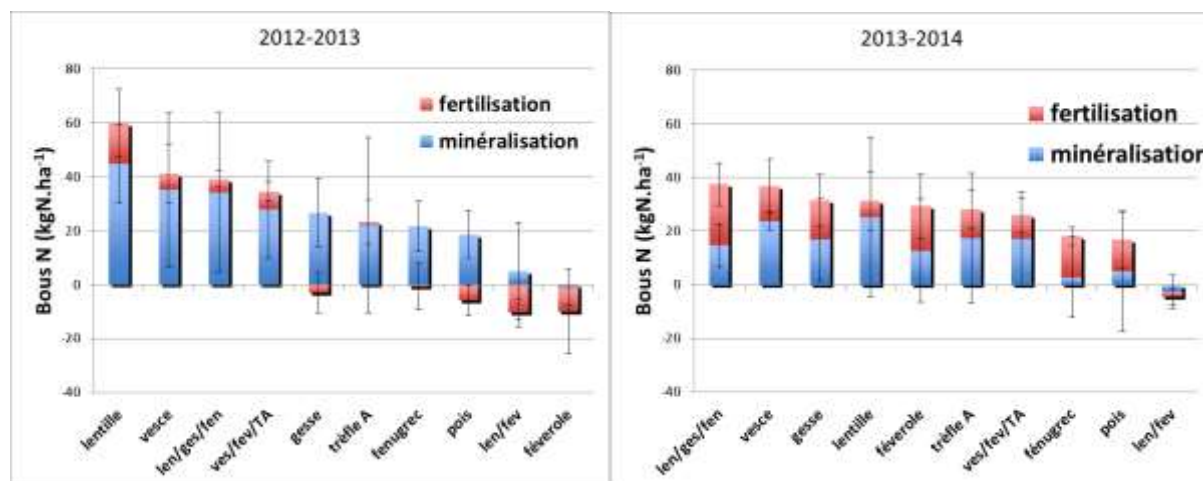


Figure 3: Modification de la quantité d'azote contenu dans la biomasse aérienne du colza à la fin de la floraison, pour les deux années d'expérimentation et pour la modalité « faible disponibilité initiale en azote », issu (i) de la minéralisation de l'N contenu dans les résidus de légumineuses et dans la matière organique du sol et (ii) de la fertilisation apportée au printemps (les données correspondent à la différence entre les colzas associés et le témoin colza seul).

1.2.2 Caractéristiques physico-chimiques des légumineuses, impliquées dans la minéralisation de l'N contenu dans les résidus de légumineuses

Du fait de l'absence de corrélation entre le contenu en N des légumineuses et le bonus azoté issu de la minéralisation de leurs résidus (Cadoux *et al.*, 2015 ; Lorin *et al.*, 2016), et du fait des différences importantes entre espèces pour une année donnée (par exemple entre les modalités lentille, vesce et gesse d'une part, et les modalités féverole et lentille/féverole d'autre part figure 3), nous avons émis l'hypothèse que les caractéristiques physico-chimiques des mulchs de légumineuses expliquent probablement une part importante de cette variabilité.

Nous avons donc mesuré cinq caractéristiques physico-chimiques des mulchs, reconnues dans la bibliographie comme étant explicatives de leur vitesse de minéralisation: le pourcentage de la biomasse aérienne du mulch initialement en contact avec le sol (en considérant que seul l'N contenu dans cette fraction est directement et rapidement accessible aux micro-organismes du sol ; en effet, certaines espèces restent très dressées même après leur arrêt de croissance, Figure 4), le rapport N/C des résidus aériens, le pourcentage de fraction soluble (compartiment le plus labile), la capacité maximale de rétention en eau des résidus, et la biomasse aérienne du mulch. Nous avons ensuite classé les six espèces (les mesures n'ont pas pu être effectuées sur le fenugrec), d'un point de vue qualitatif, sur une échelle de 0 à 10 (la note de 10 correspond à l'espèce présentant la caractéristique la plus favorable à une minéralisation rapide de l'N) sous forme de radars (Figure 5).

Les espèces les plus intéressantes sur le plan physico-chimique (% de biomasse en contact, ratio N/C, fraction soluble), comme la gesse, la lentille et la vesce, ne sont pas celles qui présentent les biomasses aériennes les plus importantes avant leur destruction (Figure 5). Ce résultat est cohérent avec les résultats suggérés par l'étude des bonus azotés. A l'inverse, d'autres espèces, malgré des biomasses aériennes importantes (féverole et pois notamment) possèdent des caractéristiques physico-chimiques peu favorables à une minéralisation rapide de l'N contenu dans les résidus, notamment avec des qualités chimiques et des pourcentages faibles de biomasse en contact avec le sol. D'un point de vue qualitatif, la comparaison de ces profils avec les bonus azotés issus de la minéralisation suggère donc que la prise en compte de ces caractéristiques physico-chimiques est déterminante pour comprendre les restitutions azotées potentielles.



Figure 4 : Etat des mulchs de féverole (à gauche) et de vesce (à droite) à la fin de la floraison du colza (juin 2014). Les résidus de féveroles sont encore dressés, le contact sol/mulch est faible, à l'inverse les résidus de vesce ont quasiment disparus et sont plaqués au sol.

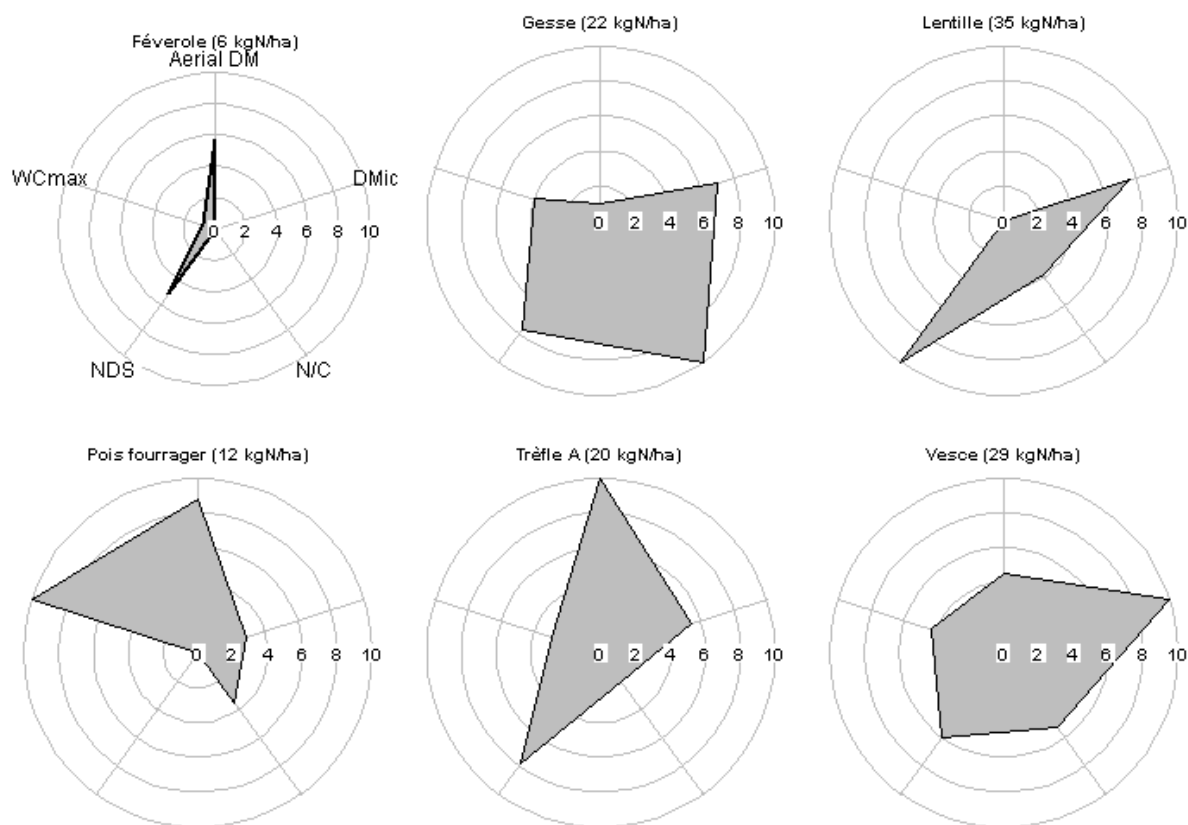


Figure 5 : Profils physico-chimiques des résidus de légumineuses construits à partir de 5 caractéristiques physico-chimiques de leurs parties aériennes. Aerial DM : biomasse totale du mulch ; DMic : biomasse de mulch initialement en contact avec le sol ; N/C : rapport azote/carbone ; NDS : fraction soluble ; WCmax : teneur maximale en eau. Chaque variable a été transformée en note comprise entre 0 et 10 en considérant les valeurs minimales et maximales pour désigner la pire (note=0) et la meilleure (note=10) performance. Les valeurs moyennes mesurées de bonus issus de la minéralisation sont rappelées entre parenthèses.

2. Etablir des profils fonctionnels des espèces candidates

Nous avons ensuite dressé les profils fonctionnels des légumineuses étudiées, adaptés aux deux services écosystémiques étudiés, afin de caractériser leur potentiel pour remplir simultanément les fonctions identifiées.

Nous avons ainsi réalisé une analyse en composantes principales, à partir de l'ensemble des traits (récapitulés dans le Tableau 1) identifiés comme étant explicatifs des fonctions nécessaires à l'obtention des services étudiés. Le cercle des corrélations obtenu (Figure 6a) montre clairement, sur l'axe 1, une opposition entre (i) les traits fonctionnels explicatifs de la compétitivité des légumineuses et de leur faculté à produire une biomasse aérienne importante durant l'automne (partie gauche du plan factoriel), c'est-à-dire la surface foliaire unitaire et les vitesses de croissance en hauteur durant les phases d'installation et de consolidation, et (ii) les traits physico-chimiques explicatifs du potentiel de minéralisation de l'azote contenu dans le mulch de légumineuses (partie droite du plan factoriel), c'est-à-dire la fraction soluble, le pourcentage de biomasse en contact, et le ratio N/C. Il y a donc une distinction claire entre, d'une part, les espèces capables de produire beaucoup de biomasse aérienne et de se montrer compétitives durant la phase de croissance simultanée, et, d'autre part, les espèces dont l'azote contenu dans le mulch est rapidement minéralisable après leur destruction (Figures 6a & 6b). Si l'on souhaite bénéficier des deux bénéfices recherchés, il paraît alors difficile de choisir une seule espèce de légumineuse.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des traits fonctionnels explicatifs des fonctions et services écosystémiques étudiés

Traits fonctionnels retenus / variables principales	Fonctions concernées	Critère d'évaluation des services / variables supplémentaires
LA - Leaf area surface foliaire unitaire HGRestab - Height growth rate establishment phase vitesse d'accroissement de la hauteur phase d'établissement HGRconcol - Height growth rate consolidation phase vitesse d'accroissement de la hauteur phase de consolidation	Vitesse d'accroissement de la biomasse aérienne et de la surface foliaire des légumineuses	Abondance des adventices
N/C - nitrogen/carbon ratio ratio azote/carbone %NDS - soluble fraction fraction soluble Aerial DMic - aerial dry matter initially in contact biomasse aérienne du mulch initialement en contact avec le sol WCmax - maximum water content teneur en eau maximale	Potentiel de minéralisation rapide du mulch	bonus azoté issu de la minéralisation

Du point de vue de la compétitivité des légumineuses en automne, le pois et la féverole se montrent ainsi beaucoup plus efficaces que la lentille par exemple : ce sont des espèces à feuilles larges, capables de croître rapidement en hauteur et d'accumuler rapidement une biomasse et une surface foliaire élevée. Ces deux espèces présentent ainsi un potentiel intéressant pour réguler les adventices ainsi que pour produire une biomasse aérienne élevée mais également, en contrepartie, un risque de se montrer compétitive vis-à-vis du colza à l'automne. La quantité d'azote absorbé par le colza en automne est ainsi significativement réduite sur la modalité pois fourrager pour une des deux années d'expérimentation (Lorin et al., 2015).

Du point de vue de la capacité à restituer l'azote contenu dans le mulch au printemps, la vesce et la gesse présentent les profils physico-chimiques les plus favorables à une minéralisation rapide de l'N contenu dans les mulchs (N/C et NDS élevés), à l'inverse de la féverole qui, malgré sa capacité à produire une biomasse aérienne importante (et à fixer et/ou capter des quantités d'N élevées), présente un profil physico-chimique défavorable à une disponibilité élevée de l'N pour le colza au printemps.

La construction de ces profils fonctionnels ne permet toutefois pas de différencier l'ensemble des espèces candidates pour chacun des services étudiés. Ainsi, en s'intéressant à la compétitivité des légumineuses en automne, il s'avère difficile de différencier la vesce et la gesse, malgré un potentiel de régulation des adventices mesuré pourtant très différent (en faveur de la vesce, Lorin et al., 2015). La prise en compte de nouveaux traits explicatifs des fonctions étudiées, ou bien de nouvelles fonctions explicatives des différents services (ex: compétition racinaire ou allélopathie pour expliquer le service de

régulation des adventices en automne), permettrait probablement d'améliorer la classification obtenue. Ces profils fonctionnels pourraient également être complétés pour prendre en compte simultanément de nouveaux services (régulation des insectes automnaux par exemple) après que les traits fonctionnels explicatifs aient été identifiés.

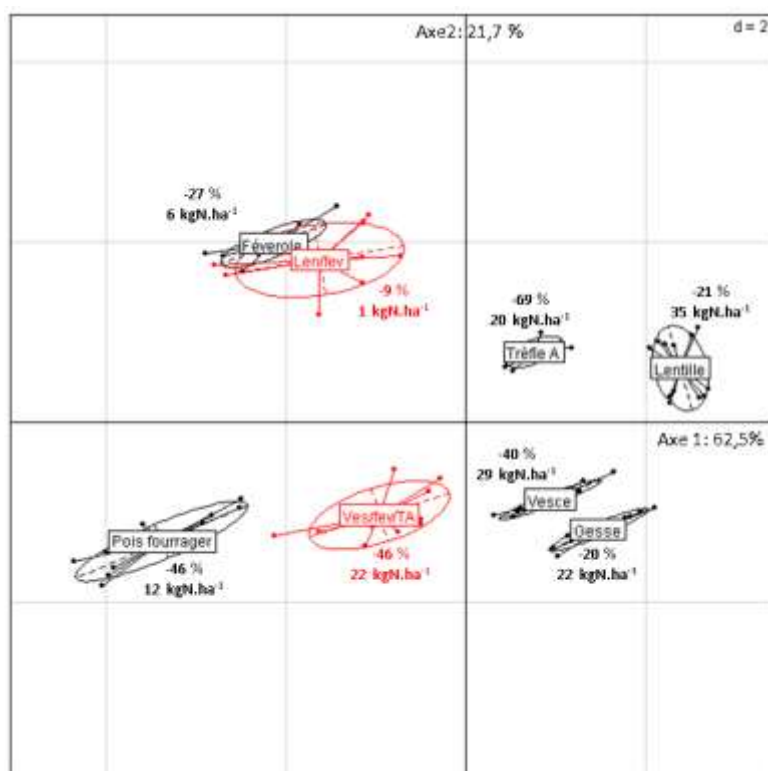
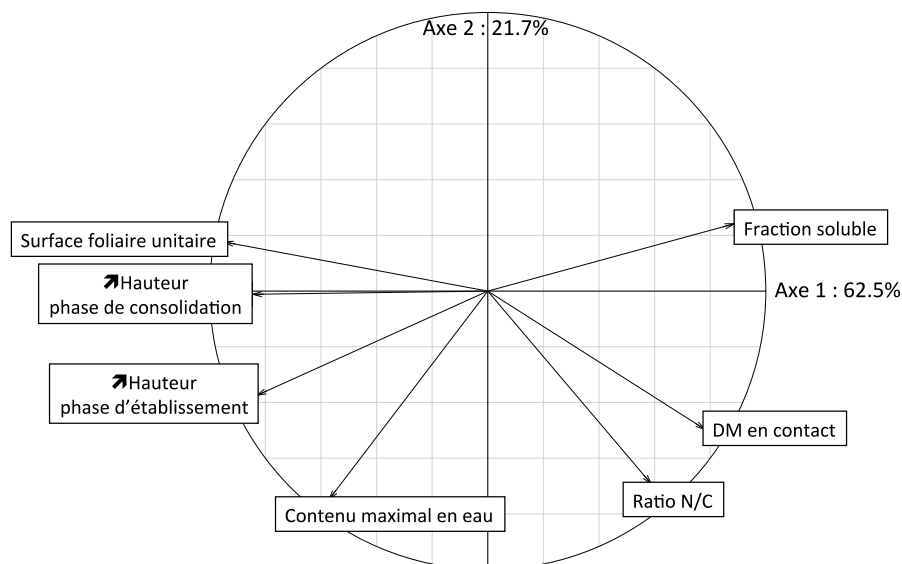


Figure 6 a et b : (a en haut) Cercle des corrélations (plan F1/F2) et profil fonctionnel des légumineuses candidates (correspondant à la projection des individus sur le même plan factoriel F1/F2). (b en bas) Les valeurs mesurées d'efficacité de réduction de l'abondance des adventices en entrée d'hiver (en % de la référence colza seul) et de bonus azoté issu de la minéralisation mesuré à la fin de la floraison du colza sont rappelés sur la figure b. Les mélanges d'espèces (en rouge sur la figure b) ont été ajoutés en tant qu'individus supplémentaires (ne participant pas à la construction de ce plan factoriel).

3. Utiliser des mélanges d'espèces : Pourquoi? Comment?

L'établissement des profils fonctionnels à partir des traits mesurés sur les espèces pures a permis de mettre en évidence l'opposition entre les traits explicatifs de la régulation des adventices et ceux explicatifs de la disponibilité de l'azote contenu dans le mulch de légumineuses. Il n'existe donc pas d'idéotype de légumineuse permettant à la fois de fortement réguler les adventices et de restituer des quantités importantes d'azote au colza après leur destruction. Le choix de l'espèce à associer devra donc être adapté au(x) service(s) visé(s). La construction de mélanges d'espèces pourrait être un moyen d'atteindre plus facilement la diversité des services visés, notamment en associant des espèces (ou des variétés sélectionnées à cette fin) dont les profils fonctionnels diffèrent fortement et qui sont "spécialisés" pour des fonctions et des services en particulier.

Dans le cadre de notre expérimentation, nous avons construit deux mélanges d'espèces, choisies du fait de caractéristiques qui paraissaient *a priori* intéressantes : lentille-féverole et vesce/féverole/trèfle d'Alexandrie. La densité de semis de chacune des espèces a été réduite au prorata du nombre total d'espèces composant le mélange. En nous basant sur la même méthode que celle décrite précédemment, nous avons construit les profils fonctionnels de ces mélanges d'espèces à partir des traits mesurés sur les espèces pures correspondantes (traits physico-chimiques notamment) ou bien directement *via* des mesures sur les espèces en mélange (vitesse d'accroissement en hauteur notamment, surface foliaire unitaire). Nous avons ensuite fait le choix d'agréger ces traits à l'échelle du mélange en pondérant les valeurs de chacune des espèces au prorata de la proportion de biomasse occupée par ladite espèce dans le mélange. Cette méthode, utilisable *a posteriori* seulement, permet ainsi de tenir compte des rapports de dominance entre espèces qui peuvent légèrement différer d'une année sur l'autre.

Les profils fonctionnels des mélanges d'espèces (Figure 6b) diffèrent de ceux auxquels on aurait pu s'attendre, notamment en considérant le barycentre des espèces pures. Dans le cas du mélange lentille/féverole, du fait de la forte dominance de la féverole sur la lentille (proportions de biomasse respectives de 84% et 16%), le profil fonctionnel du mélange s'apparente très fortement à celui de la féverole. Malgré des caractéristiques physico-chimiques intéressantes, la lentille ne suffit pas à compenser celles, défavorables, de la féverole. Il n'y a donc que peu d'intérêt à mélanger, dans une proportion de semis équivalente, la féverole et la lentille, du point de vue de ces deux fonctions étudiées.

Dans le cas du mélange vesce/féverole/trèfle d'Alexandrie, contrairement à la modalité lentille/féverole, les trois espèces composant ce mélange présentent des compétitivités importantes, conduisant à des proportions équilibrées de biomasse aérienne en entrée d'hiver. Le profil fonctionnel du mélange obtenu permet ainsi d'aboutir à un compromis intéressant entre les deux services étudiés. La comparaison de ce profil fonctionnel avec les performances obtenues pour la modalité vesce/féverole/trèfle d'Alexandrie en termes de bonus azoté issu de la minéralisation et de potentiel de régulation des adventices montre ainsi que ce mélange semble intéressant pour fournir simultanément les deux services (Figure 6b).

La construction de mélanges d'espèces ou de variétés présentant des profils fonctionnels différents peut donc constituer une opportunité intéressante pour satisfaire simultanément plusieurs services écosystémiques pourtant antagonistes; cela nécessite toutefois d'appréhender les relations de compétition et de dominance entre espèces afin de maximiser la complémentarité recherchée. Ces relations de compétition entre espèces de légumineuses conditionnent en effet fortement le profil fonctionnel du mélange. Lorsqu'on souhaite mélanger des espèces ou des variétés dont la compétitivité diffère fortement, on peut ainsi envisager, de façon opérationnelle, de moduler les densités de semis de chaque espèce en fonction de ce potentiel de compétitivité (par exemple augmenter la densité de lentille dans le mélange lentille/féverole) ou bien de modifier l'arrangement spatial de chaque espèce en fonction des services recherchés (positionnement sur le rang, dans l'inter-rang, à la volée, etc).

Ne faudrait-il pas un message (prospectif) sur le fonctionnement des compartiments racinaires ?

Aujourd'hui, à partir de ces travaux, nous cherchons par la modélisation à aider à la conception de mélanges de plantes de service à associer à des cultures de vente pour assurer une plus grande diversité de services écosystémiques : régulation des adventices, recyclage de l'azote, régulation des insectes ravageurs, voire valorisation des plantes de service (plante entière ou récolte en grain).

Remerciements

Ce travail a été financé par l'INRA (Métaprogramme SMaCH), Terres Inovia ainsi que par le CASDAR Alliance et la SAS PIVERT (www.institut-pivert.com). Nous remercions également Caussade Semences pour la fourniture des semences de légumineuses.

Références bibliographiques

- AGRESTE, 2013. Les indicateurs de fréquence de traitement (IFT) en 2011. AGRESTE Les dossiers, 18, 5-9
- AGRESTE, 2014. La fertilisation. AGRESTE Les dossiers, 21, 27-47
- Bommarco R., Kleijn D., Potts S.G., 2013. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends Ecol. Evol.* 28, 230-238. doi:10.1016/j.tree.2012.10.012
- Cadoux S., Sauzet G., Valantin-Morison M., Pontet C., Champolivier L., Robert C., Lieven J., Flénet F., Mangenot O., Fauvin P., Landé N., 2015. Intercropping frost-sensitive legume crops with winter oilseed rape reduces weed competition, insect damage, and improves nitrogen use efficiency. *OCL* 22, D302. doi:10.1051/ocl/2015014
- Damour G., Dorel M., Quoc H.T., Meynard C., Risède J.-M., 2014. A trait-based characterization of cover plants to assess their potential to provide a set of ecological services in banana cropping systems. *Eur. J. Agron.* 52, Part B, 218-228. doi:10.1016/j.eja.2013.09.004
- de Bello F., Lavorel S., Diaz S., Harrington R., Cornelissen J.H.C., Bardgett R.D., Berg M.P., Cipriotti P., Feld C.K., Hering D., da Silva P.M., Potts S.G., Sandin L., Sousa J.P., Storkey J., Wardle D.A., Harrison P.A., 2010. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodivers. Conserv.* 19, 2873-2893. doi:10.1007/s10531-010-9850-9
- den Hollander N.G., Bastiaans L., Kropff M.J., 2007. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design: I. Characteristics of several clover species. *Eur. J. Agron.* 26, 92-103. doi:10.1016/j.eja.2006.08.011
- Fayaud B., Coste F., Corre-Hellou G., Gardarin A., Duerr C., 2014. Modelling early growth under different sowing conditions: A tool to predict variations in intercrop early stages. *Eur. J. Agron.* 52, 180-190. doi:10.1016/j.eja.2013.09.009
- Garnier E., Navas M.-L., 2012. A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 365-399. doi:10.1007/s13593-011-0036-y
- Hartwig N.L., Ammon H.U., 2002. 50th Anniversary - Invited article - Cover crops and living mulches. *Weed Sci.* 50, 688-699. doi:10.1614/0043-1745(2002)050[0688:AIACCA]2.0.CO;2
- Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, E.S., 2005. Facilitative root interactions in intercrops. *Plant Soil* 274, 237-250. doi:10.1007/s11104-004-1305-1
- Jamont, M., Piva, G., Fustec, J., 2013. Sharing N resources in the early growth of rapeseed intercropped with faba bean: does N transfer matter? *Plant Soil* 371, 641-653. doi:10.1007/s11104-013-1712-2
- Lavorel S., Díaz S., Cornelissen J.H.C., Garnier E., Harrison S.P., McIntyre S., Pausas J.G., Pérez-Harguindeguy N., Roumet C., Urcelay C., 2007. Plant Functional Types: Are We Getting Any Closer to the Holy Grail?, in: Canadell J.G., Pataki D.E., Pitelka L.F. (Eds.), *Terrestrial Ecosystems in a Changing World, Global Change — The IGBP Series*. Springer Berlin Heidelberg, 149-164

Lavorel S., Sarthou J.-P., 2008. Intérêts de la biodiversité pour les services rendus par les écosystèmes. ESCO "Agriculture et biodiversité" - Chapitre 2. 266p

Lorin M., Jeuffroy M.-H., Butier A., Valantin-Morison M., 2015. Undersowing winter oilseed rape with frost-sensitive legume living mulches to improve weed control. *Eur. J. Agron.* 71, 96–105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.001>.

Lorin M., Jeuffroy M.-H., Butier A., Valantin-Morison M., 2016. Undersowing winter oilseed rape with frost-sensitive legume living mulches to improve weed control. *Field Crop. Res.* 193, 24–33.

Poorter H., Garnier E., 2007. Ecological significance of inherent variation in relative growth rate and its components, In: Pugnaire F.I., Valladares F. (Eds.), *Functional Plant Ecology* (2nd Edition). CRC Press, Boca Raton

Schott C., Mignolet C., Meynard J.M., 2010. Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *OCL* 17 (5), 276–291

Steffen W., Richardson K., Rockström J., Cornell S.E., Fetzer I., Bennett E.M., Biggs R., Carpenter S.R., Vries W. de, Wit C.A. de Folke C., Gerten D., Heinke J., Mace G.M., Persson L.M., Ramanathan V., Reyers B., Sörlin S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855. doi:10.1126/science.1259855

Storkey J., Döring T., Baddeley, J., Collins R., Roderick S., Jones H., Watson C., 2015. Engineering a plant community to deliver multiple ecosystem services. *Ecological Applications* 25, 1034–1043. doi:10.1890/14-1605.1

Tilman D., Fargione J., Wolff B., D'Antonio C., Dobson A., Howarth R., Schindler D., Schlesinger W.H., Simberloff D., Swackhamer D., 2001. Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. *Science* 292, 281–284. doi:10.1126/science.1057544

Tixier P., Lavigne C., Alvarez S., Gauquier A., Blanchard M., Ripoche A., Achard R., 2011. Model evaluation of cover crops, application to eleven species for banana cropping systems. *Eur. J. Agr.* 34, 53–61. doi:10.1016/j.eja.2010.10.004

Tribouillois H., Fort F., Cruz P., Charles R., Flores O., Garnier E., Justes E., 2015. A Functional Characterisation of a Wide Range of Cover Crop Species: Growth and Nitrogen Acquisition Rates, Leaf Traits and Ecological Strategies. *PLoS ONE* 10, e0122156. doi:10.1371/journal.pone.0122156

Valantin-Morison M., David C., Cadoux S., Lorin M., Celette F., Amossé C., Basset A., 2014. Association d'une culture de rente et espèces compagnes permettant la fourniture de services écosystémiques. *Innovations agronomiques* 40, 93–112.

Violle C., Navas M.-L., Vile D., Kazakou E., Fortunel C., Hummel I., Garnier E., 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos* 116, 882–892. doi:10.1111/j.2007.0030-1299.15559.x

Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.-F., Ferrer A., Peigne J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 1–20. doi:10.1007/s13593-013-0180-7

Zhang W., Ricketts T.H., Kremen C., Carney K., Swinton S.M., 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecol. Econ.* 64, 253–260. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.02.024

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).