

Etude : Valorisation économique des plantes de services

SEMAE
Section Fourragères
Août 2026

Commission plantes de services



semae

Toutes les semences pour demain

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des membres de la Commission Plantes de Services de la section semences fourragères et à gazon de SEMAE ainsi que ceux de la Commission Inter-Sections Plantes de Services du CTPS dédiée aux plantes de services (CISPS) pour leur implication dans cette étude.

Nos remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation, en partageant leurs connaissances, leurs retours d'expérience et leurs expertises. Leurs échanges et leurs contributions ont été précieux pour enrichir les réflexions et consolider les résultats présentés dans ce document.

Table des matières

Introduction	3
Contexte général	3
Problématique.....	5
Objectifs de l'étude	5
Méthodologie	6
Périmètre et cadrage de l'étude	6
Bénéfice 1 : Fertilisation chimique par les plantes de services (N,K,P,S)	9
Séquestration carbone dans les sols	9
Bénéfice 2 : Gestion de l'azote	14
Piège à nitrates.....	16
Intérêt de l'azote dans les cultures de céréales : Amélioration de la teneur en protéines.	19
Diminution des pertes en phosphore	19
Fixation du soufre.....	21
Bénéfice 2 : Gestion sanitaire	22
La gestion des maladies	22
La gestion des adventices.....	31
Bénéfice 3 : augmentation de la matière organique	35
Bénéfice 4 : Structuration du sol	38
Impact des plantes de services sur la compaction et la densité apparente des sols.....	38
Limitation de la battance.....	39
Réduction de l'érosion.....	40
Comparaison des marges nets sur sols nus et sols couverts	44
Comparaison des marges entre systèmes avec sol nu et systèmes avec couvert.....	44
Interprétation des résultats.....	46
Comparaison économique : sol nu vs sol couvert.....	46
Limites de l'étude	51
Conclusion	53
Bibliographie	54

Introduction

Contexte général

L'agriculture européenne traverse aujourd'hui une période de transition, marquée par une remise en question des modèles productivistes et une accélération des attentes environnementales. Sous l'effet du changement climatique, de l'érosion de la biodiversité, de la dégradation des sols et des préoccupations sociétales autour de la qualité de l'alimentation, les systèmes agricoles sont appelés à évoluer vers des modèles plus durables, plus autonomes et plus résilients.

Cette dynamique de transformation est fortement portée par les politiques publiques européennes, comme le Pacte vert pour l'Europe (*Green Deal*) ou encore la stratégie « De la ferme à la fourchette » (*Farm to Fork*), qui visent à bâtir un système alimentaire plus durable, résilient et respectueux de l'environnement. Ces stratégies ont fixé des objectifs ambitieux à l'horizon 2030, parmi lesquels une réduction de 50 % de l'utilisation et des risques liés aux pesticides chimiques, une diminution de l'usage des pesticides les plus dangereux, une baisse des apports en fertilisants ainsi qu'une amélioration de la santé des sols. Si ces objectifs constituent avant tout un cap à atteindre, plusieurs avancées ont déjà été observées à l'échelle européenne. Selon les dernières données publiées par la Commission européenne, l'utilisation et le risque liés aux pesticides chimiques ont diminué de manière significative par rapport à la période de référence 2015-2017, même si les progrès restent variables selon les États membres et nécessitent d'être poursuivis pour consolider cette trajectoire. La nouvelle PAC (Politique Agricole Commune), à travers les éco-régimes et les mesures agroenvironnementales, encourage également les pratiques favorables à l'environnement et à la résilience des agrosystèmes.

Dans ce contexte, l'utilisation des plantes de services est une méthode prometteuse. En développement dans les grandes cultures, l'usage des plantes de services trouve également leur place dans la viticulture, l'arboriculture ou les systèmes d'élevage. Par leur implantation entre deux cultures principales ou en association, ces plantes participent à la régulation des écosystèmes agricoles.



Tableau 1: Les différents bénéfices des plantes de services

Les services rendus par les plantes de services sont largement documentés sur le plan scientifique : structuration du sol, restitution d'éléments fertilisants, réduction de l'érosion, stockage de carbone, limitation du développement des adventices ou encore stimulation de la biodiversité.

Cependant, malgré ces bénéfices reconnus, leur utilisation reste encore limitée dans de nombreuses exploitations. Pour les agriculteurs, l'implantation de couverts végétaux représente souvent un coût supplémentaire, tandis que les gains agronomiques et économiques restent difficiles à quantifier à court terme.

Dans ce contexte, leur rôle dans les transitions agroécologiques justifie une réflexion approfondie sur leur valorisation économique, afin de mieux objectiver les services que ces plantes rendent aux systèmes agricoles. Cette question est d'autant plus centrale que la couverture des sols en interculture est désormais obligatoire dans certaines zones vulnérables, notamment au titre de la Directive Nitrates¹.

Il devient alors important que les couverts végétaux ne soient pas perçus uniquement comme une contrainte administrative ou agronomique mais bien comme un levier agronomique stratégique, générateur de valeur ajoutée, à la fois agronomique, environnementale également économique.

¹ La Directive Nitrates est une directive européenne (91/676/CEE) transposée en droit français. Elle impose aux agriculteurs situés en zones vulnérables de mettre en place des pratiques limitant les fuites d'azote vers les eaux, dont l'obligation de couverture des sols en interculture.

Problématique

En effet, malgré, leurs nombreux services agronomiques, environnementaux et socio-économiques, les couverts végétaux restent encore souvent perçus comme une charge notamment en raison des coûts associés à leur implantation (semences, semis, destruction) et d'investissement de temps.

La question est donc, comment évaluer et valoriser économiquement les services rendus par les plantes de services, afin de mieux reconnaître leur rôle et de faciliter leur diffusion dans les systèmes agricoles ?

Objectifs de l'étude

Dans son projet stratégique à horizon 2027, SEMAE a inscrit l'accompagnement des filières agricoles française dans la transition agroécologique au cœur de sa stratégie. Dans ce cadre, la section semences fourragères et à gazon porte et finance une démarche visant à promouvoir le développement et l'utilisation des plantes de services auprès des agriculteurs et des acteurs de la distribution, en cohérence avec les orientations stratégiques de l'interprofession.

Cette étude s'inscrit directement dans cette dynamique. Elle répond à une demande de la Commission plantes de services, dont l'objectif est de mieux objectiver les bénéfices agronomiques associés aux plantes de services et, surtout, de rendre plus lisible leur intérêt économique pour les exploitants agricoles. En effet, malgré des bénéfices agronomiques largement documentés, l'adoption des plantes de services demeure encore limitée, en raison des coûts liés à leur mise en œuvre et d'un retour sur investissement souvent perçu comme difficile à quantifier.

Par ailleurs, la valorisation des plantes de services ne peut être dissociée de la qualité des semences utilisées. La performance agronomique des couverts repose en grande partie sur la qualité variétale, la pureté, la faculté germinative et l'adaptation des mélanges aux contextes pédoclimatiques et aux systèmes de culture. À ce titre, l'étude s'inscrit également en cohérence avec les actions de promotion de la qualité des semences portées par SEMAE, en mettant en évidence le rôle structurant des semences de qualité dans l'expression des services rendus par les plantes de services.

Les objectifs spécifiques de l'étude sont d'identifier et sélectionner les bénéfices agronomiques majeurs associés.

L'étude s'attachera à :

- Évaluer la portée économique de chacun de ces bénéfices, en s'appuyant sur des références techniques françaises, des retours d'experts et des cas concrets.
- Fournir des repères économiques chiffrés (€/ha) facilement mobilisables pour orienter les choix techniques et éclairer les décisions stratégiques des exploitants agricoles.
- Contribuer à la création ou au renforcement d'outils d'aide à la décision, permettant d'intégrer ces bénéfices dans un raisonnement économique global.

Afin de répondre à ces objectifs, une méthodologie a été mise en place. Elle repose sur une combinaison de revue bibliographique, d'échanges avec des experts et de traductions économiques permettant d'estimer la valeur des services rendus par les couverts végétaux.

Méthodologie

Périmètre et cadrage de l'étude

Cette étude repose sur une approche combinant revue de littérature, échanges avec des experts et analyse économique afin d'évaluer les bénéfices des plantes de services dans le cadre des grandes cultures en France métropolitaine. L'accent a été mis sur les couverts temporaires implantés en interculture, car ce sont eux qui font aujourd'hui l'objet d'un déploiement large et d'incitations réglementaires. Une attention toute particulière a également été portée sur les plantes compagnes.

Une revue bibliographique a été conduite à partir de bases scientifiques et de publications techniques françaises. Cette recherche a permis de rassembler les connaissances disponibles sur les services rendus par les plantes de services et d'identifier des références chiffrées exploitables. Parallèlement, des échanges avec des experts d'Arvalis, de l'INRAE, des Chambres d'agriculture ainsi qu'avec les membres de la Commission plantes de services de SEMAE, composée de représentants d'établissements semenciers et d'agriculteurs, ont permis de confronter les données issues de la littérature à l'expérience de terrain et de cibler les enjeux prioritaires pour la filière.

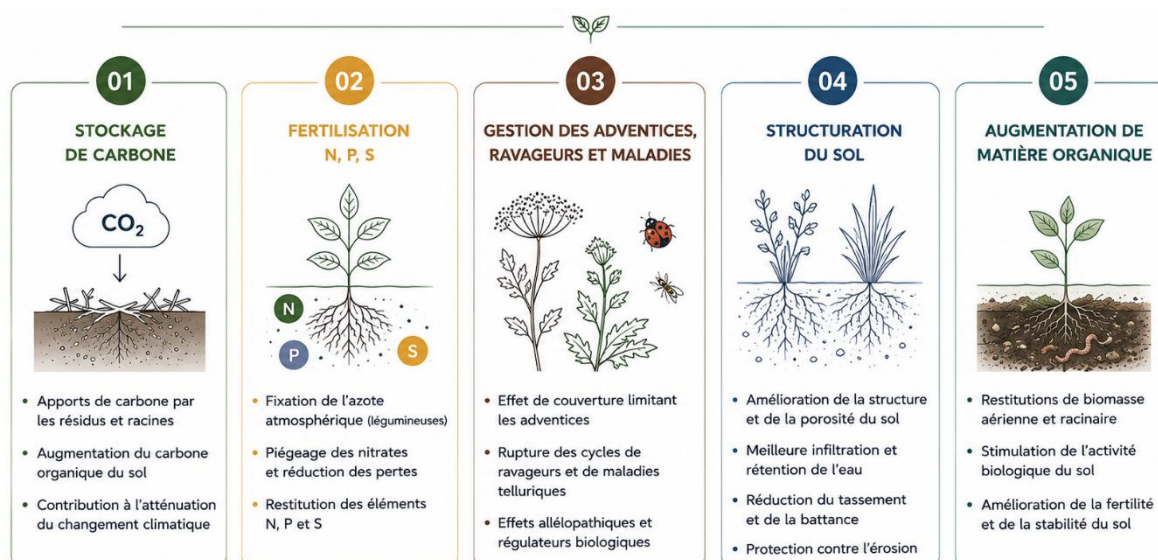


Tableau2: Les 5 bénéfices traités dans le cadre de cette étude

Cinq axes principaux ont été retenus pour structurer l'analyse : la gestion sanitaire, incluant la réduction des adventices et des maladies telluriques grâce aux effets de couverture, la fertilisation, à travers la capacité des couverts à fixer l'azote atmosphérique, piéger les nitrates et restituer les éléments N, P, K et S ; l'augmentation de la matière organique, en lien avec les restitutions de biomasse et la contribution au stockage de carbone ; et enfin la gestion du sol, comprenant la protection contre l'érosion et l'amélioration de sa structure.

Pour chacun de ces axes, les bénéfices agronomiques recensés ont été traduits en indicateurs quantifiables (kg d'azote fixé ou restitué, kg/ha de P, K ou S mobilisés, tonnes de carbone stockées, pourcentage de réduction des adventices ou maladies, etc.). Ces indicateurs ont ensuite été valorisés économiquement à partir de références de prix des engrais, des prix du marché et des coûts de mécanisation (Barème Entraide). Plusieurs scénarios illustratifs ont été construits à partir d'essais de longue durée et de données de terrain afin de donner des ordres de grandeur représentatifs.

Cette méthodologie repose principalement sur des données de la littérature et des retours d'experts, sans expérimentation directe. Les connaissances mobilisées proviennent notamment de publications et ressources produites par des instituts techniques, organismes de recherche et Chambres d'agriculture, dont quelques exemples sont présentés ci-dessous.

The logo for INRAE, featuring the text "INRAE" in a bold, teal, sans-serif font.The logo for ARVALIS, featuring a stylized orange and blue leaf-like icon to the left of the text "ARVALIS" in a bold, blue, sans-serif font.The logo for ITB, featuring a green stylized leaf icon to the left of the text "ITB" in a bold, green, sans-serif font. Below "ITB" is the text "Institut Technique de la Betterave" in a smaller, green, sans-serif font.The logo for CHAMBRE D'AGRICULTURE NOUVELLE-AQUITAINE, featuring a green stylized leaf icon to the left of the text "CHAMBRE D'AGRICULTURE" in a bold, green, sans-serif font. Below this is the text "NOUVELLE-AQUITAINE" in a smaller, red, sans-serif font.The logo for HAL science ouverte, featuring a stylized icon of three curved lines in blue, orange, and red to the left of the text "HAL" in a bold, blue, sans-serif font. Below "HAL" is the text "science ouverte" in a smaller, orange, sans-serif font.The logo for Terres Inovia, featuring a stylized icon of a field with green and brown squares to the left of the text "Terres" in a bold, dark red, sans-serif font. Below "Terres" is the text "Inovia" in a bold, green, sans-serif font. Below "Inovia" is the text "l'agronomie en mouvement" in a smaller, green, sans-serif font.

La méthodologie adoptée vise à apporter un premier niveau de connaissances. Les résultats doivent donc être considérés comme des estimations indicatives, sujettes à variation selon les contextes pédoclimatiques, les espèces de couverts utilisées, la biomasse produite et les modalités de gestion de leur destruction.

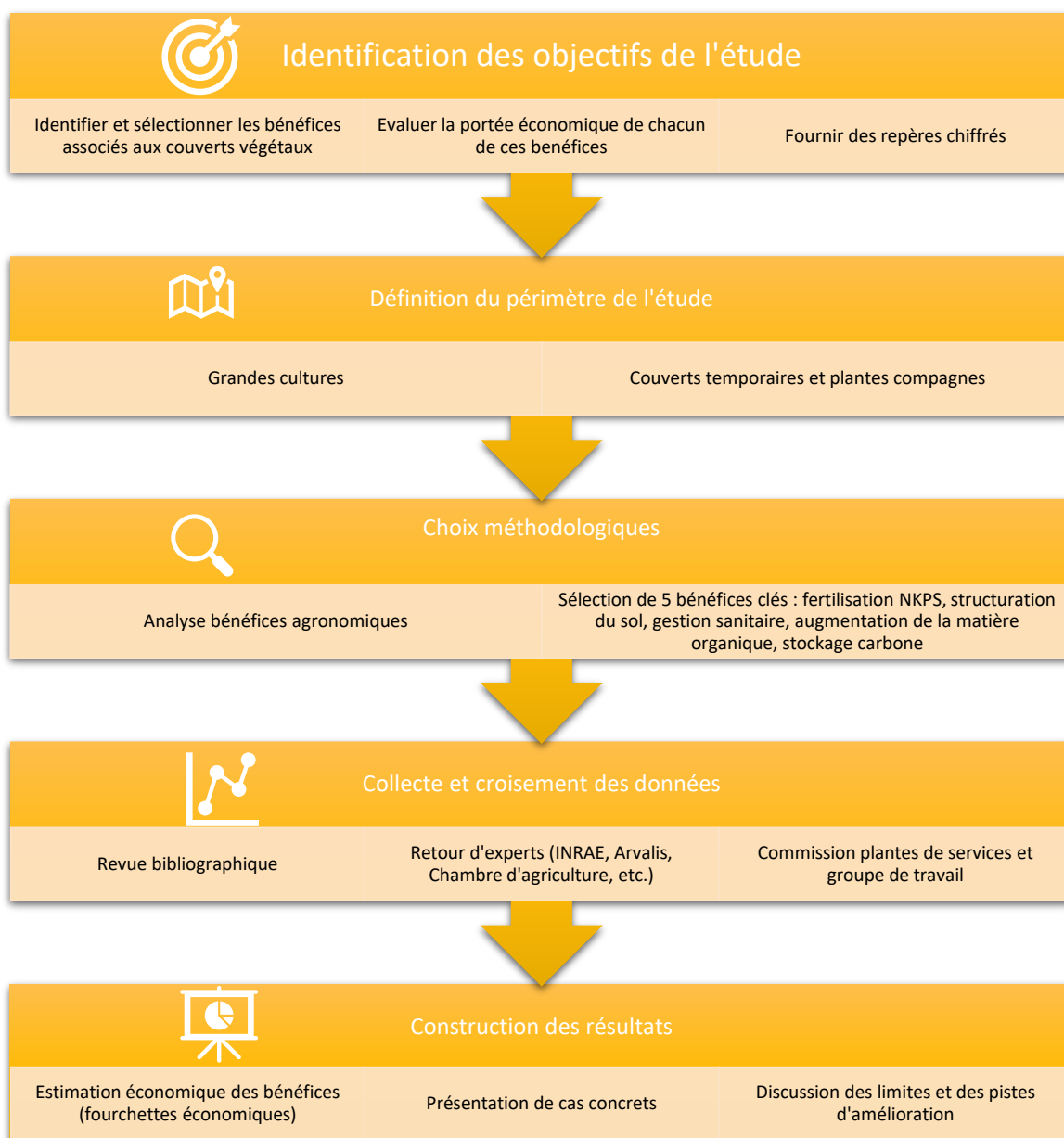


Tableau3: Présentation synthétique de la méthodologie

Résultat de l'étude

Bénéfice 1 : Fertilisation chimique par les plantes de services (N,K,P,S)

Séquestration carbone dans les sols

L'augmentation du stock de carbone organique dans les sols agricoles constitue un objectif, à la fois pour la durabilité des systèmes de production et pour l'atténuation du changement climatique. Le carbone organique améliore la fertilité des sols en renforçant leur structure, leur capacité de rétention en eau, leur résistance à l'érosion et leur activité biologique (Quae, 2024). Sur le plan environnemental, la séquestration de carbone contribue également à compenser une partie des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités agricoles.



Crédit photo : SEMAE - Harold Vespieren

L'introduction de plantes de services dans les rotations est largement reconnue comme un levier efficace pour accroître les teneurs en matière organique et donc le stock de carbone des sols. Toutefois, les quantités de carbone séquestrées varient sensiblement selon les sources bibliographiques, les contextes pédoclimatiques, les espèces implantées, les modalités de gestion (date de semis, durée de couverture, mode de destruction) ainsi que la fréquence d'implantation des couverts dans la rotation (Quae, 2024).

Ainsi, ARVALIS (2020) indique qu'un couvert végétal permet de stocker en moyenne **240 kg de CO₂/ha/an**. À l'inverse, l'ouvrage de l'INRAE *Les plantes de services : vers de nouveaux agroécosystèmes* rapportent des valeurs plus élevées, avec une augmentation moyenne d'environ **500 kg de carbone organique (C)/ha/an** au cours des trente premières années suivant l'introduction de couverts, certaines situations pouvant atteindre **1 000 kg C/ha/an** (Quae, 2024).

La valorisation économique de cette séquestration peut être estimée à partir d'un prix du carbone de **35 €/t CO₂e**. (Connaissance des énergies, 2025).

Avec l'hypothèse retenue par Arvalis, le stockage de **240 kg CO₂/ha/an** représente une valorisation potentielle d'environ **9 €/ha/an**.

En retenant les valeurs issues des méta-analyses (500 à 1 000 kg C/ha/an), **soit 1,84 à 3,67 t CO₂eq/ha/an** après conversion (1 kg C = 3,67 kg CO₂eq), le gain potentiel est compris entre **64 et 128 €/ha/an**.

Concernant la quantité de carbone séquestré, elle est fortement liée à la biomasse produite par le couvert et à ses caractéristiques biochimiques, en particulier le rapport carbone/azote (C/N)² (Quae, 2024). Les espèces à forte production de biomasse aérienne et racinaire, comme certaines légumineuses, tendent à générer des apports plus importants que des graminées à biomasse plus modérée (Quae, 2024).

Ces estimations restent indicatives, car elles ne prennent pas en compte les incertitudes liées à la permanence du stockage, aux coûts de suivi et de certification, ni aux fluctuations du prix du carbone. Elles permettent néanmoins d'illustrer les bénéfices économiques potentiels associés à la séquestration du carbone par les plantes de services.

Par ailleurs, même si l'accès aux marchés volontaires du carbone reste encore limité pour une partie des exploitations, la séquestration de carbone représente un enjeu croissant pour les territoires. Les collectivités, confrontées aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre fixés par la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC)¹ et les PCAET¹, peuvent trouver dans les plantes de services un levier complémentaire pour renforcer les puits de carbone locaux.

² **Rapport C/N** : le rapport carbone/azote (C/N) correspond au ratio entre la quantité de carbone et d'azote contenue dans la biomasse végétale. Il constitue un indicateur clé de la vitesse de décomposition des résidus végétaux et de leur impact sur la disponibilité de l'azote dans le sol. Un rapport C/N élevé est associé à une décomposition plus lente et à une immobilisation temporaire de l'azote, tandis qu'un rapport C/N faible favorise une minéralisation plus rapide et une restitution d'azote plus précoce.

AZOTE ABSORBÉ VERSUS CARBONE HUMIFIÉ : les légumineuses, championnes de la minéralisation d'azote, le radis, leader de la restitution de carbone

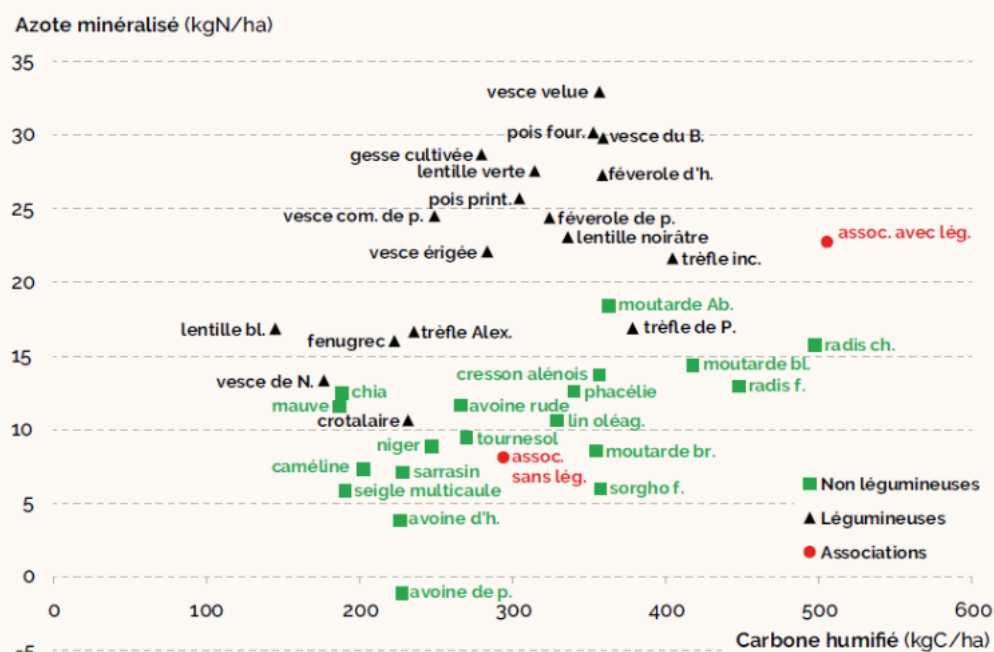


Tableau 4: Moyennes estimées des apports de carbone humifié au sol et de l'azote minéralisé en 6 mois pour différentes espèces, selon l'étude d'Arvalis

Les résultats expérimentaux présentés par Arvalis et Vivescia (2012) confirment ces mécanismes et mettent en évidence des différences marquées entre groupes d'espèces. Comme l'illustre la figure 4, les légumineuses se distinguent par une capacité élevée à restituer de l'azote au sol via la minéralisation de leur biomasse, avec des valeurs pouvant dépasser 25 à 30 kg N/ha dans les six mois suivant la destruction du couvert. À l'inverse, certaines espèces non légumineuses, telles que le radis ou autres crucifères, présentent des apports plus importants de carbone humifié, pouvant atteindre 400 à 500 kg C/ha, contribuant ainsi davantage à l'enrichissement du stock de matière organique du sol.

Ces résultats illustrent le compromis entre restitution d'azote et stockage de carbone selon les espèces de couverts. Les légumineuses jouent un rôle dans la fourniture d'azote pour la culture suivante, tandis que certaines espèces non légumineuses contribuent davantage à la formation de matière organique stable dans le sol. Les associations d'espèces, notamment les mélanges incluant des légumineuses et des non-légumineuses, permettent ainsi de combiner ces deux fonctions et d'optimiser les services agronomiques rendus par les plantes de services.

Les conditions de décomposition influencent également fortement le bilan :

- Les sols argileux, du fait de leur capacité à protéger la matière organique dans les complexes argilo-humiques, présentent un potentiel de stockage plus élevé que les sols sableux.
- Les climats tempérés froids et humides favorisent l'accumulation en ralentissant la minéralisation, alors que les climats chauds et humides accélèrent la décomposition et limitent le stockage net.

La gestion du couvert influence également les flux de carbone et d'azote associés aux plantes de services. La durée de développement du couvert, liée notamment à la date de semis et à la date de destruction, conditionne fortement la biomasse produite et donc les apports de matière organique au sol.

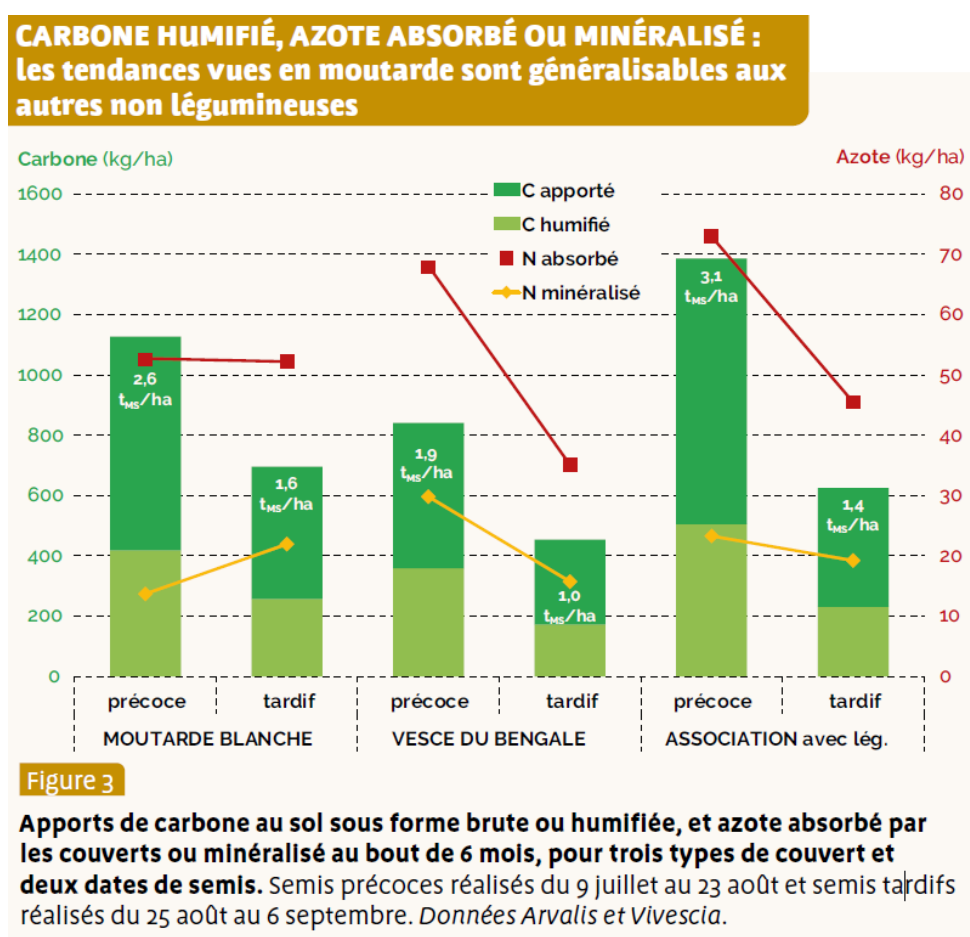


Tableau 5: Apport de carbone au sol sous forme brute ou humifiée, et azote absorbé par les couverts ou minéralisé au bout de 6 mois, pour trois types de couverts (étude menée par Arvalis et Vivescia)

Les résultats expérimentaux d'Arvalis et Vivescia (2012) sur la figure 5 montrent que les couverts semés précocement produisent généralement davantage de biomasse, ce qui se traduit par des apports plus élevés de carbone au sol, qu'il soit apporté sous forme brute ou stabilisé sous forme humifiée.

Par exemple, dans le cas de la moutarde blanche, les semis précoces peuvent conduire à des apports supérieurs à 1 100 kg C/ha, contre environ 700 kg C/ha pour des semis plus tardifs. Des tendances similaires sont observées pour d'autres types de couverts, notamment les associations avec légumineuses, qui peuvent dépasser 1 300 kg C/ha lorsque les conditions d'implantation sont favorables. Ces différences s'expliquent principalement par une durée de croissance plus longue, permettant une accumulation de biomasse plus importante.



À retenir

Une destruction tardive ou un semis précoce favorisent la production de biomasse et les apports de carbone, mais peuvent retarder la disponibilité de la parcelle pour l'implantation de la culture suivante.

À l'inverse, une destruction plus précoce limite les apports de biomasse et donc de carbone, mais facilite la gestion de l'implantation de la culture suivante (Quae, 2024). Enfin, la diversification des espèces et la répétition des couverts sur plusieurs années contribuent à renforcer la stabilisation du carbone dans les sols agricoles (Quae, 2024).

Bénéfice 2 : Fertilisation chimique par les plantes de services (N,K,P,S)

Gestion de l'azote

Les plantes de services influencent la gestion du cycle de l'azote, en intervenant à la fois comme sources, via la fixation symbiotique et la restitution au sol, et comme puits, par le piégeage d'azote minéral et la réduction des pertes par lixiviation. En climat tempéré, où l'azote constitue l'élément minéral le plus fréquemment limitant pour la production végétale (Quae, 2024), leur contribution peut être décisive pour optimiser la fertilité et limiter les pertes environnementales.



L'intégration de légumineuses dans les couverts végétaux est largement documentée pour sa capacité à fixer l'azote atmosphérique via la symbiose avec les Rhizobium (Quae, 2024). La littérature indique que les apports issus de la fixation symbiotique peuvent varier entre **60 et 160 kg N/ha** selon les conditions (Quae, 2024). Des valeurs supérieures à **300 kg N/ha** ont été observées dans des situations particulièrement favorables. Cette fixation d'azote, si elle est bien synchronisée avec les besoins de la culture suivante, représente un apport gratuit, réduisant le besoin en engrais minéraux (Quae, 2024).

Toutefois, **après échanges avec les experts terrain**, il apparaît que, dans la majorité des situations rencontrées, la fixation moyenne d'azote par les couverts se situe plutôt autour de **60 kg N/ha**. En pratique, les experts rapportent des fourchettes comprises entre **20 et 150 kg N/ha** selon les contextes.

En termes de valorisation économique, la quantité d'azote fixée n'est jamais totalement restituée la première année. Selon la composition du couvert (rapport C/N) et la date de destruction, on estime que **20 à 50 %** de l'azote fixé est minéralisé au cours de la première année (Quae, 2024).

Élément	Forme commerciale	Prix €/t (HT) (2025)	Prix €/kg	Teneur (%)	Prix €/kg par élément
Azote (N)	Urée (46%)	475,00 €	0,48 €	46%	1,03 €
	Ammonitrate 33,5%	420,00 €	0,42 €	34%	1,25 €
	Solution azotée (UAN 30%)	350,00 €	0,35 €	30%	1,17 €
	Sulfate d'ammonium (21%)	300,00 €	0,30 €	21%	1,43 €

Tableau 6: Prix de l'azote en fonction de sa forme commerciale

Avec un prix des engrais azotés (ammonitrate, urée) oscillant entre **1,0 et 1,4 €/kg N** (novembre 2025), la valeur restituée à la culture suivante peut être estimée comme suit :

- Dans le cas d'une fixation basse (20 kg N/ha, 20 % disponibles), environ **4 kg N/ha** sont restitués, soit un gain de **4 à 6 €/ha**.
- Dans le cas moyen (60 kg N/ha, 35 % disponibles), environ **21 kg N/ha** sont restitués, soit **21 à 29 €/ha**.
- Dans un scénario favorable (150 kg N/ha, 50 % disponibles), environ **75 kg N/ha** sont restitués, soit **75 à 105 €/ha**.

Ainsi, bien que la littérature présente des situations très favorables, les estimations basées sur les retours terrain nous invitent à privilégier une moyenne plus modeste, en prenant en compte la variabilité des conditions et la réalité des restitutions aux cultures.

Piège à nitrates

Outre leur capacité à fixer et restituer de l'azote, les plantes de services constituent un outil efficace pour piéger l'azote minéral résiduel du sol, en particulier sous forme de nitrates, et ainsi réduire les pertes par lixiviation. La lixiviation de l'azote désigne sa migration hors de portée des racines sous forme de nitrate dilué dans les eaux s'infiltrant dans la parcelle. Le phénomène est de l'ordre de **15 à 50 unités d'azote** en moyenne selon les situations. Il est principalement dépendant de la quantité d'azote disponible du sol au moment où le drainage survient et à l'intensité de celui-ci. (Agro transfert).



Moutarde blanche (Sinapis alba), une crucifère fréquemment utilisée comme plante de service pour le piégeage des nitrates. (Source : SEMAE)

Ces performances de piégeage d'azote sont optimisées lorsque le couvert est implanté rapidement après la récolte précédente, que sa croissance automnale est vigoureuse et que son système racinaire est dense et profond. Les graminées Poacées, telles que le seigle ou l'avoine, ainsi que certaines crucifères comme la moutarde blanche ou le radis fourrager, figurent parmi les espèces les plus efficaces grâce à une vitesse de croissance rapide et une exploration racinaire profonde. Les légumineuses, quant à elles, montrent une efficacité moindre dans le piégeage direct des nitrates, car elles privilégient la fixation symbiotique, mais elles contribuent néanmoins à réduire les pertes en occupant l'espace et en limitant l'érosion.

La capacité des couverts à limiter la lixiviation dépend cependant largement des conditions climatiques et pédologiques. Dans les hivers froids, la sénescence précoce ou la destruction par le gel peuvent réduire la durée d'absorption et limiter la protection contre les pertes. À l'inverse, dans les hivers doux et humides, la croissance prolongée favorise le piégeage, mais une destruction trop précoce peut entraîner une libération rapide d'azote, exposant celui-ci au risque de lessivage avant l'implantation de la culture suivante. Sur sols lourds et hydromorphes, l'enracinement limité restreint la zone explorée, alors que sur sols légers et filtrants, un couvert implanté tôt peut intercepter des quantités importantes de nitrates.

À noter

Si l'effet net sur la fertilité est souvent positif, certaines limites doivent être prises en compte. Les couverts à rapport C/N élevé peuvent provoquer une immobilisation temporaire de l'azote minéral, réduisant sa disponibilité immédiate pour la culture suivante et, dans certains cas, entraînant une faim d'azote. Cette immobilisation, bénéfique pour limiter les pertes hivernales, doit être anticipée dans le raisonnement de la fertilisation. Par ailleurs, la mise en place d'un couvert peut imposer des contraintes opérationnelles, qu'il s'agisse de la fenêtre de semis de la culture suivante, de la gestion de la destruction ou du risque de servir d'hôte à certains ravageurs ou maladies si la rotation est mal conçue.

Intérêt économique du piégeage d'azote

Sur le plan économique, les bénéfices liés à la réduction du lessivage et à l'apport d'azote doivent être pondérés par les coûts d'implantation et de destruction du couvert, ainsi que par les éventuels apports supplémentaires nécessaires en cas de désynchronisation entre libération et besoins de la culture.

Tableau 7 : Estimation du coût économique des pertes d'azote par lixiviation

Azote (N)	Nom commercial (prix tableau 1)	Coût pour une perte de 15 unités par an	Coût pour une perte de 50 unités par an
	Urée (46%)	15,5 €	51,63 €
	Ammonitrate 33,5%	18,8 €	62,69 €
	Solution azotée (UAN 30%)	17,5 €	58,33 €
	Sulfate d'ammonium (21%)	21,4 €	71,43 €
Moyenne		14,64 €	61,02 €

La restitution d'azote a été abordée dans cette étude non pas uniquement sous l'angle de l'apport direct par les légumineuses, mais comme un levier permettant d'éviter des pertes d'azote importantes en période d'interculture. En effet, un sol nu peut perdre en moyenne entre **40 et 50 unités** d'azote par lixiviation, volatilisation ou dénitrification, selon les conditions climatiques et la nature du sol. (Quae, 2024). L'implantation d'un couvert végétal permet donc de limiter cette perte, voire de capter une partie de l'azote résiduel disponible. En considérant un prix moyen de l'azote minéral compris **entre 1,03 et 1,4 €/kg N**, une perte de 15 à 50 unités d'azote représente un manque à gagner compris entre **15 et 70 €/ha** selon le type d'engrais utilisé (voir tableau 3).

Intérêt de l'azote dans les cultures de céréales : Amélioration de la teneur en protéines

La satisfaction des besoins en azote des céréales constitue un facteur déterminant de la performance agronomique et technologique des cultures conditionnant à la fois le niveau de rendement et la concentration en protéines des grains (Garrido-Lestache et al., 2004). En conséquence, les céréales sont généralement fertilisées avec des apports élevés d'azote, aussi bien dans les systèmes conventionnels que dans certains systèmes d'agriculture biologique. À l'inverse, dans les systèmes à bas niveau d'azote, il devient difficile d'atteindre les concentrations en protéines requises par les industries agroalimentaires, notamment pour la panification du blé tendre ou la fabrication de semoule et de pâtes à partir du blé dur.

Diminution des pertes en phosphore

Le phosphore est un élément important des transferts d'énergie au sein des plantes qui s'effectuent grâce à l'ATP (Adénosine tri phosphate), ainsi que des processus respiratoires et du codage génétique. De plus, il constitue un élément nutritif nécessaire au bon développement des cultures, mais sa dynamique dans les sols agricoles en fait un élément particulièrement vulnérable aux pertes, notamment par ruissellement et érosion. Ces pertes, bien que généralement moins importantes que celles de l'azote, représentent un enjeu environnemental important car elles contribuent à l'eutrophisation des milieux aquatiques, c'est-à-dire la prolifération excessive d'algues dans les milieux aquatiques, entraînant un appauvrissement en oxygène et une dégradation de la qualité des écosystèmes. (Quae, 2024). L'intégration de plantes de services dans les systèmes de culture apparaît comme une stratégie efficace pour limiter ces risques.

Les couverts végétaux réduisent les pertes de phosphore principalement par deux mécanismes complémentaires. D'une part, leur système racinaire limite l'érosion en stabilisant la structure du sol et en réduisant le ruissellement de surface, ce qui diminue l'export de particules riches en phosphore. D'autre part, leur biomasse aérienne et racinaire capte le phosphore minéral présent dans les horizons superficiels, jouant ainsi un rôle tampon entre deux cultures. Plusieurs travaux ont montré qu'un couvert hivernal, tel qu'un mélange seigle-avoine ou une association de trèfles avec une céréale, permettait de réduire les pertes de phosphore de plus de 80 % par rapport à une situation de sol nu (Quae, 2024).

Cette fonction de piégeage du phosphore est d'autant plus importante que les pertes ont lieu principalement en hiver et au début du printemps, périodes où les sols sont nus et soumis à des précipitations abondantes. Les plantes de services, en maintenant une couverture végétale, réduisent ainsi la lixiviation prématurée du phosphore, même dans des conditions climatiques contrastées (Quae, 2024). Toutefois, l'efficacité varie selon les espèces

utilisées : certaines Crucifères comme le radis présentent une forte capacité d'absorption du phosphore disponible, réduisant de manière significative les pertes (Quae, 2024).

Les pertes de phosphore liées à l'érosion et au ruissellement restent généralement limitées en quantité, mais elles représentent un enjeu important pour la fertilité des sols et la qualité de l'eau. D'après la littérature scientifique, l'ordre de grandeur des pertes de phosphore est compris entre **0,2 et 1 kg P/ha/an** selon les contextes pédoclimatiques, les pratiques culturales et le niveau d'érosion observé. (A. Mollier, sd)

L'implantation de couverts végétaux permet de réduire ces pertes en protégeant le sol contre l'érosion, en limitant le ruissellement et en absorbant une partie du phosphore disponible. Les essais disponibles indiquent une réduction des pertes de phosphore comprise entre **40 et 80 %** selon les situations.

Ainsi, pour une perte initiale de **0,2 à 1 kg P/ha/an**, les pertes évitées grâce aux couverts peuvent être estimées entre **0,08 et 0,8 kg P/ha/an**. Pour être cohérent avec les formes commerciales des engrais phosphatés, cette quantité peut être convertie en équivalent P_2O_5 , avec un facteur de conversion de 2,29. Cela correspond donc à environ **0,18 à 1,83 kg P_2O_5 /ha/an** évités.

Tableau 8: Prix du phosphore en fonction de sa forme commerciale

Élément	Forme commerciale	Prix €/t (HT)	Prix €/kg	Teneur (%)	Prix €/kg par élément (2025)
Phosphore (P_2O_5)	DAP (46%)	700,00 €	0,70 €	46%	1,52 €
	Superphosphate triple (46%)	660,00 €	0,66 €	46%	1,43 €

Sur la base des prix moyens des engrais phosphatés retenus dans cette étude, soit **1,43 à 1,52 €/kg de P_2O_5** , la valeur économique directe des pertes de phosphore évitées est comprise entre **0,26 et 2,78 €/ha/an**.

Ainsi, l'intérêt économique des couverts végétaux ne repose pas uniquement sur la valeur marchande du phosphore préservé chaque année, mais surtout sur leur contribution à long terme au maintien de la fertilité du sol, à la limitation de l'érosion et à la réduction du risque de carence.

Fixation du soufre

Le soufre est un élément important au développement des cultures, notamment pour la synthèse des protéines et l'utilisation de l'azote. Depuis les années 1980, la diminution des dépôts atmosphériques de soufre a fortement réduit les apports naturels, rendant les cultures plus dépendantes de la fertilisation minérale (Scherer, 2001). Dans ce contexte, les plantes de services contribuent au recyclage du soufre en absorbant le sulfate présent dans le sol pendant l'automne et l'hiver, limitant ainsi son lessivage avant de le restituer progressivement à la culture suivante lors de la décomposition de leur biomasse.



Les travaux d'innovations Agronomiques (2017), confirmés par les essais conduits dans le cadre de la thèse d'Antoine Couëdel, montrent que les crucifères sont les espèces les plus efficaces pour piéger le soufre, **avec 10 à 15 kg S/ha** accumulés dans la biomasse. Les mélanges associant crucifères et légumineuses présentent des performances très proches, avec une restitution à la culture suivante de **6 à 8 kg S/ha, soit environ 85 % de celle observée pour les crucifères pures**. À l'inverse, les légumineuses seules restituent seulement **1 à 2 kg S/ha**.

Sur le plan économique, cette restitution permet de limiter les apports d'engrais soufrés. En considérant un coût moyen de **0,60 à 0,80 €/kg S** (à partir des prix des principaux engrais soufrés en 2025), la valeur du soufre restitué est estimée entre :

Tableau 9: Estimation des économies en soufre grâce aux plantes de services

Type de couvert	Soufre restitué (kg S/ha)	Prix du soufre (€/kg S) (2025)	Économie estimée sur la fertilisation (€/ha)
Légumineuse pure	1 à 2	0,60 à 0,80	0,6 à 1,6
Mélange crucifères-légumineuses	6 à 8	0,60 à 0,80	3,6 à 6,4
Crucifère pure	10 à 15	0,60 à 0,80	6 à 12

Ces montants restent modestes lorsqu'ils sont considérés isolément. Toutefois, le principal intérêt économique réside dans la limitation des risques de carence en soufre, notamment pour les cultures exigeantes comme le colza, ainsi que dans l'amélioration de l'efficacité de la fertilisation azotée. Les mélanges de plantes de services permettent ainsi de combiner un recyclage efficace du soufre avec les bénéfices liés à la fixation biologique de l'azote par les légumineuses, renforçant les performances agronomiques globales du système de culture.

Bénéfice 2 : Gestion sanitaire

La gestion des maladies

Les plantes de services sont aujourd'hui identifiées comme des leviers agroécologiques pouvant contribuer à la gestion des maladies et ravageurs des cultures, en association avec d'autres pratiques. Leur action repose principalement sur des mécanismes à la fois directs (ex : compétition, allélopathie) et indirects (ex : régulation biologique, tels que la perturbation de la reconnaissance de la culture par les bioagresseurs). Plusieurs études menées en France mettent en évidence des effets positifs mesurables de ces dispositifs, bien que variables selon les contextes.

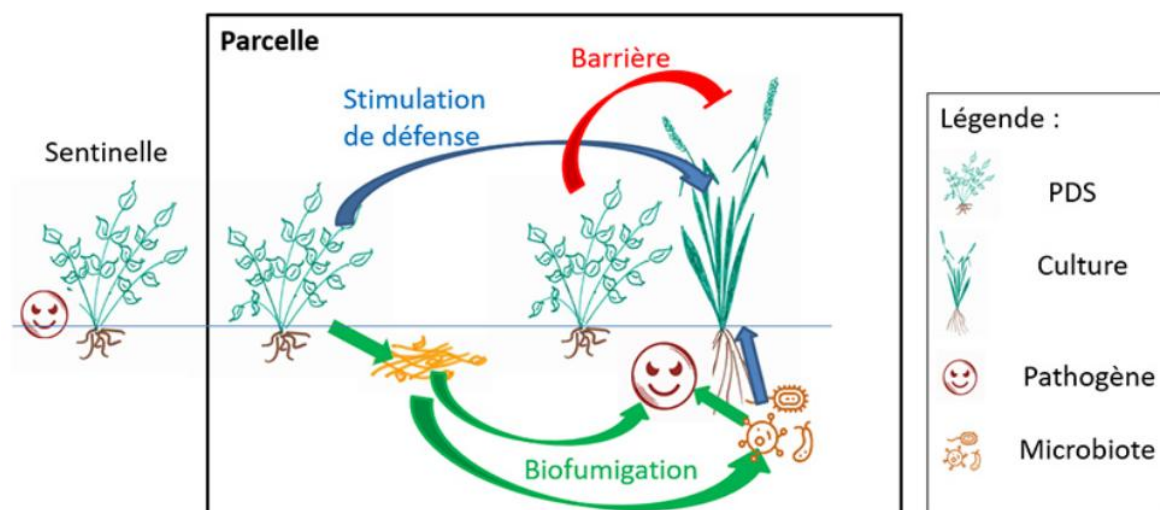


Tableau 10: Les mécanismes de protection des plantes de services contre les maladies (source: INRAE, 2023)

À titre d'exemple, dans le cas de la betterave sucrière, la question de la gestion des pucerons vecteurs de la jaunisse virale a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Les plantes compagnes peuvent contribuer à limiter la présence des pucerons sur la culture en jouant plusieurs rôles : piégeage des individus, altération des signaux visuels et chimiques permettant la reconnaissance de la culture (rupture chromatique), ou attraction des auxiliaires de culture. Selon l'étude de P. Tauvel et al. (2023), dès les années 1970, Heathcote (1974) avait montré une réduction significative des populations de *Myzus persicae* dans des parcelles de betteraves sucrières associées à des plantes compagnes telles que la moutarde ou l'orge. Les auteurs attribuent cet effet à un camouflage visuel des plants de betterave, limitant la colonisation des pucerons lors de la phase d'atterrissage.

Les résultats de cette étude menée par P. Tauvel et al. (2023), A. Fabarez et al. (2023) a réalisé sur un réseau de 34 essais conduits en conditions de pression puceron avérée (zones sans protection aphicide), montrent que l'efficacité moyenne des plantes compagnes sur les symptômes de jaunisse a été estimée à **34 % pour l'avoine et 31 % pour l'orge**, tandis que la féverole présentait une efficacité **moyenne de 19 %**. Ces résultats montrent que les plantes compagnes ne permettent pas, à elles seules, de supprimer les symptômes de jaunisse, mais qu'elles contribuent à une réduction non négligeable de l'intensité des attaques et de leur expression visuelle sur la culture. (P. Tauvel et al, 2023)

Toutefois, l'introduction de plantes compagnes dans un système de culture n'est pas exempte de contraintes. Plusieurs travaux soulignent que, mal pilotées, elles peuvent entrer en

concurrence avec la culture principale et entraîner des pertes de rendement significatives. Le choix des espèces, leur densité, leur date d'implantation et leur compatibilité avec l'itinéraire technique constituent donc des paramètres déterminants. Dans les systèmes betteraviers du nord de la France, les graminées apparaissent comme des espèces particulièrement intéressantes : elles sont généralement peu sensibles au gel, compatibles avec les programmes de désherbage chimique de la betterave, et faciles à intégrer dans les itinéraires existants. Les légumineuses peuvent également représenter une alternative pertinente, notamment dans les parcelles fortement infestées par des adventices graminées. Elles présentent un niveau de concurrence généralement plus faible vis-à-vis de l'azote minéral, grâce à leur capacité de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. (P. Tauvel et al, 2023)

Malgré ces résultats encourageants, la quantification précise des bénéfices sanitaires liés aux plantes de services reste complexe. Les effets observés dépendent d'un grand nombre de facteurs : conditions climatiques, pression initiale des bioagresseurs, choix des espèces, modalités de conduite, interactions avec les pratiques phytosanitaires et agronomiques, ou encore contexte pédoclimatique. Les résultats sont donc difficilement généralisables d'un territoire à l'autre ou d'une campagne à l'autre. Cette variabilité limite la possibilité de traduire directement les gains agronomiques observés en indicateurs économiques robustes et universels. (P. Tauvel et al, 2023)

Néanmoins, la majorité des études converge vers un constat commun : dans un grand nombre de situations, les plantes de services exercent des effets positifs sur la régulation des ravageurs et maladies, contribuant à réduire la pression sanitaire ou à en atténuer les impacts. Ces bénéfices, bien que dépendants du contexte, participent à la sécurisation des systèmes de culture et à la réduction du recours aux produits phytopharmaceutiques lorsqu'ils sont intégrés dans une stratégie globale de protection des cultures. (P. Tauvel et al, 2023)

Dans cette étude, afin de dépasser les limites liées à la forte variabilité des résultats agronomiques, plusieurs études de cas ont ensuite été mobilisées. Elles permettent d'illustrer, de manière concrète, à quelles économies potentielles (réduction de traitements, diminution des doses ou sécurisation des itinéraires techniques) peuvent correspondre les effets observés sur la gestion des maladies et ravageurs. Cette approche vise à proposer une lecture économique prudente et contextualisée des bénéfices sanitaires associés aux couverts végétaux, en cohérence avec les réalités de terrain. (P. Tauvel et al, 2023)

Etude de cas n°1 : Effets biocides des crucifères et économies associées

Les cultures intermédiaires de crucifères présentent un fort potentiel de gestion des bioagresseurs (champignons, bactéries, nématodes, adventices, etc.) grâce à la production de métabolites secondaires à effet biocide, les glucosinolates (GSL).

Selon Antoine Couëdel et Lionel Alletto (2018), l'introduction de crucifères en cultures intermédiaires depuis une dizaine d'années aux États-Unis s'est révélée efficace pour lutter contre la verticilliose de la pomme de terre occasionnée par *Verticillium dahliae*. Dans le cas du tournesol, la récurrence trop rapide de cette culture dans une succession blé dur–tournesol entraîne une accumulation de microsclérotas de *V. dahliae* dans le sol, augmentant les dégâts et pertes de rendement. Or, lorsque la période d'interculture peut durer jusqu'à neuf mois, l'introduction d'une crucifère à potentiel biocide apparaît comme une méthode alternative prometteuse de lutte contre les pathogènes telluriques. Au champ, l'introduction d'un couvert de moutarde brune, de navette ou de radis a permis de réduire significativement l'intensité des attaques sur le tournesol (jusqu'à -60 %) comparativement à un sol nu avant implantation (Seassau et al., 2016 ; Debaeke et al., 2017).

Les crucifères ont également montré leur intérêt vis-à-vis d'autres pathogènes telluriques. Ainsi, l'utilisation de moutarde brune en interculture a permis de réduire de 45 % l'incidence de *Rhizoctonia solani* sur betterave et de 7 % la sévérité des symptômes, avec à la clé une augmentation de rendement de 13 % par rapport au témoin sans moutarde (Motisi et al., 2009). Sur pomme de terre, l'incorporation de résidus de colza a conduit à une réduction de 65 % de l'incidence et de 70 % de la sévérité de *R. solani*, contre 45 % et 47 % pour la moutarde blanche. À l'inverse, la moutarde brune a parfois aggravé la maladie (+35 % d'incidence et +17 % de sévérité) (Larkin & Griffin, 2007). Les effets bénéfiques du colza ont été confirmés par Little et al. (2004), qui ont observé une réduction de 49 % de la sévérité et une augmentation de rendement de 27 % en pomme de terre.

Etude de cas n°2 : Effet des intercultures sur les gastéropodes (INRAE, 2012)

D'après Chabert et al. (2012), la petite limace grise ou loche (*Deroceras reticulatum*) est souvent considérée comme l'un des premiers bioagresseurs associés à la pratique des couverts. Cependant, toutes les espèces de cultures intermédiaires ne favorisent pas ces mollusques de la même manière. D'après l'étude de l'INRAE (2012) Walter et al. (1993) ont montré que les couverts semés en automne sont globalement plus favorables aux populations de *Deroceras spp.* que ceux implantés au printemps, avec néanmoins un effet site très marqué.

Des essais réalisés par Arvalis (2011) ont permis d'établir un classement des espèces en fonction de leur appétibilité pour la limace grise. Parmi les espèces les moins appétentes figurent l'avoine diploïde, la féverole d'hiver, la lentille noirâtre, la moutarde blanche, la moutarde brune, le radis fourrager, le radis chinois, la vesce commune de printemps, la vesce du Bengale et la phacélie. Les espèces de sensibilité intermédiaire incluent la gesse, le niger, l'orge d'hiver, le pois fourrager, les repousses d'orge, le trèfle incarnat, le triticale et le ray-grass italien. Enfin, certaines espèces apparaissent particulièrement attractives, comme le colza, le seigle et le tournesol. (INRAE,2012)

Il convient toutefois de souligner que les résultats ne sont pas toujours concordants. Vernava et al. (2004) ont ainsi observé que la vesce commune pouvait, dans certains contextes, accroître davantage les populations de limaces que le ray-grass italien. Dans la même étude, les auteurs ont montré que des lâchers de nématodes mollusciphages (*Phasmarhabditis hermaphrodita*) réduisaient significativement les populations de loches, et que cet effet n'était pas influencé par la nature du couvert. (INRAE,2012)

Outre l'espèce implantée et la saison d'implantation, d'autres facteurs entrent en jeu. La présence d'un mulch après destruction d'un couvert est par exemple reconnue comme un facteur favorable aux limaces (Mangan et al., 1995). Enfin, Brooks et al. (2005) ont montré que dans le cas d'un semis de trèfle violet sous couvert de blé fourrager, une densité de semis accrue (125 % de la densité normale) pouvait limiter fortement les dégâts : la protection atteignait 99 % en cas de forte infestation de *D. reticulatum*, contre seulement 55 % à une densité de 75 %. (INRAE,2012)

Etude de cas n°3 : Effet des plantes de services sur le piétin-échaudage du blé (Arvalis, 2020)

En situation de succession blé sur blé, le piétin-échaudage constitue un risque sanitaire majeur, lié au maintien de l'inoculum de *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* dans le sol et les résidus de culture. Dans ce contexte, les couverts d'interculture sont étudiés comme un levier agronomique susceptible d'influencer le fonctionnement du sol et, indirectement, la dynamique des maladies racinaires.

Les synthèses techniques réalisées par Arvalis (2020), s'appuient sur un ensemble conséquent d'essais conduits en France. Une compilation de 86 comparaisons expérimentales, menées entre 1975 et 2016, a permis d'évaluer l'effet de la présence ou de l'absence d'un couvert d'interculture entre deux blés sur le rendement du second blé. Les résultats montrent que, en moyenne, le rendement du blé suivant est équivalent, voire légèrement supérieur, lorsque l'interculture est couverte, avec un rendement moyen atteignant 102,7 % du témoin sans couvert.

En revanche, c'est l'espèce du couvert qui a le plus d'impact sur le rendement du blé. Les graminées ne sont pas systématiquement dépressives sur le blé, avec un rendement moyen de 101,1 % des témoins. Les crucifères sont un peu plus favorables (102,9 %) et les légumineuses, seules ou associées à des non légumineuses, le sont encore un peu plus (105,9 %). Cet effet positif des légumineuses avant blé est à rapprocher des effets obtenus avec des couverts dits permanents.

Dans une autre étude Arvalis,(2020), six essais ont mesuré l'impact de diverses pratiques sur le rendement d'un blé sur blé et l'attaque de piétin échaudage. Des pratiques très diverses ont été évaluées : date de semis, traitement de semences, fertilisation, couverture des sols, gestion des pailles etc. Les gains comme les pertes atteignent 7 à 8 q/ha en moyenne.

Le couvert de moutarde brune, mis en œuvre dans trois essais, a apporté un gain moyen de 0,5 q/ha. C'est très faible au regard d'autres leviers tel que le retard de la date de semis et le traitement de semences Latitude, qui peuvent en outre se cumuler.

De plus selon Triple performance, les essais menés par Arvalis ont démontré que, quelles que soient les espèces dans le couvert, le rendement moyen du 2ème blé est amélioré par rapport au témoin sans couvert.

- Les graminées en couvert amènent en moyenne + 1% de rendement ;
- Les crucifères + 3% ;
- Les légumineuses et mélanges de couverts avec légumineuses + 6%

Pour aller chercher plus que 3%, le choix des espèces est important. Il est recommandé de choisir des espèces qui se développent rapidement, moins sensibles à la chaleur, et avec des systèmes racinaires différents, ainsi que des légumineuses pour stocker de l'azote.

Etude de cas n°4 : Effet de la biofumigation sur le développement du rhizoctone brun (D. Gaucher, 2014)

Cette étude de cas vise à analyser l'effet de la biofumigation sur le développement du rhizoctone brun de la betterave (*Rhizoctonia solani*), en s'appuyant sur les connaissances acquises sur les processus épidémiologiques de la maladie ainsi que sur des données expérimentales issues d'un essai conduit au champ en 2007. Lors de cette expérimentation, trois modalités de gestion d'un couvert de moutarde brune (*Brassica juncea*) ont été comparées :

- un témoin sans moutarde,
- une culture de moutarde sans enfouissement des résidus,
- une culture de moutarde avec broyage et enfouissement des résidus, correspondant à une biofumigation complète.

La moutarde a été semée à une densité de 8 kg/ha et a produit environ 2,33 t/ha de matière sèche (D. Gaucher, 2014).

Les résultats issus de la modélisation montrent que, bien que la transmission plante-à-plante du pathogène reste relativement lente, le développement des épidémies est fortement influencé par les infections secondaires, favorisées notamment par la réduction de la distance entre plantes voisines au cours du développement de la culture. Ces infections secondaires jouent ainsi un rôle déterminant dans la dynamique épidémique du rhizoctone brun

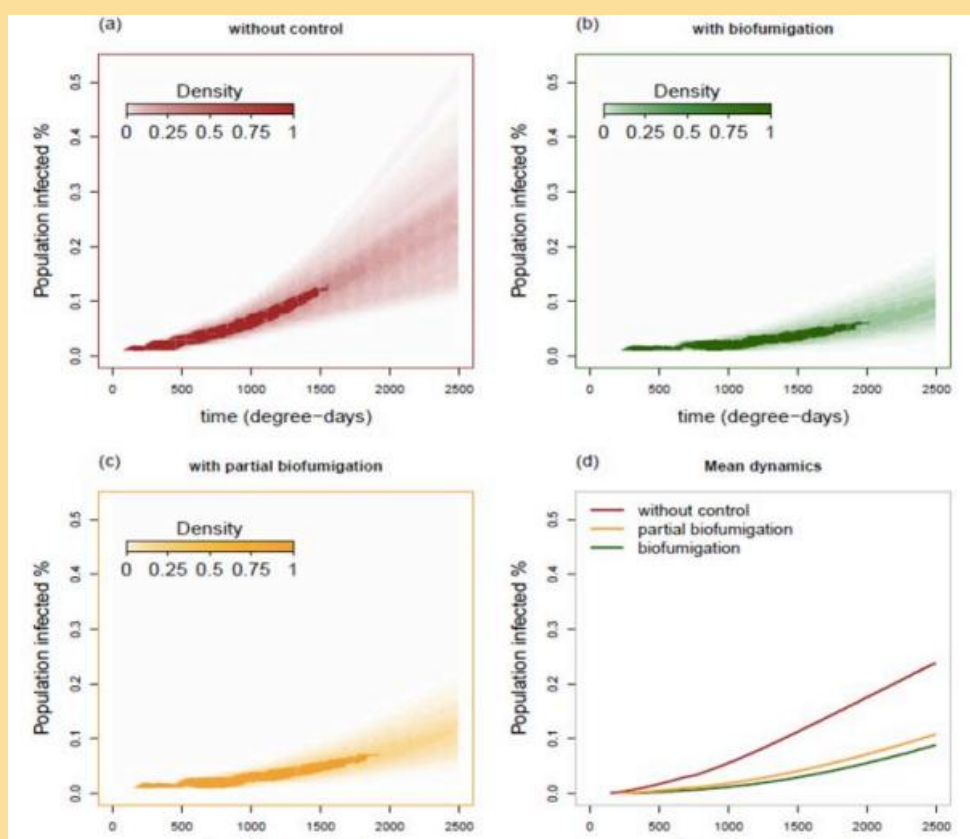


Tableau 11: Prédictions du développement des épidémies de rhizoctone brun dans une culture de betterave à sucre (étude de D. GAUCHER et al., 2014)

L'analyse des données de l'expérimentation de 2007 met en évidence que la biofumigation, qu'elle soit complète ou partielle, ne permet qu'un contrôle partiel de la maladie. Néanmoins, dans les conditions étudiées, cette pratique a permis de réduire à la fois les taux d'infection primaire et secondaire (Figure 6). (D. Gaucher, 2014).

La comparaison entre les traitements « biofumigation complète » (broyage et enfouissement des résidus) et « biofumigation partielle » (culture de moutarde sans incorporation) souligne également l'importance de la phase de culture de la moutarde elle-même. En effet, même sans incorporation des résidus, la présence de la moutarde dans la rotation a entraîné une diminution de l'incidence de la maladie, suggérant que certains effets biologiques liés à la culture du couvert contribuent déjà à limiter le développement du pathogène. (D. Gaucher, 2014).

Enfin, les simulations réalisées à partir d'un modèle stochastique indiquent que la biofumigation pourrait également contribuer à réduire la variabilité et donc l'incertitude associée au développement spatio-temporel de l'épidémie (Figure 6). Ainsi, bien que cette pratique ne constitue pas une solution de contrôle totale, elle peut participer à atténuer la dynamique épidémique et à stabiliser l'évolution de la maladie dans les parcelles. (D. Gaucher, 2014).

Tableau 12: Tableau récapitulatif des effets des plantes de services sur la gestion des maladies

Type d'effet / levier	Mécanisme agronomique	Résultats observés	Limites / conditions
Plantes compagnes (betterave)	Perturbation des pucerons (rupture visuelle, signaux chimiques), attraction des auxiliaires	Réduction des symptômes de jaunisse : -34 % (avoine), -31 % (orge), -19 % (féverole)	Effet partiel, dépend de la pression pucerons et du pilotage technique
Crucifères en interculture (biofumigation)	Production de glucosinolates à effet biocide (champignons, nématodes...)	Jusqu'à -60 % d'attaque (tournesol), -65 % incidence Rhizoctonia , +27 % rendement pomme de terre	Forte variabilité selon espèces (effets parfois négatifs), dépend des conditions pédoclimatiques
Gestion des limaces	Effet des espèces sur l'attractivité alimentaire + rôle du couvert (abri, humidité)	Espèces peu appétentes (avoine, moutarde...) vs attractives (colza, seigle) ; effet très dépendant du contexte	Résultats hétérogènes, influence forte du climat, du mulch et de la conduite
Couverts et piétin-échaudage (blé)	Effet indirect via amélioration du sol et interactions biologiques	Rendement du blé suivant : +1 % (graminées), +3 % (crucifères), +6 % (légumineuses)	Effet limité vs autres leviers (date de semis, traitements), dépend du choix des espèces
Biofumigation (moutarde – betterave)	Réduction des infections primaires et secondaires, effet sur dynamique épidémique	Diminution des taux d'infection, stabilisation des épidémies	Effet partiel, nécessite intégration dans une stratégie globale
Effet global plantes de services	Régulation biologique (auxiliaires,	Réduction de la pression sanitaire et	Résultats très dépendants du contexte (climat, pression, pratiques),

Type d'effet / levier	Mécanisme agronomique	Résultats observés	Limites / conditions
	compétition, effets chimiques)	atténuation des impacts	difficilement généralisables

La gestion des adventices



La régulation des adventices constitue l'un des principaux leviers recherchés par les agriculteurs lors de l'introduction de plantes de services dans les systèmes de culture, notamment dans une perspective de réduction de l'usage des herbicides. Toutefois, les plantes compagnes entrent en compétition non seulement avec les adventices, mais également, potentiellement, avec la culture de rente pour l'accès aux ressources (lumière, eau, nutriments). **L'enjeu réside donc dans la capacité des plantes de services à pénaliser préférentiellement les adventices, tout en limitant les effets négatifs sur la culture principale et sur le rendement.** (J. Labreuche, 2019)

Etude de cas n°1 : effets des cultures associées

Les travaux menés par Verret et al. (2017), à partir de 79 essais conduits dans le nord de la France entre 2009 et 2015, mettent toutefois en évidence une forte dépendance des performances au choix des espèces associées. Dans ses travaux, les légumineuses, et en particulier la féverole et le mélange féverole/lentille, présentent les meilleures performances globales, combinant une production de biomasse suffisante, une bonne maîtrise des adventices et un impact limité, voire positif, sur la nutrition azotée du colza. À l'inverse, certaines espèces comme le pois protéagineux, bien que très productives en biomasse, exercent une concurrence parfois excessive, pouvant réduire la croissance du colza et impacter légèrement le rendement final. Les espèces non légumineuses se distinguent par une concurrence plus marquée vis-à-vis du colza, entraînant une diminution de l'indice de nutrition azotée (INN) et une baisse significative du rendement, estimée entre 5 et 10 quintaux par hectare. Globalement, les colzas associés présentent une biomasse réduite par rapport aux colzas conduits seuls, avec une diminution moyenne de 18 % en association avec des légumineuses et de 56 % avec des non-légumineuses, traduisant un compromis à trouver entre production de biomasse de la plante de services et compétition vis-à-vis de la culture principale.

Enfin, l'évaluation de différents itinéraires techniques montre que les bénéfices du colza associé dépendent fortement du niveau d'intrants mobilisés. Les essais conduits par Valantin-Morison et al. (2019) indiquent qu'une conduite à bas niveau d'intrants améliore la marge semi-nette du colza associé, tout en renforçant les performances environnementales et sociales (réduction du nombre de passages, moindre pénibilité). À l'inverse, une conduite sans réduction d'intrants tend à dégrader la marge économique et les indicateurs environnementaux, malgré une augmentation de la production, soulignant la nécessité d'une cohérence globale de l'itinéraire technique pour tirer pleinement parti des plantes de services en colza associé.

Étude de cas n°2 : les effets des intercultures sur les adventices

La thèse d'Alicia Rouge (2023) constitue une référence intéressante pour évaluer le potentiel des couverts d'interculture dans la régulation des adventices. Ses expérimentations au champ et en serre montrent que les couverts peuvent réduire fortement la biomasse adventice en interculture, avec des niveaux de réduction atteignant 68 à 94 % selon les conditions. Toutefois, ces résultats doivent être interprétés avec prudence : ils concernent un essai précis et ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble des situations agricoles, car l'efficacité des couverts dépend de nombreux facteurs (composition spécifique, biomasse produite, conditions pédoclimatiques, flore adventice en place, méthodes de destruction, etc.).

L'étude souligne en particulier que le niveau de biomasse du couvert est déterminant : un seuil d'environ 2 t/ha de matière sèche est nécessaire pour observer un effet marqué de compétition sur les adventices. Lorsque la biomasse est élevée (> 4 t/ha), l'effet mulch des résidus au sol accentue la suppression des levées. En revanche, lorsque les couverts sont détruits par gel ou roulage, la régulation reste faible, contrairement à une destruction chimique qui permet un contrôle plus durable. De plus, si la destruction est imparfaite, les adventices peuvent bénéficier de l'azote fixé par les légumineuses, ce qui accroît leur nuisibilité dans la culture suivante.

Du point de vue économique, cette régulation peut être interprétée comme un désherbage naturel, susceptible de réduire une intervention herbicide ou mécanique en fonction du type d'intervention évitée (herbicide de post-levée, déchaumage mécanique, etc.). Néanmoins, l'effet positif n'est pas systématique : si les couverts n'atteignent pas un niveau de biomasse suffisant ou si leur destruction ne limite pas efficacement les adventices, le bénéfice économique peut être nul, voire négatif, en raison d'une perte de rendement ou de la nécessité de réaliser des passages de désherbage supplémentaires.

Ainsi, les résultats de cette thèse confirment que les couverts d'interculture peuvent constituer un levier de régulation des adventices, mais leur valorisation économique reste très dépendante du contexte.

Une distinction a été établie entre l'effet à court terme et l'effet à long terme des couverts sur la flore adventice. À court terme, c'est-à-dire pendant la période d'interculture, plusieurs expérimentations montrent que certains couverts, par leur couverture du sol, leur biomasse ou leur effet allélopathique, peuvent réduire la levée d'adventices. Toutefois, ce bénéfice reste très dépendant du choix des espèces, de la densité de semis, de la conduite, de la biomasse atteinte, des conditions climatiques et du sol. À long terme, en revanche, les recherches se poursuivent pour prouver l'efficacité des couverts d'intercultures sur les adventices dans la culture suivante.

Etude de cas n°3 : Effet des plantes de services sur la régulation des adventices et le maintien du rendement

Une étude menée par Valantin-Morison et al. (2019) s'est intéressée à la question suivante : *les légumineuses utilisées comme plantes compagnes permettent-elles d'améliorer le contrôle des adventices sans impacter le rendement de la culture de rente ?*

Dans ce cadre, les auteurs s'appuient notamment sur une méta-analyse réalisée par Verret et al. (2017), qui compile 476 observations expérimentales issues de 34 articles scientifiques.

Les résultats montrent que l'association avec une plante compagne permet, dans une proportion importante des cas, d'améliorer simultanément le contrôle des adventices et le rendement. *En comparaison avec des cultures pures non désherbées, un gain de rendement est observé dans 52 % des cas, tandis que ce gain est observé dans 34 % des cas par rapport à des cultures pures désherbées. À l'inverse, des situations caractérisées par une augmentation de la biomasse adventice ou une perte de rendement restent minoritaires, représentant respectivement 13 % et 27 % des observations selon le type de témoin considéré.*

Les bénéfices apparaissent toutefois hétérogènes selon les cultures. *Les cultures de maïs, en particulier, tirent un avantage marqué de l'association avec des plantes compagnes, avec un gain de rendement moyen de 37 % par rapport à une culture non désherbée. Cette sensibilité accrue s'explique notamment par les caractéristiques du maïs (culture à large interligne, forte demande en eau et en azote), qui le rendent particulièrement vulnérable à la concurrence des adventices.*

Tableau 13: Tableau récapitulatif sur la gestion des adventices

Levier	Mécanisme agronomique	Principaux résultats observés	Limites / conditions
Choix des espèces	Capacité de compétition, vitesse de croissance, fonctionnement biologique	Les légumineuses offrent généralement le meilleur compromis entre régulation des adventices et maintien du rendement. Les non-légumineuses sont parfois plus compétitives mais peuvent pénaliser la culture.	Le choix des espèces est déterminant ; une association mal adaptée peut entraîner une perte économique.

Levier	Mécanisme agronomique	Principaux résultats observés	Limites / conditions
Biomasse et couverture du sol	Compétition pour les ressources, effet mulch, allélopathie	Réduction de la biomasse adventice de 68 à 94 % . Les effets deviennent significatifs au-delà d'environ 2 t MS/ha et sont renforcés lorsque la biomasse dépasse 4 t MS/ha .	Dépend fortement des conditions d'implantation et de la production de biomasse.
Conduite technique	Gestion des intrants et destruction du couvert	Les systèmes bas intrants améliorent souvent la marge semi-nette. Une destruction efficace du couvert limite la repousse des adventices.	Une destruction incomplète ou un itinéraire technique inadapté peuvent générer des surcoûts de désherbage.
Plantes compagnes	Association avec la culture principale (ex. colza)	Bonne régulation des adventices avec certaines légumineuses (féverole, lentille). Dans certains cas, gain de rendement observé, notamment en maïs (jusqu'à +37 % par rapport à un témoin non désherbé).	Risque de concurrence avec la culture principale, particulièrement avec certaines non-légumineuses pouvant entraîner des pertes de rendement.
Effets à moyen et long terme	Modification progressive de la flore adventice	Réduction des levées d'adventices et amélioration de la régulation biologique.	Les effets restent variables selon les contextes et encore insuffisamment documentés sur le long terme.

Les bénéfices agronomiques des plantes de services sur la gestion des adventices sont aujourd'hui bien documentés. En revanche, leur traduction économique reste difficile à quantifier de manière robuste. Les économies potentielles en herbicides ou les gains de rendement dépendent d'un ensemble de facteurs propres à chaque système de culture et peuvent être contrebalancés par les coûts d'implantation, de gestion ou par une éventuelle concurrence avec la culture principale. Dans l'état actuel des connaissances, il n'est donc pas possible de proposer une valorisation économique unique et généralisable de cet effet.

Bénéfice 3 : augmentation de la matière organique

L'un des effets de long terme des couverts végétaux concerne la préservation et l'augmentation de la matière organique (MO) du sol, un levier pour la fertilité, la résilience climatique et le fonctionnement biologique des sols.

En l'absence de couverts, les sols agricoles, en particulier ceux soumis à un travail intensif, ont tendance à perdre progressivement leur matière organique, du fait de l'érosion, de l'oxydation de la matière organique par le travail du sol, d'une couverture végétale insuffisante et d'une faible activité biologique. Cette perte s'accompagne d'une diminution de la stabilité structurale du sol, d'une réduction de sa capacité de rétention en eau, d'un appauvrissement en nutriments disponibles, et d'une baisse de la biodiversité microbienne et faunique. À long terme, elle peut également engendrer une diminution du rendement et une plus grande vulnérabilité aux aléas climatiques.

À l'inverse, la mise en place régulière de couverts d'interculture permet de ralentir, voire d'inverser cette dynamique, en apportant une biomasse fraîche qui alimente la vie du sol et contribue à la formation d'humus. Plusieurs sources françaises confirment cette tendance. Dans le cadre du projet SOLéBIOM, Terres Inovia a mis en évidence que les couverts végétaux, notamment ceux à faible rapport C/N (légumineuses, phacélie...), favorisent à la fois une minéralisation rapide de la biomasse et un stockage progressif du carbone sous forme stable. Des estimations issues de ce projet suggèrent qu'un couvert bien implanté peut contribuer à stocker jusqu'à 1000 kg de carbone par hectare (Quae, 2022), sous réserve d'un raisonnement global du système de culture.

D'autres références confirment ces effets. L'étude de longue durée conduite par Arvalis à Boigneville) montre que sur une période de 50 ans, l'absence de couverts entraîne une baisse de 0,2 % de MO en dessous de la teneur initiale, tandis que leur présence régulière permet non seulement d'éviter cette perte, mais d'obtenir une augmentation pouvant aller jusqu'à 0,15 % au-dessus de la teneur initiale. (Arvalis, 2017)

Sur un sol initialement à 1,6 % de MO, cela représente un gain d'environ 1 t/ha/an de carbone organique stable. Ces chiffres sont cohérents avec ceux observés dans les résultats d'une étude conduite entre 2016 et 2020 par l'APAD, auprès de 30 agriculteurs se lançant dans l'agriculture de conservation, où une augmentation de 14 à 44 % de la MO dans les 10 premiers centimètres du sol a été constatée, une diminution de l'indice de battance de 0.3 et une activité microbienne deux fois plus importante selon les systèmes. (Feve, 2025)

Outre l'effet agronomique, ces apports en matière organique peuvent aussi être valorisés économiquement, à travers plusieurs leviers. Une augmentation de 0,1% de MO peut se traduire par une meilleure capacité de rétention d'eau (jusqu'à 1 à 2 mm supplémentaires par cm de sol), un meilleur relargage d'azote et de phosphore minéralisés, et une réduction des risques d'érosion, autant de facteurs qui contribuent indirectement à la sécurité de rendement.

Conséquences de la diminution de la matière organique des sols



Tableau 14: Rôles et fonctions des MO

La matière organique joue un rôle central dans le fonctionnement des sols, en intervenant dans leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. Lorsque sa teneur diminue, plusieurs fonctions essentielles du sol se dégradent. La stabilité structurale devient plus faible, ce qui entraîne une diminution de la porosité et de la capacité de rétention en eau, ainsi qu'une sensibilité accrue à la battance et à l'érosion. Sur le plan chimique, la baisse de matière organique réduit la capacité d'échange cationique (CEC) et les réserves en éléments nutritifs, limitant ainsi la fertilité du sol. Elle s'accompagne également d'une diminution de l'activité biologique, la matière organique constituant une source essentielle de carbone et d'énergie pour les organismes du sol. Ces dégradations peuvent également affecter la qualité de l'eau et de l'atmosphère, en modifiant les flux de nutriments et de carbone, ainsi que la qualité des cultures (Arvalis, 2017).

Selon Lionel Alletto, (Arvalis, 2020) cette diminution des teneurs en matière organique des sols s'explique notamment par la combinaison de plusieurs évolutions des systèmes agricoles, telles que le recul de l'élevage, l'intensification du travail du sol et l'exportation des pailles. Cette baisse peut entraîner une diminution de la stabilité des agrégats du sol, favorisant dans certains cas l'apparition de phénomènes d'érosion et conduisant à une perte progressive de fertilité des parcelles concernées.

La matière organique étant constituée en moyenne de 58 à 60 % de carbone organique, toute augmentation de sa teneur contribue également à accroître les stocks de carbone

dans le sol. Les bénéfices environnementaux associés à ce stockage, ainsi que les possibilités de valorisation économique au travers des crédits carbone et des paiements pour services environnementaux, sont présentés dans la partie consacrée au stockage du carbone.

Au-delà de cette contribution au stockage du carbone, l'augmentation de la matière organique constitue avant tout un levier majeur d'amélioration durable de la qualité des sols. Elle favorise une meilleure stabilité structurale, augmente la capacité de rétention en eau, améliore la disponibilité des éléments nutritifs et stimule l'activité biologique. Ces effets renforcent la résilience des systèmes de culture face aux aléas climatiques, limitent les risques d'érosion et participent à la préservation de la fertilité des sols sur le long terme.

Bien que ces bénéfices soient difficiles à valoriser directement sur le plan économique, ils contribuent à la sécurisation des rendements, à la réduction de certains coûts liés à la dégradation des sols et, plus largement, à la durabilité des exploitations agricoles. Ainsi, l'augmentation de la matière organique représente un investissement à long terme, dont les retombées dépassent largement la seule question du stockage du carbone.

Bénéfice 4 : Structuration du sol

Impact des plantes de services sur la compaction et la densité apparente des sols

Limitation de la compaction du sol

Le tassement du sol constitue un facteur limitant majeur du potentiel de rendement des cultures. Selon Arvalis (2024), la dégradation structurale liée aux passages répétés d'engins peut entraîner des pertes de rendement comprises entre 5 et 30 % selon les cultures et les systèmes de production. Ces pertes sont liées à la dégradation de la porosité du sol, à la limitation de l'exploration racinaire et à l'asphyxie des horizons compactés.

Les cultures les plus sensibles au tassement, comme le maïs ou la betterave sucrière, peuvent être fortement pénalisées. À titre d'exemple, pour un maïs grain produisant 7,8 à 10,7 t/ha (soit 78,4 à 107,3 q/ha selon Agreste 2025, respectivement en non irrigué et irrigué) valorisées à 180 €/t, une perte de rendement de 5 à 30 % représente un manque à gagner compris entre **70 et 580 €/ha**. Pour une betterave sucrière affichant un rendement de 80 t/ha et un prix moyen de 35 €/t (2025), cette même perte correspond à un manque à gagner compris entre **160 et 960 €/ha**. Ces montants illustrent les conséquences économiques importantes que peut engendrer un tassement du sol.

Lorsque le tassement affecte les horizons superficiels (0–20 cm), des interventions mécaniques sont possibles (travail du sol, décompactage), générant des coûts supplémentaires pour l'exploitation. Le coût d'une remise en état mécanique est généralement compris **entre 20 et 40 €/ha**. En revanche, lorsque le tassement concerne les horizons profonds (30–50 cm), aucune intervention mécanique n'est possible et la restauration des fonctionnalités du sol repose uniquement sur l'activité biologique, avec des délais pouvant atteindre plusieurs années, voire jusqu'à dix ans dans les situations les plus dégradées.

Dans ce contexte, les couverts végétaux constituent un levier agronomique essentiel pour prévenir et régénérer les sols compactés. Par leur système racinaire, ils contribuent à recréer de la porosité, à améliorer la stabilité structurale et à stimuler l'activité biologique du sol. En semis direct, des essais montrent que deux années de présence de couverts végétaux peuvent permettre de retrouver une porosité équivalente à celle d'un système labouré. D'un point de vue économique, la prévention du tassement et l'accélération de la régénération structurale permettent :

- de sécuriser le potentiel de rendement sur plusieurs campagnes,
- de réduire les coûts de remise en état mécanique,
- et de limiter les pertes de marge brute liées à la dégradation du sol.

Ainsi, les couverts végétaux ne doivent pas être considérés uniquement comme un coût d'implantation, mais comme un investissement agronomique rentable, contribuant à la durabilité des sols et à la performance économique des systèmes de culture.

Limitation de la battance

La battance correspond à la formation d'une croûte superficielle provoquée par l'impact des gouttes de pluie sur un sol nu. Cette croûte réduit fortement l'infiltration de l'eau, favorise le ruissellement et peut entraîner une levée hétérogène des cultures, une diminution des rendements ainsi qu'une augmentation des interventions mécaniques. À l'inverse, les couverts végétaux limitent la formation de cette croûte en amortissant l'énergie des précipitations, en maintenant une rugosité de surface et en améliorant progressivement la stabilité structurale du sol.

D'un point de vue économique, cette amélioration se traduit par plusieurs bénéfices :

- une levée plus homogène des cultures, réduisant le risque de perte de rendement ;
- une diminution des interventions mécaniques destinées à casser la croûte de battance (hersage, binage selon les cultures), générant une économie de temps de travail, de carburant et d'usure du matériel ;

Les travaux d'Agroleague (s.d) montrent qu'en l'absence de protection du sol, une croûte de battance peut se former après seulement **45 à 60 mm de pluie cumulée**, faisant chuter la capacité d'infiltration d'environ **30 à 50 mm/h à seulement 1 à 3 mm/h** lorsque la battance est généralisée. À l'inverse, la présence d'un couvert végétal ou d'un engrais vert suffisamment développé retarde cette dégradation de la structure du sol et contribue à maintenir une meilleure infiltration des eaux de pluie.

Service rendu	Valorisation économique
Réduction de la battance	Économie d'un passage mécanique (hersage ou binage correctif) : 20 à 50 €/ha selon le matériel utilisé et le coût de mécanisation.

Réduction de l'érosion

Chaque année, les sols français perdent en moyenne **1,5 tonne de terre par hectare sous l'effet du ruissellement des eaux** (SDES, 2022). Cette situation est aggravée par l'intensification des pratiques agricoles, la simplification des rotations, l'imperméabilisation des surfaces et l'exposition prolongée des sols nus. L'érosion entraîne une perte progressive de l'horizon fertile, perturbe la biodiversité du sol, diminue les rendements, dégrade la qualité de l'eau et peut générer des coulées de boue dommageables pour les infrastructures et les parcelles.

Les niveaux de sensibilité à l'érosion varient fortement selon les territoires.



(Source : INRAE, 2023)³

En 2020, les grandes cultures couvraient 44 % de la surface agricole utilisée, dont près d'un tiers semé au printemps, laissant de longues périodes de sol nu en automne et en hiver. Si le labour améliore temporairement l'aération du sol, il fragilise sa structure, accélère le déstockage de carbone et favorise le ruissellement et le lessivage.

À l'inverse, les techniques de conservation (non-labour, semis direct), qui concernent aujourd'hui environ 47 % des surfaces en grandes cultures, limitent ces phénomènes mais nécessitent une couverture végétale pour éviter les risques de tassement et d'enherbement. Dans ce contexte, l'implantation d'un couvert végétal hivernal, précédant aujourd'hui environ 61 % des cultures de printemps, constitue un levier majeur de protection des sols. Le feuillage limite l'impact des gouttes de pluie et réduit le ruissellement, tandis que le système racinaire améliore l'infiltration de l'eau et renforce la résistance du sol à l'arrachement. Le ruissellement et l'érosion s'en trouvent ainsi fortement réduits.

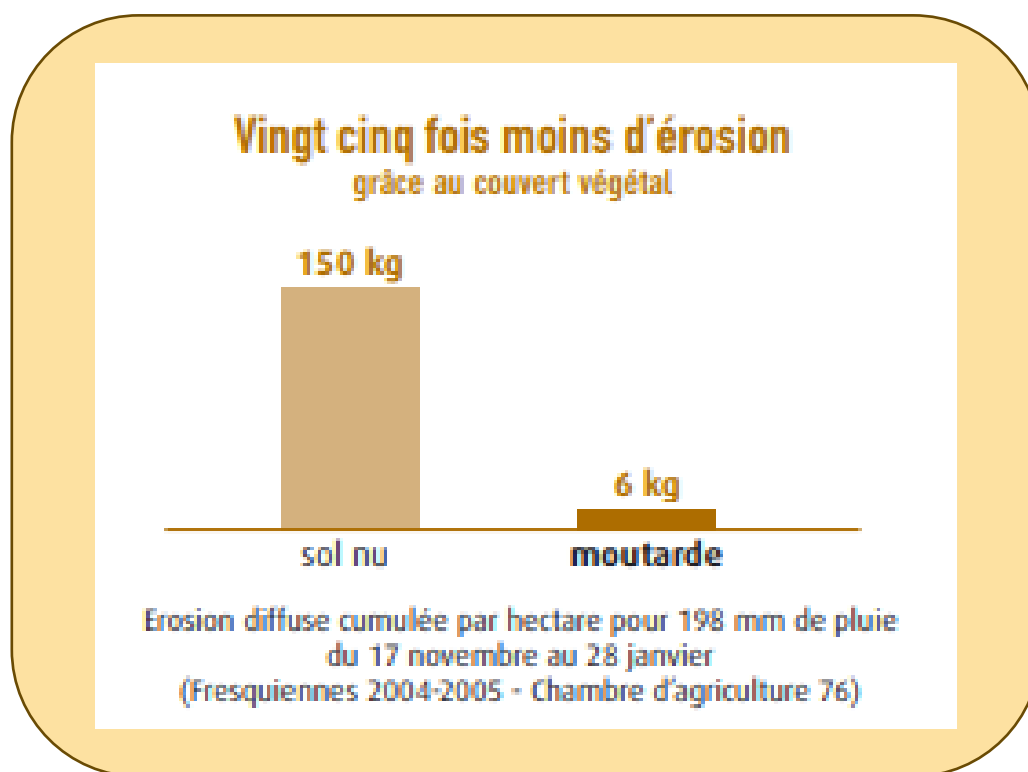
En retenant un prix moyen des terres agricoles de **6 400 €/ha** (FNSafer, 2024) et en considérant que la couche de sol travaillée représente **2 000 à 4 000 t/ha** (Arvalis), la valeur théorique d'une tonne de terre peut être estimée en divisant le prix d'un hectare par la masse de sol correspondante. Ainsi, **la valeur théorique de la terre est donc comprise entre 1,60 et 3,20 €/t.**

En retenant une densité apparente moyenne du sol de **1,3 t/m³** (Orlan, 2019), cette valeur peut être convertie en euros par mètre. La valeur théorique de la terre est donc estimée entre **2,08 et 4,16 €/m³.**

³ <https://www.inrae.fr/dossiers/peut-encore-sauver-sols/sols-menaces>

Enfin, avec une perte moyenne de **1,5 t de terre/ha/an** observée en France, la perte économique annuelle peut être estimée ainsi entre **2,4 à 4,8 €/ha/an**. Cette estimation reste toutefois très inférieure au coût réel de l'érosion, car elle ne prend pas en compte la perte de fertilité, de matière organique, de capacité de rétention en eau ni les baisses de rendement qui en découlent.

Etude de cas n°1 :



Des expérimentations menées en Seine-Maritime (Chambre d'agriculture 76, Frettiennes 2004-2005) montrent qu'un sol nu soumis à 198 mm de pluie **entre novembre et janvier** a perdu **150 kg** de terre par hectare, contre seulement **6 kg/ha** sous couvert de moutarde, soit une **réduction d'érosion d'un facteur 25**. Ces résultats illustrent l'efficacité très élevée des couverts végétaux pour limiter les transferts de terre fine.

Sur le plan économique, si l'on retient l'hypothèse d'Arvalis pour un prix moyen des terres agricoles de **6 400 €/ha**, la valeur théorique de la terre est comprise **entre 1,60 et 3,20 €/t**. Dans cet essai, **les 144 kg de terre préservés par hectare** grâce au couvert représentent une valeur patrimoniale d'environ **0,23 à 0,46 €/ha**.

Si cette valeur paraît faible, elle ne reflète que le prix de la terre. En réalité, la couche superficielle emportée par l'érosion est la plus riche en matière organique, en éléments nutritifs et en activité biologique

Etude cas n°2 : Agriculteur de Nailloux, sa perte économique en zone soumise à l'érosion

Au-delà des pertes en nutriments, l'érosion a également un impact direct sur la production agricole.

Une étude de cas (2000) réalisée dans les coteaux du Lauragais (région de Nailloux), caractérisés par une forte sensibilité à l'érosion, montre que les dégâts érosifs peuvent représenter entre 10 et 20 % du chiffre d'affaires sur une culture de tournesol.

Cette étude indique également des coûts de semis de rattrapage compris entre 500 et 1000 francs. En convertissant ces valeurs en euros (1 € soit environ 6,56 francs), sans prise en compte de l'inflation, cela correspond à des pertes de l'ordre **de 366 à 1067 €/ha**, ainsi qu'à un **coût de semis de rattrapage compris entre 76 et 152 €/ha**.

Ces ordres de grandeur, bien qu'indicatifs, illustrent l'impact économique potentiellement élevé de l'érosion dans les systèmes agricoles sensibles. (B. EL Yakime et al., 2000)

Le coût de la restauration de sol

Par ailleurs, l'érosion peut entraîner une dégradation de la structure du sol nécessitant des interventions mécaniques correctives. Ces interventions comprennent notamment le travail superficiel (déchaumage, préparation du sol) et le travail profond (labour, décompactage, sous-solage). Les références issues des barèmes de coûts agricoles situent ces interventions entre **20 et 40 €/ha** pour un travail superficiel et **entre 50 et 100 €/ha** pour un travail profond.

Au total, la dégradation du sol engendre plusieurs types de coûts pour l'exploitation agricole : **une perte de fertilité liée à l'exportation de nutriments, une perte de production pouvant atteindre plusieurs centaines d'euros par hectare dans les situations les plus sensibles**, ainsi que des coûts de restauration et d'interventions correctives. Dans ce contexte, l'érosion peut être estimée, dans le cadre de cette étude, comme représentant un coût économique global compris entre quelques dizaines d'euros par hectare dans les situations peu érosives, et plusieurs centaines d'euros par hectare dans les contextes les plus sensibles.

Tableau 15: Estimation des pertes liées à l'érosion d'un sol agricole

Type de perte	Source	Valeur économique (€/ha)
Perte de rendement	Étude Nailloux	366 à 1067 €
Semis de rattrapage	Étude Nailloux	76 à 152 €
Coût de restauration du sol	Barème entraide	20 à 40 €
Total estimé	/	Environ entre 100 €/ha et 1000 €/ha

Ces résultats mettent en évidence l'importance de considérer l'érosion non seulement comme un enjeu agronomique, mais également comme un enjeu économique. Dans cette perspective, les pratiques permettant de limiter l'érosion, telles que les couverts végétaux, contribuent à préserver le capital sol et à réduire les coûts associés à sa dégradation.

Comparaison des marges nets sur sols nus et sols couverts

Comparaison des marges entre systèmes avec sol nu et systèmes avec couvert

L'évaluation économique des cultures intermédiaires peut être réalisée à partir d'une comparaison entre deux situations agronomiques : une interculture laissée en sol nu et une interculture couverte par un couvert végétal. Cette approche permet d'intégrer à la fois les coûts d'implantation des couverts et leurs effets agronomiques sur les cultures suivantes.

Etude cas 1 : Etude Arvalis

Selon les travaux conduits par Arvalis (2006), l'implantation d'un couvert végétal représente un coût total compris **entre 70 et 100 €/ha**, incluant les semences, l'implantation et la destruction du couvert. En comparaison avec une situation de sol nu, pour laquelle certaines interventions peuvent également être nécessaires, le surcoût réel du couvert est estimé entre **20 et 45 €/ha**. (J. Labreuche et al., 2006)

Toutefois, l'analyse économique ne peut se limiter à ces coûts d'implantation. Les essais agronomiques conduits par ARVALIS montrent que les couverts végétaux peuvent influencer plusieurs composantes de la performance économique du système de culture, notamment les rendements des cultures suivantes, la fertilisation azotée et la gestion des adventices. Ces effets peuvent se traduire par une modification de la marge brute des systèmes de culture. (J. Labreuche et al., 2006)

Dans les systèmes où l'interculture est laissée en sol nu, l'absence de végétation peut entraîner une dégradation progressive de la structure du sol, une augmentation des risques d'érosion et des pertes d'azote par lixiviation. Ces phénomènes peuvent affecter la fertilité du sol et, à plus long terme, les performances agronomiques des cultures suivantes. (J.Labreuche et al.2024)

À l'inverse, les systèmes intégrant des cultures intermédiaires permettent de valoriser les reliquats azotés du sol, d'améliorer la structure et l'activité biologique des sols et de limiter certaines pertes d'éléments nutritifs. Ces effets agronomiques peuvent contribuer à stabiliser, voire à améliorer les rendements des cultures suivantes et à réduire certaines charges opérationnelles, notamment en matière de fertilisation ou de gestion des adventices. (J.Labreuche et al.2024)

MARGE NETTE AVEC COUVERT : en semis précoce, elle est identique ou améliorée par rapport au sol nu dans 10 cas sur 15

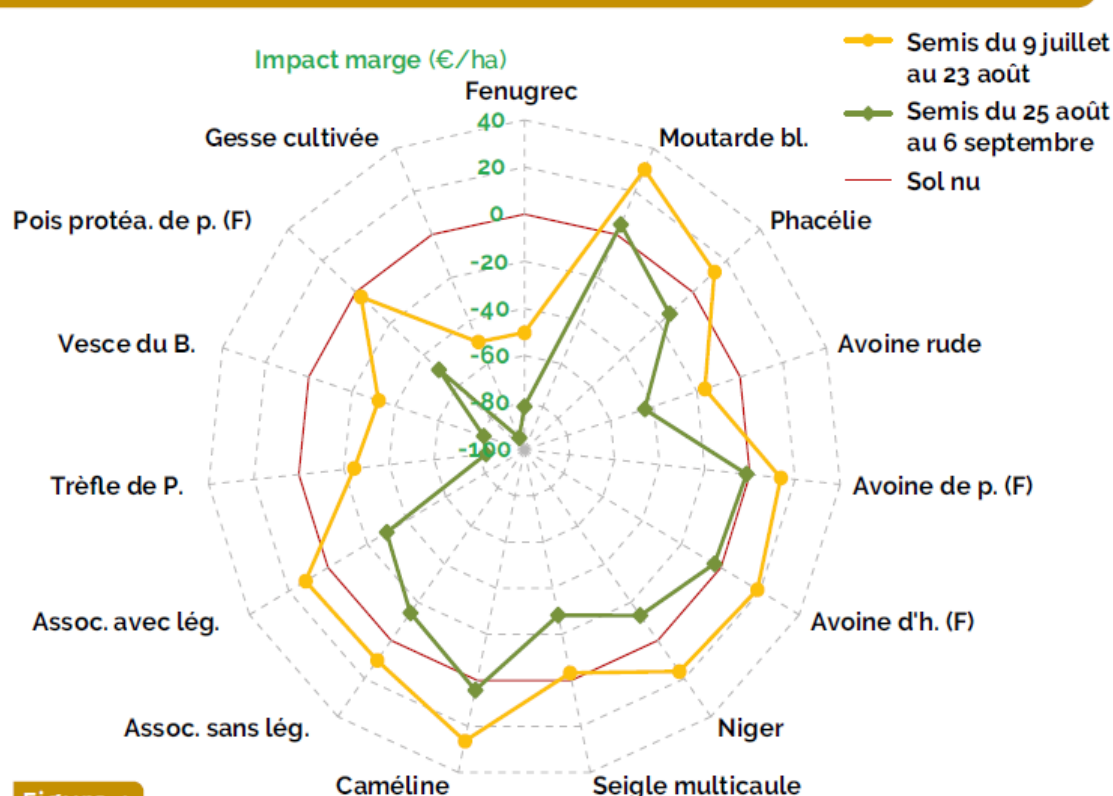


Tableau 16: Impact des couverts sur la marge brute directe par rapport à un sol nu, selon les espèces semées et la date de semis (issue de l'étude J.LABREUCHE et al. (2024))

Les résultats présentés dans la figure issue de l'étude de Jérôme Labreuche et al. (2024) montrent que l'impact des couverts végétaux sur la marge directe varie selon l'espèce implantée et la date de semis. Lorsque les couverts sont semés précocement (entre le 9 juillet et le 23 août), l'impact économique apparaît globalement favorable. Dans cette configuration, la marge nette est identique ou améliorée par rapport à un sol nu dans 10 situations sur 15, ce qui indique que les bénéfices agronomiques générés par les couverts peuvent compenser, voire dépasser, les coûts d'implantation.

Certaines espèces ou associations présentent des performances économiques particulièrement favorables. C'est notamment le cas de la moutarde blanche, de la phacélie, de la caméline ou encore de certaines associations d'espèces, qui montrent un impact positif sur la marge directe par rapport au sol nu. Ces résultats peuvent s'expliquer par leur capacité à produire rapidement de la biomasse, à valoriser les reliquats azotés et à améliorer certaines propriétés du sol, ce qui peut se traduire par une amélioration des performances agronomiques des cultures suivantes.

À l'inverse, lorsque les couverts sont implantés plus tardivement (entre le 25 août et le 6 septembre), l'impact sur la marge devient plus variable et tend à être moins favorable. Dans ces situations, la production de biomasse est généralement plus faible, ce qui limite l'expression des services agronomiques associés aux couverts. Les coûts d'implantation peuvent alors être plus difficiles à compenser par les bénéfices agronomiques. (J.Labreuche et al., 2024)

Ces résultats mettent ainsi en évidence l'importance des conditions de réussite des couverts végétaux, en particulier le choix des espèces et la date de semis. Une implantation précoce et des espèces adaptées permettent de maximiser les services agronomiques rendus par les couverts et d'améliorer leur rentabilité économique à l'échelle du système de culture. (J.Labreuche et al., 2024)

Discussion

Interprétation des résultats

L'un des principaux enseignements de cette étude est que les services rendus par les plantes de services présentent des niveaux de valorisation économique très contrastés. Si certains bénéfices peuvent être directement traduits en économies réalisées sur les intrants ou en gains de rendement, d'autres restent difficilement monétisables malgré leur importance pour le fonctionnement des agroécosystèmes. Cette hétérogénéité reflète non seulement la diversité des mécanismes biologiques impliqués, mais également les limites actuelles des méthodes de valorisation économique des services écosystémiques.

Afin de comparer les différents bénéfices identifiés, les résultats des valorisations économiques réalisées au cours de cette étude ont été synthétisés dans la figure 9.

Comparaison économique : sol nu vs sol couvert

A partir des résultats obtenus dans le cadre cette étude nous pouvons construire les tableaux suivants :

Service	Sol nu min (€/ha)	Sol nu max (€/ha)
Tassement	-70	-960
Battance	-20	-150
Azote	-15	-70
Érosion	-0,23	-0,46
Phosphore	-0,26	-2,78
Soufre	-0,6	-12
Carbone	/	/

Tableau 17: Les pertes potentielles sur un sol nu

Service	Sol couvert min (€/ha)	Sol couvert- max (€/ha)
Tassement	/	/
Battance	/	/
Azote	+15	+105
Érosion	/	/
Phosphore	/	/
Soufre	/	/
Carbone	+9	+128

Tableau 18: Les gains potentiels sur un sol couvert

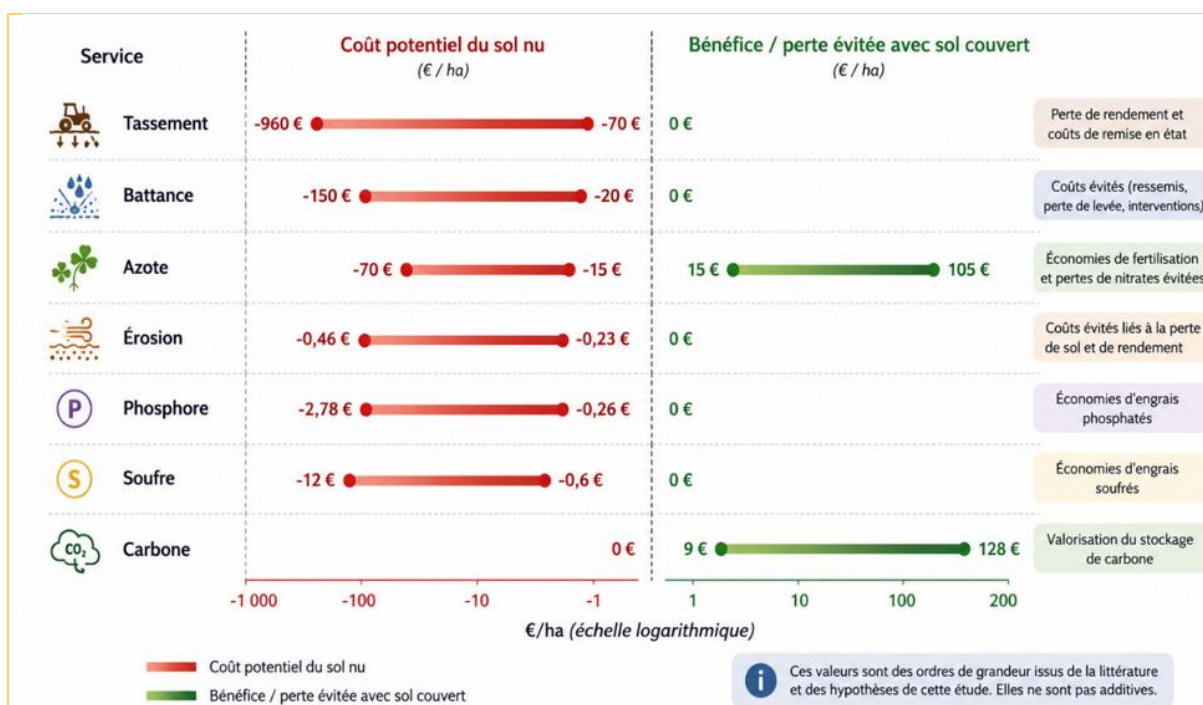


Tableau 19 : Récapitulatif des différences économique (en €/ha) entre sol couvert et sol nu

La figure compare les conséquences économiques potentielles d'un système cultivé sur un sol laissé nu à celles d'un système intégrant des plantes de services. Contrairement aux chapitres précédents, qui analysaient chaque service de manière indépendante, cette représentation permet de mettre en évidence l'effet global des couverts végétaux sur plusieurs postes de pertes ou de bénéfices identifiés dans la littérature.

La figure 20 a été construite à partir des valorisations économiques réalisées dans cette étude. Les valeurs retenues correspondent aux hypothèses présentées dans les chapitres précédents concernant le stockage du carbone, la fixation de l'azote, le recyclage du phosphore et du soufre, ainsi que la prévention du tassement et de l'érosion. Pour chaque indicateur, le sol nu représente le coût potentiel associé à l'absence de plantes de services (pertes économiques ou absence de valorisation), tandis que le sol couvert représente les pertes évitées ou les bénéfices potentiellement générés grâce à l'implantation d'un couvert.

Il convient toutefois de souligner que ces valeurs ne peuvent pas être additionnées. **Chaque poste a été calculé indépendamment, selon des hypothèses spécifiques et dans des contextes agronomiques différents.** Par ailleurs, plusieurs services sont interdépendants. Par exemple, la réduction de l'érosion contribue également à limiter les pertes de phosphore et de matière organique, tandis que l'amélioration de la structure du sol favorise **simultanément le stockage du carbone**. Les montants présentés correspondent donc à des ordres de grandeur destinés à illustrer l'intérêt économique potentiel des plantes de services et non à établir un bilan économique global.

La comparaison met en évidence une forte hétérogénéité des bénéfices selon les services considérés. **Les économies potentielles les plus importantes concernent la prévention du tassement, dont les conséquences sur le rendement des cultures et les coûts de remise en état peuvent représenter plusieurs centaines d'euros par hectare dans les situations les plus défavorables.** Ce résultat souligne que la principale valeur économique des plantes

de services réside souvent dans leur capacité à préserver le potentiel de production plutôt que dans la seule réduction des achats d'intrants.

À l'inverse, les valorisations économiques associées au phosphore et au soufre apparaissent relativement modestes. Cette observation ne remet pas en cause leur intérêt agronomique. Elle traduit principalement le fait que leur valorisation repose uniquement sur le coût des unités fertilisantes économisées, sans intégrer les bénéfices indirects associés au maintien de la fertilité du sol, à l'amélioration de l'efficacité de la fertilisation ou à la réduction des impacts environnementaux.

Bien que la valorisation économique du carbone reste aujourd'hui dépendante du développement des marchés du carbone et des dispositifs tels que le Label Bas-Carbone, il constitue un levier de plus en plus important dans le contexte de la transition agroécologique et des politiques d'atténuation du changement climatique. Au-delà de sa valorisation financière potentielle, l'augmentation du stock de carbone participe également à l'amélioration de la matière organique, de la structure du sol et de sa capacité de rétention en eau, générant ainsi des bénéfices agronomiques supplémentaires qui ne sont pas directement intégrés dans les calculs économiques.

Enfin, cette comparaison illustre que l'absence de plantes de services représente un coût pour l'exploitation agricole. En laissant le sol nu entre deux cultures, l'agriculteur renonce non seulement aux bénéfices liés au recyclage des éléments nutritifs ou au stockage du carbone, mais également aux effets plus durables sur la qualité des sols et la résilience des systèmes de culture. Ainsi, si certaines valorisations économiques demeurent modestes lorsqu'elles sont considérées isolément, leur combinaison contribue à renforcer progressivement la durabilité économique, agronomique et environnementale des exploitations. Cette approche confirme que les plantes de services doivent être envisagées comme un investissement dans le capital sol plutôt que comme une simple charge culturale.

Intérêt économique des mélanges intégrant des légumineuses

Les couverts mono-espèces, comme une moutarde, une phacélie ou une avoine, sont souvent choisis pour leur simplicité d'implantation, leur coût généralement plus faible et leur capacité à couvrir rapidement le sol. Toutefois, lorsqu'ils ne comportent pas de légumineuses, leur intérêt économique lié à la restitution d'azote reste limité, ces espèces ne fixant pas l'azote atmosphérique. À l'inverse, les mélanges intégrant une ou plusieurs légumineuses permettent de combiner plusieurs fonctions : couverture du sol, concurrence vis-à-vis des adventices, production de biomasse et fixation biologique de l'azote.

L'étude d'Agroscope (2013) a évalué les performances de 27 espèces de légumineuses cultivées en pur puis en association avec de la phacélie ou de l'avoine. Les résultats mettent

en évidence une forte variabilité entre les espèces : la quantité d'azote fixée varie de quelques kilogrammes à près de 150 kg N/ha en trois mois de végétation, selon l'espèce considérée. Les espèces les plus performantes, comme la féverole, la vesce commune, la vesce velue ou le pois protéagineux, sont également celles qui produisent le plus de biomasse, couvrent le plus rapidement le sol et limitent le mieux le développement des adventices.

Toutefois, l'azote fixé dans la biomasse n'est pas intégralement valorisé par la culture suivante. Les références suisses de fumure (DBF), reprises dans l'étude, retiennent ainsi une réduction de fertilisation de **20 à 30 kg N/ha** après un couvert à base de légumineuses, correspondant à la fraction effectivement mobilisable par la culture suivante.

Tableau 20: Valorisation selon les références Agroscope

Situation	Réduction de fertilisation retenue (kg N/ha)	Valeur économique estimée (€/ha)
Couvert simple sans légumineuses	0	0
Couvert avec légumineuses – hypothèse basse	20	20 à 28
Couvert avec légumineuses – hypothèse haute	30	30 à 42

Les données d'Arvalis (2026) vont dans le même sens : les couverts de légumineuses peuvent fournir **30 à 40 kg N/ha** à la culture suivante lorsque le couvert est suffisamment développé, et jusqu'à environ **100 kg N/ha** dans les situations de forte biomasse.

Le témoignage d'Édouard Debled, chef produit chez un semencier, complète ces résultats en montrant que les progrès variétaux et la conception des mélanges ont amélioré la restitution d'azote. Selon lui, les mélanges historiques restituaient généralement **10 à 20 unités d'azote**, tandis que les mélanges de nouvelle génération atteignent désormais environ **40 unités en moyenne**, avec des situations pouvant approcher **90 unités**.

Tableau 21: Valorisation économique des restitutions observées dans les mélanges

Type de mélange	Azote restitué (unités/ha)	Valeur économique estimée (€/ha)
Mélanges historiques	10 à 20	10 à 28
Mélanges nouvelle génération	40	40 à 56

Type de mélange	Azote restitué (unités/ha)	Valeur économique estimée (€/ha)
Conditions très favorables	90	90 à 126

Ces résultats montrent que l'intérêt économique des mélanges ne repose pas uniquement sur la présence d'une légumineuse, mais sur le choix des espèces, des variétés et de leur complémentarité. G. Louarn et al. (2016) rappellent que, dans les associations graminées-légumineuses, la fixation symbiotique peut représenter **plus de 80 à 85 % de l'azote absorbé par la légumineuse**, et que la quantité d'azote fixée dépend fortement de la biomasse produite.

Ainsi, par rapport à un couvert simple sans légumineuse un couvert multi-espèces à base de légumineuses présente un intérêt économique plus élevé dès lors qu'il produit suffisamment de biomasse et que l'azote fixé est effectivement valorisé par la culture suivante. Le gain direct peut être estimé entre **20 et 42 €/ha**, et peut atteindre des niveaux plus élevés dans les situations favorables, notamment lorsque les mélanges plus élaborés.

Limites de l'étude

Si cette étude s'appuie sur un corpus important de références scientifiques et techniques françaises, il convient néanmoins de souligner plusieurs limites liées à la documentation disponible sur les couverts végétaux et leur valorisation économique. En premier lieu, une grande partie des travaux existants repose sur des essais agronomiques expérimentaux conduits en station ou sur des réseaux de parcelles pilotes. Ces dispositifs permettent d'analyser finement les mécanismes biophysiques à l'œuvre, mais ils ne reflètent pas toujours la diversité des contextes rencontrés en conditions réelles d'exploitation. Les résultats issus de ces essais doivent donc être interprétés avec prudence lorsqu'ils sont transposés à l'échelle de l'ensemble des systèmes agricoles.

Par ailleurs, la majorité des références disponibles sont orientées vers une approche agronomique ou environnementale des couverts végétaux. Les bénéfices en termes de piégeage de l'azote, de réduction de l'érosion, d'amélioration de la structure du sol ou de stockage du carbone sont relativement bien documentés. En revanche, les travaux intégrant une véritable approche économique globale restent encore très peu nombreux. Les études proposant une quantification monétaire directe des services écosystémiques rendus par les couverts sont rares et souvent hétérogènes dans leurs méthodes, leurs hypothèses et leurs périmètres d'analyse. Cette hétérogénéité rend difficile la comparaison directe entre les différentes sources et impose un travail d'harmonisation méthodologique.

La littérature montre également une forte variabilité des résultats selon les espèces de couverts, les mélanges utilisés, les dates d'implantation, la durée de l'interculture et les conditions pédoclimatiques. De nombreux travaux insistent sur le fait que les performances

des couverts sont très sensibles à la réussite de leur implantation et à la production de biomasse. Or, ces paramètres sont rarement décrits de manière suffisamment détaillée dans les publications techniques, ce qui limite parfois la reproductibilité des résultats ou leur transposition à d'autres contextes.

L'approche développée repose sur la valorisation économique de plusieurs services agronomiques mesurables, tels que la séquestration du carbone, la dynamique de l'azote, la réduction des pertes de phosphore, la structuration du sol, la limitation de l'érosion et la sécurisation du rendement. Toutefois, de nombreux services écosystémiques rendus par les couverts végétaux restent difficilement quantifiables sur le plan économique. La régulation biologique des ravageurs, l'amélioration de la biodiversité fonctionnelle, l'augmentation de la MO, la régulation des adventices, la résilience face aux aléas climatiques, la stabilité interannuelle des rendements ou encore les bénéfices paysagers et sociétaux ne sont que partiellement pris en compte. Or, ces services jouent un rôle central dans la durabilité des systèmes agricoles et leur non-intégration conduit probablement à une sous-estimation de la valeur réelle des couverts végétaux à l'échelle des territoires.

De plus, les performances agronomiques et économiques des couverts végétaux sont en effet fortement dépendantes des conditions pédoclimatiques dans lesquelles ils sont implantés. Leur efficacité varie selon la nature du sol, sa texture, sa profondeur, sa réserve utile et sa teneur en matière organique, mais également selon le régime hydrique, les températures automnales et hivernales, la durée de l'interculture ainsi que la date d'implantation du couvert. Dans les contextes à interculture courte, à sols superficiels ou soumis à des stress hydriques marqués, la production de biomasse peut être limitée, réduisant l'expression de certains services agronomiques comme le piégeage de l'azote, la protection contre l'érosion ou la structuration du sol. À l'inverse, dans les systèmes à interculture longue, à sols profonds et bien pourvus en eau, les couverts expriment pleinement leur potentiel. Les valeurs économiques proposées correspondent donc à des moyennes issues de la littérature scientifique et technique française et ne sauraient être transposées uniformément à toutes les exploitations sans une analyse préalable du contexte local.

La valorisation économique proposée repose également sur un certain nombre d'hypothèses relatives aux prix des engrais minéraux, aux prix des productions agricoles, à la valorisation du carbone et à l'estimation des pertes évitées. Or, ces paramètres sont fortement dépendants de la conjoncture économique, de la volatilité des marchés agricoles, du contexte géopolitique et des politiques publiques. Une hausse du prix des engrais renforce mécaniquement la rentabilité des couverts par les économies d'azote et de phosphore qu'ils permettent, tandis qu'une baisse du prix des céréales réduit la valeur économique des rendements sécurisés. Les ordres de grandeur présentés dans cette étude sont donc susceptibles d'évoluer dans le temps et nécessitent une actualisation régulière pour rester pertinents.

En outre, cette étude se concentre principalement sur la valorisation des bénéfices économiques générés par les couverts végétaux. Les coûts d'implantation, incluant les semences, le semis, la destruction et la gestion de l'interculture, ne font pas l'objet d'un chiffrage détaillé par système de culture. Or, ces coûts peuvent varier sensiblement selon les espèces choisies, les mélanges, la densité de semis, les modalités d'implantation et les techniques de destruction. Selon les situations, le coût total d'un couvert peut représenter plusieurs dizaines d'euros par hectare, ce qui nécessite une analyse technico-économique complète à l'échelle de l'exploitation pour établir un bilan net précis intégrant l'ensemble des charges opérationnelles.

Enfin, cette étude adopte une approche principalement agronomique et biophysique. Elle ne prend pas directement en compte les contraintes organisationnelles, la charge de travail supplémentaire, la disponibilité du matériel, les stratégies individuelles des exploitants ou encore les freins techniques et psychologiques à l'adoption des couverts végétaux. Or, l'intégration des couverts relève autant de décisions techniques que de choix économiques et humains. Une approche socio-économique complémentaire permettrait d'enrichir la compréhension des leviers et des freins à leur diffusion.

Malgré ces limites, cette étude fournit une base méthodologique robuste pour appréhender la valeur économique des couverts végétaux. Elle montre que, même avec une approche prudente et conservatrice, les bénéfices générés sont significatifs et justifient pleinement l'intérêt porté à ces pratiques dans les stratégies de transition agroécologique.

Conclusion

L'analyse conduite dans cette étude met en évidence que les plantes de services peuvent contribuer de manière significative à la performance économique et agronomique des systèmes de culture. En mobilisant des données issues de la littérature scientifique et technique, cette étude a permis d'illustrer les ordres de grandeur des bénéfices potentiels associés à plusieurs services rendus par les couverts végétaux, notamment la restitution d'azote, la séquestration de carbone, l'amélioration des rendements ou encore la limitation de certaines dégradations du sol.

Les résultats montrent que, lorsque l'on raisonne à l'échelle du système de culture, les bénéfices générés par les plantes de services peuvent compenser, voire dépasser, les coûts d'implantation des couverts. Cette analyse met également en évidence que l'absence de couverture végétale durant l'interculture peut engendrer des pertes économiques indirectes liées à la dégradation des sols ou à la perte d'éléments nutritifs. Dans ce contexte, l'implantation d'un couvert peut être considérée non seulement comme une pratique agronomique favorable, mais aussi comme un levier de sécurisation et d'optimisation économique à moyen terme.

Toutefois, ces bénéfices dépendent fortement des modalités de mise en œuvre des couverts. Le choix des espèces, la date de semis, la gestion de la biomasse et l'intégration dans la

rotation culturale sont autant de facteurs déterminants pour maximiser les services rendus. À cet égard, il convient de distinguer les couverts implantés principalement pour répondre à une obligation réglementaire des couverts conçus comme de véritables outils agronomiques. Dans le second cas, un choix raisonné des espèces et des mélanges permet d'optimiser les bénéfices agronomiques et économiques associés aux plantes de services.

Dans cette perspective, l'utilisation de semences de qualité, certifiées ou commerciales, constitue un élément important. Des semences sélectionnées et contrôlées garantissent une meilleure implantation du couvert, une production de biomasse plus régulière et une expression plus efficace des services agronomiques recherchés. Le recours à des mélanges d'espèces adaptés aux objectifs agronomiques et aux conditions pédoclimatiques peut également permettre d'améliorer l'efficacité des couverts.

Il convient néanmoins de rappeler que cette étude vise avant tout à apporter un premier niveau de connaissance sur la valorisation économique des plantes de services. Les estimations présentées reposent sur des données issues de la littérature et doivent être interprétées comme des ordres de grandeur, susceptibles de varier selon les contextes pédoclimatiques, les systèmes de culture et les modalités de conduite des couverts. Pour une mise en œuvre opérationnelle ou pour obtenir des références techniques plus précises, il est recommandé de se référer aux travaux et aux outils développés par les instituts techniques agricoles, les chambres d'agriculture et les organismes de conseil spécialisés, qui disposent de données expérimentales et de recommandations adaptées aux différents contextes territoriaux.

Enfin, cette analyse met également en lumière certains domaines pour lesquels les connaissances restent encore partielles. La valorisation économique de certains services écosystémiques, notamment ceux liés à la biodiversité, à la gestion des maladies, à la gestion des adventices ou encore la limitation de l'érosion, demeure difficile à quantifier de manière précise. Cette approche ouvre ainsi des perspectives intéressantes pour la recherche, en identifiant plusieurs thématiques pour lesquelles des travaux complémentaires seraient nécessaires, afin d'améliorer la quantification et la reconnaissance économique des services rendus par les plantes de services.

Dans un contexte de transition agroécologique et de recherche de systèmes agricoles plus durables, les plantes de services apparaissent ainsi comme un levier agronomique et économique prometteur, à condition d'être intégrées dans une approche systémique et raisonnée des systèmes de culture.

Bibliographie

Agro-Transfert Ressources et Territoires. (s.d.). *Battance*. <https://cultivons-les-couverts.agro-transfert-rt.org/battance>

Agro-Transfert Ressources et Territoires. (s.d.). *Pertes d'azote*. <https://cultivons-les-couverts.agro-transfert-rt.org/pertes-d-azote>

AgroLeague. (s.d.). *Battance d'un sol agricole : trois manières de s'en prémunir (ou de s'en sortir)*. <https://www.agro-league.com/analyse-de-sol/croute-de-battance>

Agroscope, Gebhard, C.-A., Büchi, L., Liebisch, F., Sinaj, S., Ramseier, H., & Charles, R. (2013). *Screening de légumineuses pour couverts végétaux : azote et adventices*. Recherche Agronomique Suisse, 4(9), 384-393.

Alletru, C., & Labreuche, J. (2019). *Impact du travail du sol et des couverts végétaux en interculture sur la gestion des adventices en grandes cultures*. https://www.researchgate.net/profile/Jerome-Labreuche/publication/337745028_IMPACT_DU_TRAVAIL_DU_SOL_ET_DES_COUVERTS_VEGETAUX_EN_INTERCULTURE

ARVALIS – Institut du végétal. (2017). *Des effets variés sur le fonctionnement des sols*. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/des-effets-varies-sur-le-fonctionnement-des-sols>

ARVALIS – Institut du végétal. (2020). *Culture intermédiaire entre deux blés : les bénéfices à en attendre*. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/un-couvert-dinterculture-profite-au-ble-tendre-qui-suit>

ARVALIS – Institut du végétal. (2020, 24 septembre). *Pourquoi restaurer les stocks de matière organique dans les sols ?* ARVALIS – Institut du végétal. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/pourquoi-restaurer-les-stocks-de-matiere-organique-dans-les-sols>

ARVALIS – Institut du végétal. (2020). *Valoriser la fonction puits de carbone des cultures*. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/valoriser-la-fonction-puits-de-carbone-des-cultures>

ARVALIS – Institut du végétal. (2024). *Tassements du sol : de la prévention à la correction*. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/tassement-du-sol-de-la-prevention-la-correction>

ARVALIS – Institut du végétal. (2026). *Azote cher et récoltes précoces : une opportunité pour insérer un couvert de légumineuses ?* <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/prix-eleve-de-lazote-queelles-economies-attendre-des-couverts-de-legumineuses>

Blanco-Canqui, H., et al. (2020). *Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils*. Agronomy Journal.

Commission européenne. (2019). *Le Pacte vert pour l'Europe*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr

Commission européenne. (2020). *De la ferme à la fourchette : pour un système alimentaire équitable, sain et respectueux de l'environnement*.

https://commission.europa.eu/food-farming-fisheries/sustainability/food-systems/farm-fork-strategy_fr

Connaissance des Énergies. (2025). *Gaz à effet de serre : qu'est-ce que l'équivalent CO₂ ?* <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/gaz-effet-de-serre-quest-ce-que-lequivalent-co2>

Couëdel, A., Seassau, C., Wirth, J., & Alletto, L. (2017). *Potentiels de régulation biotique par allélopathie et biofumigation : services et dis-services produits par les cultures intermédiaires multiservices de crucifères*. *Innovations Agronomiques*, 62. <https://doi.org/10.15454/1.517407346984539E12>

El Yakime, B., & Jean-François. (2000). *Gestion de la lutte contre une érosion de versant avec dégâts sur site public*. https://www.persee.fr/doc/ecoru_0013-0559_2000_num_257_1_5182

Enjalbert, J., et al. (2019). *Innovations Agronomiques*. <https://agritrop.cirad.fr/592778>

Favarez, A., Favrot, A., Tauvel, P., Makowski, D., & Maupas, F. (2023). *Réduire les symptômes de la jaunisse de la betterave sucrière grâce à des plantes compagnes*.

Fédération nationale des Cuma. (2024). *Barème d'entraide 2024-2025*. <https://www.cuma.fr/resource/bareme-dentraide-2024-2025/>

FEVE. (2025). *L'agriculture de conservation des sols : la solution pour demain ?* <https://www.feve.co/installation/ressources-installation/agriculture-conservation-des-sols>

FNSafer. (2024). *Le prix des terres agricoles en France*. <https://www.safer.fr/observer-les-prix-des-terres>

Gaucher, D., Champeil, A., Le Hingrat, Y., Mille, B., Garson, S., et al. (2014). *Réduire l'impact des maladies telluriques dans les systèmes de cultures par une protection intégrée et durable des grandes cultures*. *Innovations Agronomiques*, 34, 51-65. <https://doi.org/10.17180/t12n-cs80>

INRAE. (2012). *Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote et autres services écosystémiques*. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/62fdb4616902dd206e5de81781368d3f.pdf>

INRAE. (2023). *Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles*. https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/RegulNat-synthèse_12-12-23_V3.pdf

Jian, J., et al. (2020). *A global meta-analysis of cover crop effects on soil organic carbon*. *Soil Biology and Biochemistry*, 143, 107735.

Justes, E., & Richard, G. (coord.). (2017). *Les plantes de services : vers de nouveaux agroécosystèmes*. Éditions Quae.

Kätterer, T., Bolinder, M. A., Berglund, K., & Kirchmann, H. (2011). *Strategies for increasing soil carbon sequestration under arable farming in the Nordic region*. *Acta Agriculturae Scandinavica*.

Labreuche, J., Laurent, F., Moquet, M., Protin, P.-V., & Aubrion, G. (2006). *La protection des eaux pour un surcoût de 20 à 45 €/ha*. Perspectives Agricoles, n°321.

Labreuche, J., Forrler, J.-L., Mignot, É., Brives, J., & Franche, M. (2024). *S'y retrouver dans les espèces d'interculture*. Perspectives Agricoles, n°521.

Louarn, G., Faverjon, L., Bijelić, Z., & Julier, B. (2016). *Dynamique de l'azote dans les associations graminées-légumineuses : quels leviers pour valoriser l'azote fixé ?* Fourrages, 226, 135-142.

Mazzoncini, M., et al. (2011). *Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon*. Soil and Tillage Research.

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. (2019). *Document technique sur les plantes de services*. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/129661>

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. (s.d.). *Directive Nitrates – Zones vulnérables et obligations de couverture des sols*. <https://www.ecologie.gouv.fr/directive-nitrates>

Mollier, A., Denoroy, P., & Morel, C. (s.d.). *Évaluation de la disponibilité et de la gestion du phosphore dans les agrosystèmes : avancées scientifiques et techniques*. Académie d'Agriculture de France.

ORION. (2019). *Fiches techniques – Indicateurs de la qualité du sol*. <https://aprel.fr/wp-content/uploads/Orion-Fiches-qualite-sol.pdf>

Quae. (2024). *Les plantes de services : vers de nouveaux agroécosystèmes*. <https://books.google.fr/books?id=PiU2EQAAQBAJ>

SIDES. (2022). *Les sols en France : synthèse des connaissances en 2022*. Service des données et études statistiques. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-sols-en-france-synthese-des-connaissances-en-2022>

Simon, J.-C., & Le Corre, L. (1992). *Fertilisation des cultures annuelles et lessivage de l'azote nitrrique*. Fourrages, 129, 3-10.

Triple Performance. (s.d.). *Choisir un couvert végétal*. https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Choisir_un_couvert_vegetal

Tribouillois, H., et al. (2017). *Acquisition des ressources et production de services écosystémiques par les mélanges bi-spécifiques de cultures*. Innovations Agronomiques, 62.