

CRUCIAL - Services écosystémiques produits par les cultures intermédiaires multiservices de légumineuses et de crucifères

Couëdel A.^{1,4}, Alletto L.¹, Justes E.⁴, Desplanques J., David P.⁵, Valladares L.³, Brin A.³, Seassau C.²

¹ Université de Toulouse, INRAE, UMR AGIR, F-31320 Castanet-Tolosan

² Université de Toulouse, INRAE, INP-EIPURPAN, UMR AGIR, F-31320 Castanet-Tolosan

³ Université de Toulouse, INRAE, INP-EIPURPAN, UMR DYNAFOR, F-31320 Castanet-Tolosan

⁴ Cirad, Département PERSYST, F-34398 Montpellier

⁵ ARVALIS – Institut du Végétal, F-30900 Nîmes

Correspondance : celia.seassau@purpan.fr

Résumé

Les mélanges de cultures intermédiaires multiservices (CIMS) de crucifères et de légumineuses permettent une mutualisation des services écosystémiques liés aux cycles de l'azote, du soufre, et à leur potentiel de bio-contrôle sur des bioagresseurs et ravageurs telluriques. Leur association permet d'atteindre un effet piège à nitrate et à sulfate similaire aux CIMS de crucifères pures tout en produisant un meilleur effet engrais vert pour l'azote. Le potentiel de bio-contrôle des CIMS de crucifères a été évalué par leur production de glucosinolates (GSL) qui varie fortement entre les espèces mais peu entre variétés d'une même espèce. Les GSL de type aliphatique contenus dans le radis fourrager semblent les plus à même de réduire l'incidence et la sévérité du *Verticillium dahliae* sur le tournesol au champ. Aucun effet larvicide ou larvifuge des crucifères n'a pu être mis en évidence sur les larves d'*Agriotes sordidus* du maïs contrairement au tourteau de moutarde éthiopienne qui augmente significativement la mortalité des larves en conditions contrôlées.

Mots-clés : Contrôle cultural, Interculture, Engrais vert, Association d'espèces, Glucosinolates, *Verticillium dahliae*, *Agriotes sordidus*

Abstract: Ecosystemic services provided by legumes or crucifers used as cover crops

Crucifers and legumes multi-services cover crop mixtures are an effective solution to mutualize ecosystem services related to nitrogen and sulphur cycle while providing a high biocontrol potential on soil-born pathogens. Mixtures provide the same nitrate and sulfate catch crop services and increase the nitrogen recycling green manure service compared to crucifers alone. Biocontrol potential of crucifer cover crops was assessed through their glucosinolate (GSL) production (profile and concentration) which vary according to the species but not among cultivars of the same species. In field conditions aliphatic GSL produced by forage radish seems to reduce incidence and severity of *Verticillium dahliae* on sunflower. No mortality or flight on wireworm effect from crucifers was highlighted on *Agriotes sordidus* wireworm of maize. Ethiopian mustard seed meal significantly increased wireworm mortality in controlled conditions.

Keywords: Cultural control, Fallow period, Green manure, Mixtures, Glucosinolates, *Verticillium dahliae*, *Agriotes sordidus*

Introduction

L'implantation de cultures intermédiaires multi service (CIMS) peut être un levier agronomique efficace pour la re-conception agro-écologique des systèmes de culture. Elles peuvent offrir divers services écosystémiques comme la fixation symbiotique d'azote par des légumineuses et le recyclage d'éléments minéraux (azote et soufre) par leur effet engrais vert. Un contrôle biologique de bioagresseurs telluriques des cultures apparaît également possible au travers de l'introduction de crucifères par la libération et dégradation de composés volatiles biocides, les glucosinolates (GSL), lors de la destruction des couverts ; c'est le principe de biofumigation (Matthiessen et Kirkegaard, 2006). Pour autant, quelle que soit la régulation biologique visée, il est apparu qu'un effort expérimental de caractérisation des potentialités variétales d'espèces de CIMS de légumineuses et de crucifères en cultures monospécifiques ou en mélange était indispensable à une meilleure explication et maîtrise des mécanismes de régulation impliqués. Les services produits par ces CIMS ont donc été évalués sur leurs effets engrais vert, piège à soufre et à nitrate, ainsi que sur leur effet biofumigant contre le *verticillium* du tournesol et le taupin du maïs.

1. CIMS et complémentarité de services écosystémiques par les associations de légumineuses et de crucifères.

Les cultures intermédiaires de crucifères ont été identifiées comme les plus efficaces pour piéger à la fois le nitrate et le sulfate du sol (Thorup-Kristensen *et al.*, 2003) et permettent de minéraliser de fortes proportions de soufre (S) pour la culture suivante (service d'engrais vert à soufre). De plus, les crucifères peuvent exercer des effets biocides sur les pathogènes du sol via la production de glucosinolates (GSL). Cependant contrairement aux légumineuses, les crucifères ont un faible effet engrais vert pour l'azote (N). Les performances des mélanges d'espèces crucifères-légumineuses pour mutualiser les services de recyclage d'azote, de soufre et de biocontrôle ont été testées via des essais au champ pendant deux ans sur deux sites, à Lamothe (site expérimental de l'El Purpan) et à La Vannelière (site expérimental de Jouffray-Drillaud) en 2014 et en 2015 (par la suite, L2014 et L2015 correspondent aux expérimentations menées à Lamothe et V2014 et V2015 correspondent aux expérimentations menées à La Vannelière). 8 espèces de crucifères et 9 espèces de légumineuses ont été testées en culture pure (100%) et en mélanges substitutifs bispécifiques (50%-50%). Des prélèvements destructifs 3 mois après le semis sur des micro-parcelles de 20 m² ont permis d'évaluer la biomasse des cultures, leur teneur en éléments minéraux (C, N, S, ...), la teneur en GSL des crucifères et l'azote minéral du sol.

1.1 Services d'engrais vert pour l'azote et de piège à nitrate

Deux services liés au cycle de l'azote (N) ont été étudiés, l'effet de piège à nitrate et l'effet engrais vert à N. L'effet engrais vert correspond à la minéralisation de l'N des résidus de couverts qui sera minéralisé pour la culture suivante. Ce service a été calculé en prenant en compte l'azote acquis et le ratio C/N des parties aériennes et racinaires des couverts (équation de Justes *et al.* 2009). L'effet engrais vert produit par les résidus des crucifères pures a atteint en moyenne 7.5 kg N ha⁻¹ et a varié parmi les sites de 0 (V2014) à 10 kg N ha⁻¹ (V2015). L'effet engrais vert des légumineuses a été plus élevé, il a atteint 40 kg N ha⁻¹ en moyenne et a varié de 35 kg N ha⁻¹ (L2015) à 54 kg N ha⁻¹ (V2015). Les mélanges ont eu un effet engrais vert intermédiaire qui a atteint en moyenne à 22 kg N ha⁻¹ et a varié de 18 kg N ha⁻¹ (V2014) à 30 kg N ha⁻¹ (V2015). Pour chaque expérimentation, l'effet engrais vert produit par les mélanges a été significativement plus élevé que celui des crucifères pures alors qu'il a été significativement plus faible que celui des légumineuses pures. De plus pour tous les sites, chaque espèce de crucifère a eu un effet engrais vert plus élevé en mélange qu'en culture pure sauf pour le radis à L2014 (Figure 1). Tous sites confondus, l'effet engrais vert des mélanges a été supérieur à 10 kg N ha⁻¹ pour 7 cultures pures sur 21 et pour 20 mélanges sur 21.

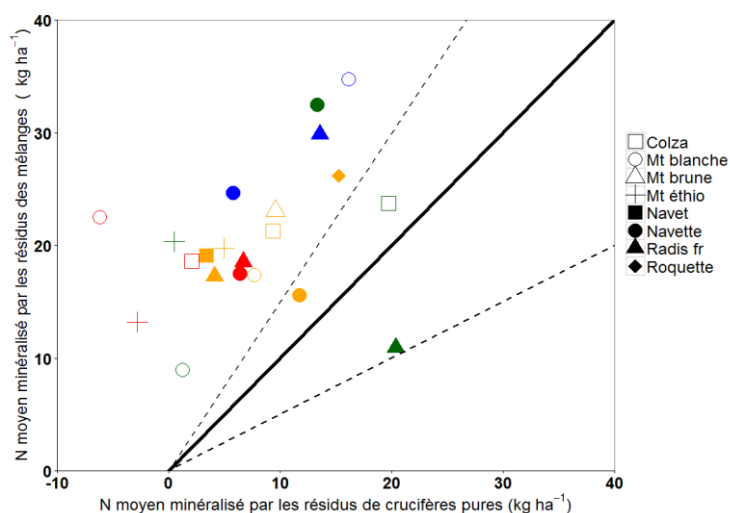


Figure 1 : Azote (N) minéralisé des résidus pour la culture suivante (kg N ha^{-1}). La ligne pleine représente $y=x$. Les lignes en pointillé $y=1.5x$ et $y=0.5x$. Chaque point représente la moyenne des cultures pure de crucifères (axe des x) et des mélanges (axe des y). Les couleurs correspondent aux sites expérimentaux (V2014 in en rouge, V2015 en bleu, L2014 en vert, L2015 en jaune).

Les reliquats d'azote ont été évalués à L2014 et L2015 sur les 90 premiers cm de sol. Les précipitations sur ces deux sites ayant été très faibles pendant la période de culture (140 mm à L2014 et 90 mm à L2015) aucun drainage n'a eu lieu (hypothèse confirmée par un calcul simple de bilan hydrique et par l'évaluation de l'humidité du sol dans les couches profondes en décembre sur 60-90 cm). Par comparaison de l'azote résiduel entre le sol nu et sous les couverts en novembre, un service de piège à nitrate a pu être évalué avant un potentiel drainage hivernal. L'azote résiduel des sols nus était de 73 kg N ha^{-1} à L2014 et de 76 kg N ha^{-1} à L2015 en début novembre. Comparé au sol nu, les cultures pures de crucifères ont induit une diminution significative de l'azote résiduel de 51% (L2014) et de 70% (L2015) alors que les cultures pures de légumineuses l'ont réduit de 37% (L2014) à 43% (L2015). Le point clef est que malgré une densité de crucifère deux fois plus faible, les mélanges ont réduit l'azote résiduel de 48% (L2014) à 70% (L2015) avec la même efficacité que les crucifères pures sur les deux ans et ce pour toutes les espèces de crucifères testées (Figure 2 pour L2015). Dans nos conditions expérimentales, aucune différence significative entre espèces n'a été observée à la fois en cultures pures et en mélanges.

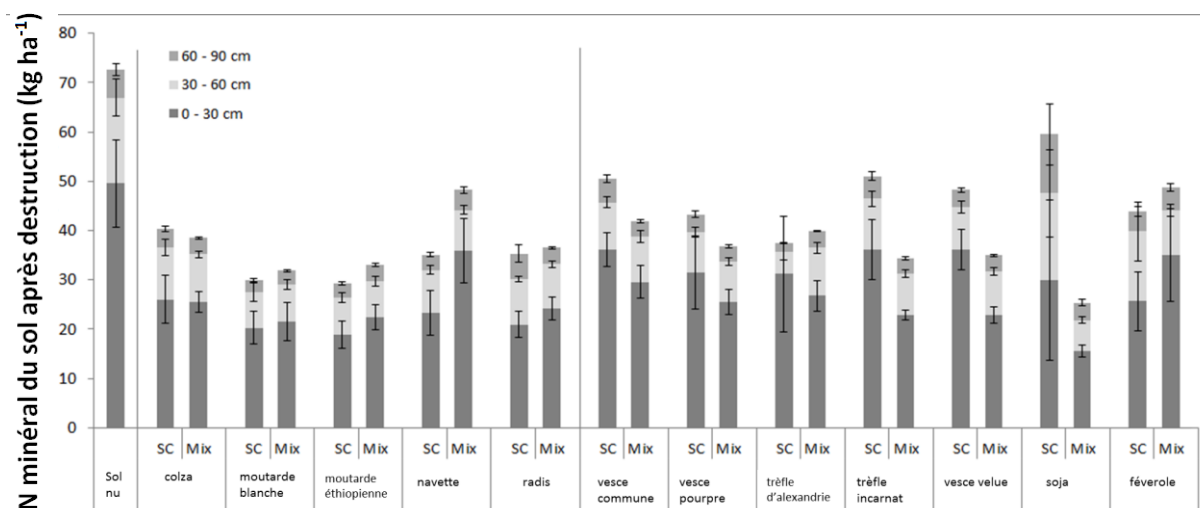


Figure 2 : Reliquats azotés à la destruction des couverts en novembre (en kg N ha^{-1}) pour les 90 premiers cm de sol à Lamothe en 2015. Les valeurs correspondent à la moyenne des cultures pures (SC) ou des mélanges (Mix). Les barres représentent les erreurs-types.

L'hypothèse principale testée a été validée : les mélanges permettent une mutualisation des services de piégeage d'azote et d'effet engrais vert en comparaison aux cultures pures.

1.2 Services de piège à sulfate et d'effet engrais vert à soufre

Deux services liés au cycle du soufre (S) ont été étudiés, l'effet de piège à sulfate et l'effet engrais vert à S (minéralisation du S pour la culture suivante). L'effet de piège à sulfate a été évalué par l'acquisition du S par les couverts. La moyenne de S acquis par les crucifères pures a été de 12 kg S ha⁻¹ et a varié parmi les sites de 11 kg S ha⁻¹ pour L2015 à 15 kg S ha⁻¹ pour L2014 alors que le S acquis par les légumineuses pures a atteint 5 kg S ha⁻¹ en moyenne et a varié de 4 kg S ha⁻¹ pour L2015 à 6 kg S ha⁻¹ pour V2014. Le S acquis par les mélanges a atteint en moyenne 12 kg S ha⁻¹ et a varié de 10 kg S ha⁻¹ pour L2015 à 13 kg S ha⁻¹ pour L2014. Le S acquis par les mélanges était pour tous les sites i) non-significativement différent de celui des crucifères pures et ii) significativement plus élevé que les légumineuses pures. En moyenne sur tous les sites le S acquis par tous les mélanges n'était pas significativement différent des crucifères pures sauf pour les mélanges comportant du radis et de la roquette qui ont respectivement atteint 84% et 66% du S acquis en culture pure (Figure 3).

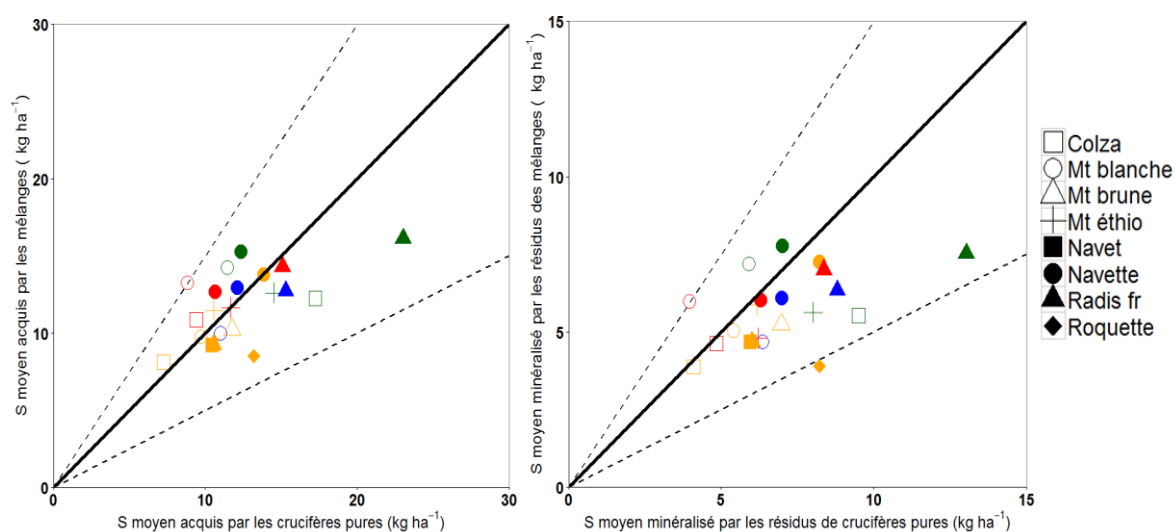


Figure 3 : Soufre (S) acquis par les couverts (A) et soufre minéralisé des résidus (B) pour la culture suivante (kg S ha⁻¹). La ligne pleine représente $y=x$. Les lignes en pointillé $y=1.5x$ et $y=0.5x$. Chaque point représente la moyenne des cultures pures de crucifères (axe des x) et des mélanges (axe des y). Les couleurs correspondent au site expérimental (V2014 en rouge, V2015 en bleu, L2014 en vert, L2015 en jaune).

L'effet engrais vert à S correspond à la minéralisation du S des résidus de couverts pour la culture suivante. Ce service a été calculé en prenant en compte le S acquis et le rapport C/S des parties aériennes et racinaires des couverts (équation d'Eriksen *et al.*, 2008). En moyenne, le S minéralisé par les résidus de crucifères a atteint 7 kg S ha⁻¹ et a varié en fonction des sites de 6 kg S ha⁻¹ (in V2014) à 9 kg S ha⁻¹ (à L2014) alors que l'effet engrais vert à S produit par les résidus de culture pure de légumineuses a atteint seulement 2 kg S ha⁻¹ en moyenne et a varié selon les sites de 1.7 kg S ha⁻¹ (L2014 and L2015) à 2 kg S ha⁻¹ (V2015). L'effet engrais vert à S produit par les résidus des mélanges était de 5.6 kg S ha⁻¹ en moyenne et a varié de 5 kg S ha⁻¹ (pour L2015) à 6 kg S ha⁻¹ (pour L2014). En moyenne, l'effet engrais vert à S des mélanges a atteint 85% de celui des crucifères pures et était significativement plus élevé que celui produit par les légumineuses pures. En moyenne sur tous les sites, le S acquis par chacune des espèces des mélanges était significativement plus faible que la culture pure correspondante sauf pour la moutarde blanche et la navette. La moutarde éthiopienne en mélange a atteint 85% du service engrais vert à S de la culture pure, le colza 80%, la moutarde brune 76%, le radis 73% et la roquette 48% (Figure 4).

L'hypothèse principale testée a été validée, les mélanges permettent un niveau de services liés au cycle du soufre (effet de piège à sulfate et effet engrais vert à S) peu différent de ceux des crucifères pures.

2. Production de GSL par les crucifères en culture pure

La production de glucosinolates (GSL) dans les parties aériennes et racinaires des crucifères est l'un des déterminants principaux de l'efficacité de la technique de biofumigation lors de la destruction des couverts (Couédel *et al.*, 2017). La concentration en GSL des crucifères en culture pure (plante entière) a varié de $6.7 \mu\text{mol g.MS}^{-1}$ pour le colza (L2014) à $47.7 \mu\text{mol g.MS}^{-1}$ pour la moutarde brune (L2015). La concentration en GSL n'est pas significativement inférieure en mélange par rapport aux cultures pures (à part pour la moutarde blanche sur V2015) (Figure 4.A). En ce qui concerne la production de GSL par unité de surface, bien qu'en mélange la densité de crucifères ait été divisée par 2, la production moyenne de GSL par les mélanges atteint 81% de celle des crucifères pures. 8 mélanges ont atteint une production significativement supérieure à 50%, aucun n'a été significativement inférieur (Figure 4.B).

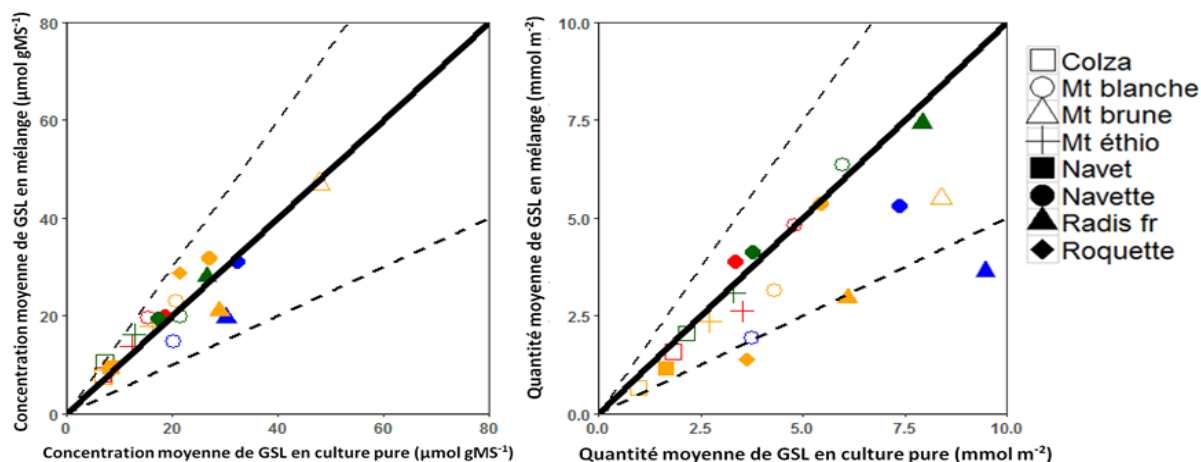


Figure 4 : Concentration en GSL en $\mu\text{mol g.MS}^{-1}$ (A) et production en GSL en mmol.m^{-2} (B). La ligne pleine représente $y=x$. Les lignes en pointillé $y=1.5x$ et $y=0.5x$. Chaque point représente la moyenne des cultures pures de crucifères (axe des x) et des mélanges (axe des y). Les couleurs correspondent au site expérimental (V2014 en rouge, V2015 en bleu, L2014 en vert, L2015 en jaune).

2.1 Mutualisation de services par les mélanges de CIMS

En conclusion par rapport aux crucifères pures, les mélanges d'espèces bispécifiques crucifère-légumineuse permettent d'atteindre un meilleur effet engrais vert pour l'azote tout en conservant des services de piège à nitrate et à sulfate équivalents. L'effet engrais vert à S des mélanges a atteint en moyenne 85 % de celui des crucifères pures alors que la production de glucosinolates reflétant le potentiel de bio-contrôle a atteint 81%.

Dans nos conditions expérimentales, aucun effet variétal n'a été mis en évidence pour les différents services, à la fois en culture pure et en mélanges d'espèces.

2.2 Phénotypage de variétés de cultures intermédiaires multiservices pour réduire la pression de bioagresseurs

Les types de GSL produits ainsi que leurs concentrations diffèrent parmi les espèces de crucifères testées (Figure 5). Les GSL aliphatiques sont produits en forte proportion par les moutardes brunes et éthiopiennes (GSL-Sinigrine) ainsi que par le radis fourrager (GSL-Glucoraphasatine). La moutarde blanche a une proportion élevée en GSL aromatique (GSL-Sinibine) alors que la navette et la roquette contiennent une plus grande diversité de GSL de types aliphatiques et aromatiques. Le GSL aromatique Gluconasturtiin est présent dans les racines de la plupart des espèces de crucifères. Pour les variétés

d'une même espèce, les types de GSL sont identiques et les concentrations diffèrent peu. Pour une même plante, et ce pour toutes les espèces, les types et les concentrations en GSL diffèrent entre les parties aériennes et racinaires mais contrairement aux parties aériennes, les racines présentent une plus grande diversité de GSL. Les concentrations en GSL pour une même variété sont en général peu variables entre les différentes années et les différents sites.

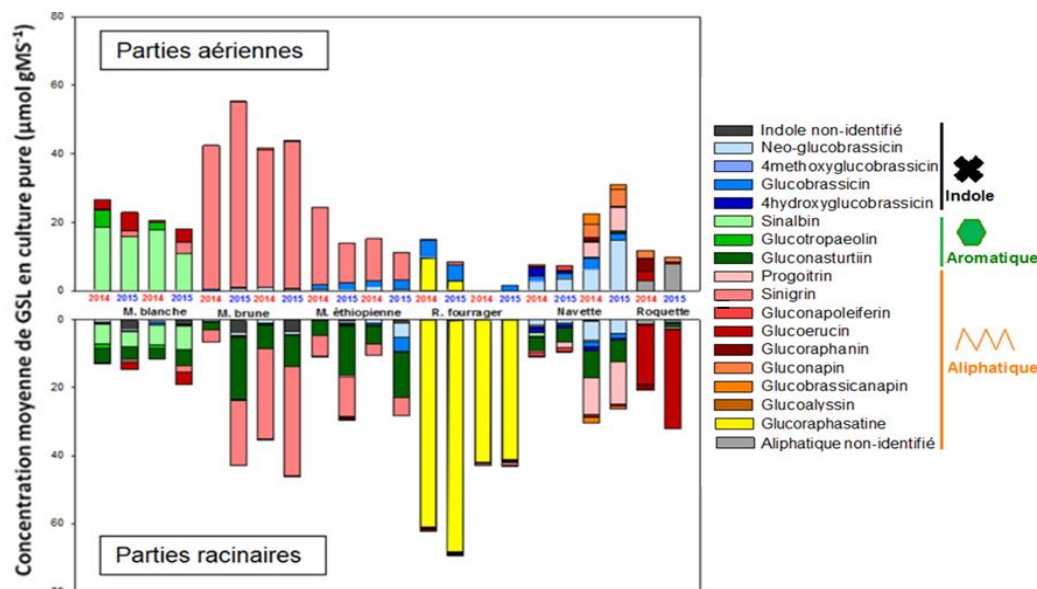


Figure 5 : Concentration en GSL en $\mu\text{mol gMS}^{-1}$ pour les années 2014 et 2015. Les valeurs correspondent à la moyenne des parties aériennes (en haut) et parties racinaires (en bas) des cultures pures de crucifères

3. Potentiel de régulation biotique des crucifères par biofumigation sur le *Verticillium dahliae* du tournesol

L'intérêt de l'utilisation de Brassicacées en biofumigation pour réduire la quantité d'inoculum dans le sol de *Verticillium dahliae* et les dégâts a déjà été démontré sur des cultures maraichères en conditions contrôlées et au champ (Davis *et al.*, 1996 ; Xiao *et al.*, 1998 ; Subbarao *et al.*, 1999 ; Neubauer *et al.*, 2014 ; Neubauer *et al.*, 2015). L'effet de la biofumigation sur le pathosystème *V. dahliae* – tournesol, n'a lui été que très peu étudié. La plupart des études sur l'effet d'une régulation biotique par biofumigation prennent en compte l'espèce ou la variété de brassicacée cultivée et la quantité de biomasse incorporée, mais des facteurs qui impactent l'efficacité de la biofumigation comme le type et la teneur de GSL apportés, voire la quantité d'isothiocyanates libérés ne sont souvent pas mesurés.

L'effet de biofumigation comme méthode de bio-contrôle pour réduire l'incidence et la sévérité du *V. dahliae* du tournesol a été testé par la mise en place d'une culture intermédiaire de crucifère dans la succession blé dur - tournesol, en comparaison d'un sol resté nu (témoin). L'essai au champ a été réalisé sur la station expérimentale de l'INRA de Toulouse de 2015 à 2016. Trois couverts de crucifères (Moutarde brune var. Etamine, Radis fourrager var. Anaconda, Navette fourragère var. Chicon) ont été choisis suivant leur teneur et/ou leur profil en GLS (Figure 5). Les conditions climatiques ont permis un très bon développement des couverts avec des biomasses de $4,2 \text{ t MS.ha}^{-1}$ pour la moutarde brune, 5 t MS.ha^{-1} pour la navette et 6 t MS.ha^{-1} pour le radis. Sur tournesol, un suivi hebdomadaire de l'incidence et de la sévérité du verticillium a été réalisé sur 3×25 plantes par traitement dès l'apparition des symptômes 52 jours après semis (JAS).

De l'apparition des symptômes à la maturité physiologique (96 JAS), les tournesols avec un précédent sol nu (T-sol nu) étaient significativement ($P < 0.01$) plus affectés par le verticillium que les tournesols avec un précédent de crucifères (Figure 6). Au stade bouton floral (52 JAS), 50% des T-sol nu étaient

contaminés avec 15 % du feuillage touché contre moins de 10% des tournesols après l'implantation d'une crucifère. La progression des symptômes sur les T-sol nu a été exponentielle jusqu'à 20 jours après la floraison avec 90% des T-sol nu contaminés et 39 % du feuillage touché contre 40% des T-moutarde brune, 30% des T-navette et 20% des T-radis et moins de 8% d'attaques foliaires. Malgré une confusion possible entre symptômes et sénescence naturelle dès 90 JAS, moins de 60% des tournesols suivant un couvert sont touchés contre 95 % des tournesols et 73% des feuilles en T-sol nu.

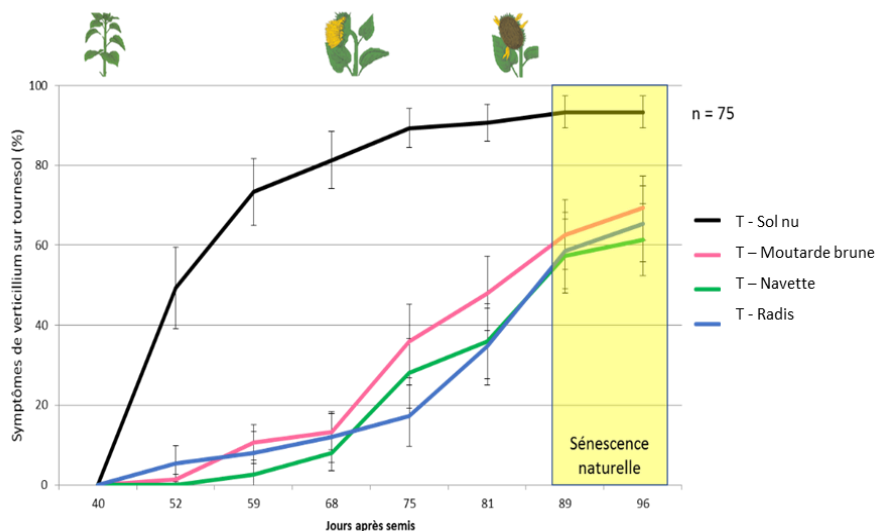


Figure 6 : Evolution du pourcentage de tournesols présentant des symptômes de *Verticillium dahliae* en fonction d'un précédent cultural de crucifère (moutarde brune, navette fourragère, radis fourrager) ou sans couvert (sol nu)

4. Effets larvicides et larvifuges des brassicacées sur les larves d'*Agriotes sordidus*

L'intérêt de la biofumigation dans la lutte contre les taupins du genre *Agriotes* a fait l'objet d'assez peu de travaux à ce jour. Les résultats prometteurs de Furlan et al. (2010), obtenus en laboratoire, n'ont pas été confirmés par les études réalisées en plein champ (Laznik et al., 2014 ; Thibord et al., 2015) qui peuvent être dues aux conditions expérimentales et à la fugacité des GLS. Les plantes biofumigantes libèrent en effet ces composés actifs très volatils sous 48 heures. Les larves sont susceptibles d'adopter un comportement de fuite suivi d'un retour une fois le sol libre de GLS qui expliquerait l'inefficacité des couverts testés en plein champ. Compte-tenu de la variabilité inter-variétale de la production de GLS (quantitativement et qualitativement), les résultats publiés à ce jour ne peuvent malheureusement pas être transposés à l'ensemble des variétés. La question de l'effet larvifuge et larvicide de différents couverts de brassicacées et de tourteau de moutarde brune sur la larve d'*Agriotes sordidus*, dans des conditions proches de celles que l'on retrouve aux champs (en termes de quantité de larves présentes et de matière fraîche introduite dans le sol) reste donc ouverte.

Deux séries d'expériences en laboratoire, réalisées dans des bacs de plusieurs litres de sol, ont permis d'étudier deux facteurs : le type de produit incorporé (couvert ou tourteau) et le délai après l'incorporation du produit. Trois couverts issus de trois espèces de crucifères (Moutarde brune var. Etamine, Radis fourrager var. Anaconda, Navette var. Chicon) ont été testés et un tourteau (Moutarde brune, produit Biofence®). Ces modalités ont été comparées à deux témoins (sol nu et couvert de vesce commune). En se basant sur les rendements moyens des couverts, l'équivalent de 2 t MS.ha⁻¹ a été incorporé pour chaque modalité de couvert ainsi que l'équivalent de 3 t/ha de granulés de tourteau de moutarde. Des grains de maïs ont été incorporés dans les bacs pour évaluer l'incidence de la biofumigation sur le comportement alimentaire des larves.

Pour les deux expériences, aucun effet larvicide ou larvifuge des couverts de crucifères sur les larves d'*Agriotes sordidus* n'a pu être mis en évidence d'un point de vue statistique (Figure 7 et 8). En revanche, le tourteau de moutarde a provoqué une augmentation significative de la mortalité des larves. L'absence d'effet larvifuge de ce dernier traitement semble indiquer que l'effet larvicide est suffisamment rapide pour empêcher les larves de fuir. Le faible nombre d'attaques de grains de maïs n'a malheureusement pas permis d'évaluer statistiquement l'effet du biofumigant sur la pression larvaire.

L'absence d'effet larvicide ou larvifuge des couverts de brassicacée reste à confirmer compte-tenu d'un manque de contrôle expérimental de leur teneur en GLS.

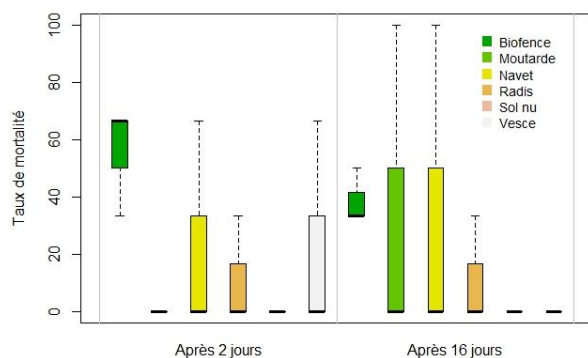


Figure 7 : Taux de mortalité des larves d'*Agriotes sordidus* en fonction du traitement et de la durée après incorporation du tourteau de moutarde (Biofence) ou du couvert (Moutarde, Navet, Radis, Vesce). Le sol nu constitue une des modalités témoin.

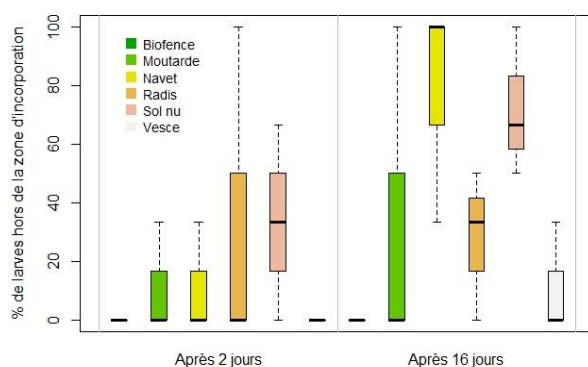


Figure 8 : Proportion de larves d'*Agriotes sordidus* ayant quitté la zone traitée. Les modalités "Vesce" et "Sol nu" constituent les témoins

Conclusion

Les mélanges de CIMS de crucifères et de légumineuses permettent une mutualisation des services écosystémiques liés aux cycles de l'azote et du soufre. Ils permettent d'atteindre un effet piège à nitrates et à sulfate similaire aux CIMS de crucifères pures tout en engendrant un meilleur effet engrais vert pour l'azote et un effet engrais vert à sulfate seulement 15% inférieur à celui des crucifères pures.

Le potentiel de bio-contrôle et de biofumigation des CIMS a été évalué par la production en GSL des crucifères. Les types et concentrations de GSL diffèrent parmi les espèces mais varient très peu parmi les variétés d'une même espèce de crucifère. Le choix d'une espèce de CIMS de crucifère peut donc être raisonné en fonction des bioagresseurs ou ravageurs telluriques visés par biofumigation. Dans le cas du pathosystème verticillium-tournesol, l'effet d'une CIMS de crucifère montre une réduction significative de l'incidence de la maladie lors d'une bonne implantation du couvert. Si le radis fourrager montre un potentiel biofumigant supérieur à la navette et à la moutarde brune contre le verticillium, leur potentiel de biocontrôle contre le taupin du maïs reste à confirmer.

Pour une complémentarité de services, des associations de CIMS de crucifères et de légumineuses sont donc à privilégier d'autant que la production de GSL des crucifères à demi-densité atteint 81% de celui en cultures pures impliquant un potentiel de biofumigation équivalent.

Remerciements

L'article est une synthèse du projet CRUCIAL (CRUCifères Utilisées comme Cultures Intermédiaires monospécifique ou Associées à des Légumineuses pour une complémentarité de services écosystémiques) soutenu par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (dossier CASDAR C-2013-05) et par le Conseil Régional Occitanie (dossier CLE 13053068). Les auteurs remercient tout particulièrement Annick Basset (Jouffray-Drillaud, site de La Vannelière) pour son aide technique ainsi que Cédric Montprofit (RAGT) pour leurs expertises dans la sélection des couverts végétaux. Nous remercions François Perdrieux et Gaël Rametti (INP-Purpan, domaine de Lamothe) ainsi que Eric Lecloux, Didier Raffailac et Didier Chesneau (INRAE, Auzeville) pour leur aide technique lors des essais au champ et lors des analyses au laboratoire. Nous remercions également tous les étudiants en stage de fin d'étude pour leur implication dans le projet : Romain Filiol, Gaëlle van Frank, Antoine Parisot et Diane Desserre.

Références bibliographiques

- 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, 71-86
- Davis J.R., Huisman O.C., Westermann D.T., Hafez S.L., Everson D.O., Sorensen L.H., Schneider A.T., 1996. Effects of green manures on verticillium wilt of potato. *Phytopathology* 86, 444-453.
- Furlan L., Bonetto C., Finotto A., Lazzeri L., Malaguti L., Patalano G., Parker W., 2010. The efficacy of biofumigant meals and plants to control wireworm populations. *Industrial Crops and Products* 31, 245-254.
- Justes E., Mary B., Nicolardot B., 2009. Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil : parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and Soil* 324, 171-185.
- Laznik Z., Trdan S., Vučajnk F., Bohinc T., Vidrih M., 2014. Cruciferous plants' use as biofumigants in potato against wireworms. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 64, 606-614.
- Matthiessen J., Kirkegaard J., 2006. Biofumigation and Enhanced Biodegradation: Opportunity and Challenge in Soilborne Pest and Disease Management. *CRC. Crit. Rev. Plant Sci.* 25, 235-265.
- Neubauer C., Heitmann B., Müller C., 2014. Biofumigation Potential of Brassicaceae Cultivars to *Verticillium dahliae*. *European Journal of Plant Pathology* 140(2), 341-352.
- Neubauer C., Hüntemann K., Heitmann B., Müller C., 2015. Suppression of *Verticillium dahliae* by glucosinolate-containing seed meal amendments. *European Journal of Plant Pathology* 142, 239-249.
- Subbarao K.V., Hubbard J.C., 1996b. Interactive Effects of Broccoli Residue and Temperature on *Verticillium dahliae* microsclerotia in soil and on wilt in cauliflower. *Phytopathology* 86, 1303-1310.
- Thibord J.-B., 2015. Intérêts de substances attractives ou répulsives pour limiter les attaques de taupins. Colloque « Relever le défi de la protection contre les taupins », Cité Internationale Universitaire de Paris, 25 mars 2015, com. orale.
- Thorup-Kristensen K., Magid J., Jensen L.S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Adv. Agron.* 79, 227-302.
- Xiao C.L., Subbarao K.V., Schulbach K.F., Koike S.T., 1998. Effects of crop rotation and irrigation on *Verticillium dahliae* microsclerotia in soil and wilt in cauliflower. *Phytopathology* 88, 1046-1055.

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



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

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