



**HAL**  
open science

## Gestion des adventices au moyen des cultures intermédiaires multi-services: potentiels et limites

Stéphane Cordeau, Delphine Moreau

### ► To cite this version:

Stéphane Cordeau, Delphine Moreau. Gestion des adventices au moyen des cultures intermédiaires multi-services: potentiels et limites. *Innovations Agronomiques*, 2017, 62, pp.1-14. 10.15454/1.5174075019109001E12 . hal-01770356

HAL Id: hal-01770356

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01770356>

Submitted on 18 Apr 2018

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

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



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

## **Gestion des adventices au moyen des cultures intermédiaires multi-services: potentiels et limites**

**Cordeau S.<sup>1</sup>, Moreau D.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Université Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon

**Correspondance** : stephane.cordeau@inra.fr

### **Résumé**

Les systèmes agroécologiques proposent de tirer profit des services rendus par les interactions biotiques pour rendre les systèmes plus durables, moins utilisateurs d'intrants. Les couverts d'interculture ont une action de régulation des adventices qui se fait directement par (i) compétition pour les ressources (lumière, eau, azote) et (ii) allélopathie. Cet article ne traitera pas des actions indirectes des couverts (ex. en favorisant certains organismes prédateurs de graines adventices). Les couverts réduisent la germination des adventices, et les concurrencent dans leur développement et croissance. La régulation par compétition varie en fonction des caractéristiques relatives des espèces adventices et de couverts et de leur agencement en mélange (choix d'espèce, densité relative) et des ressources disponibles pour que ce couvert soit en mesure de produire de la biomasse et limiter l'accès à la lumière pour les adventices. Il n'y a pas d'évidence dans la littérature scientifique sur le fait que maximiser la diversité végétale maximise la régulation biologique des adventices. La dynamique des adventices sous couverts est mal connue, par exemple leur capacité à grainer et remplir le stock semencier. Les couverts d'interculture ne régulent que les adventices qui émergent à cette période. Implantés en fin d'été-automne, ils vont réguler des adventices automnales, différentes de celles qui lèveront dans la culture de printemps suivante. L'intérêt des couverts pour la gestion des adventices doit donc s'envisager à l'échelle du système de culture.

**Mots-clés** : Régulation biologique, Compétition, Allélopathie, Lumière, Azote, Interculture

### **Abstract: Multiple-services cover crops for weed management : potential and limitations**

Agroecological cropping systems tend to maximise ecosystem services provided by interactions between organisms in order to increase their sustainability and decrease their reliance on external inputs. Cover crop control weeds directly by (i) competition for resources (water, nitrogen, light) and (ii) allelopathy. This paper does not deal with indirect effects of cover crops (ex. enhancing weed seed predators). Cover crops reduce weed germination and compete weed during their development and growth. The effectiveness of weed control varies according to the weed species identity, the cover crop mixes (species and relative density), and available resources to produce biomass and limit light transmittance to the ground. There is no evidence in the literature that increasing cover crop species diversity increases weed control. There are still knowledge gaps on the weed dynamic in cover crops, in particular on the ability of weed to produce seeds and replenish the soil seed bank. Cover crops suppress weeds that have a comparable phenology, i.e. late summer and early autumn sown cover crops control autumn emerging weeds, but not weed species that will emerge in the succeeding spring cash crop. This calls for management strategies that are designed at the cropping system level rather than on an annual base.

**Keywords**: Biological control, Competition, Allelopathy, Light, Nitrogen, Fallow period

## Introduction

Les adventices sont responsables de pertes de production agricole (Fickett *et al.*, 2013 ; Milberg et Hallgren, 2004 ; Soltani *et al.*, 2016) et leur gestion est essentielle à une production rentable de qualité (Adeux *et al.*, 2017 ; Quinio *et al.*, 2017). Le recours systématique aux herbicides n'est plus réaliste dans un contexte de réduction des charges de production et de maîtrise de l'impact des pratiques sur l'environnement (Stoate *et al.*, 2009). Il est possible de réduire l'usage d'herbicide tout en maintenant une production et une rentabilité suffisante (Lechenet *et al.*, 2017) si des mesures de gestion alternatives sont mises en œuvre (Colbach et Cordeau, sous presse). La gestion de la flore adventice doit donc se raisonner à l'échelle du système de culture en mobilisant de nombreux leviers complémentaires (Liebman et Gallandt, 1997). Afin de réduire voire de bannir l'usage d'herbicide (comme en agriculture biologique), de nombreuses alternatives mécaniques sont disponibles, notamment en interculture avec les déchaumages et faux semis (Rasmussen, 2004) qui visent à réduire le stock semencier en favorisant l'émergence d'adventices (Gallandt, 2006). Cependant ces techniques de travail du sol peuvent avoir des effets négatifs sur la qualité des sols (Gallandt, 2004), la ressource en eau (Army *et al.*, 1961) et l'érosion (Dickey *et al.*, 1983). Afin de faire face à ces externalités négatives, diversifier temporellement les systèmes de culture par l'implantation de couvert d'interculture est une alternative intéressante et peut être une clé de gestion des adventices à l'échelle pluriannuelle (Creamer *et al.*, 1996 ; Teasdale, 1996).

Les systèmes de culture agroécologiques proposent de valoriser les services rendus par les interactions entre organismes (Wezel *et al.*, 2014) pour améliorer la durabilité des systèmes, réguler les bioagresseurs, et réduire leur dépendance aux intrants (fertilisants, pesticides, irrigation). La régulation biologique des adventices a été étudiée principalement en s'intéressant aux champignons pathogènes (Barreto *et al.*, 2012 ; Charudattan et Dinooor, 2000 ; Ghorbani *et al.*, 2005) et aux insectes prédateurs des adventices aux stades graine (Bohan *et al.*, 2011 ; Petit *et al.*, 2010) et plante en croissance (McFadyen, 1998 ; Müller-Schärer *et al.*, 2000). L'utilisation de plantes cultivées pour réguler des adventices ne fait pas partie des mesures de biocontrôle *sensu stricto* (Cordeau *et al.*, 2016), même s'il est établi depuis plusieurs décennies que les plantes cultivées jouent un rôle dans la régulation des adventices (Robinson et Dunham, 1954). Il existe de nombreux moyens d'augmenter la diversité cultivée à l'échelle du système de culture (Gaba *et al.*, 2015 ; Malézieux *et al.*, 2009) et de l'utiliser pour réguler la flore adventice. Cet article ne traitera que des couverts d'interculture, autrement appelés cultures intermédiaires.

## 1. Processus de régulation biologique des adventices par les couverts

La régulation biologique des adventices à l'aide de couverts d'interculture se fait de manière (i) directe à travers les processus de compétition pour les ressources et d'allélopathie, et (ii) indirecte, par exemple grâce à des insectes prédateurs de graines ou des champignons responsables de la fonte des semis favorisés par la présence d'un couvert qui génère un abri et/ou micro-climat particulier. L'article ne se focalisera que sur les effets directs. Le processus de compétition est celui qui est le plus souvent étudié dans la littérature scientifique, l'allélopathie étant dépendante de la capacité de l'espèce de couverture à sécréter des molécules allélopathiques.

### 1.1 Compétition

La littérature considère généralement la compétition aérienne comme prépondérante sur la compétition racinaire (Wilson, 1988). Certains auteurs mettent en avant que la lumière est le principal facteur qui détermine la capacité des adventices à être compétitrices (Perry *et al.*, 2003). C'est pour cela que la lumière est souvent considérée, dans les modèles de simulation, comme seule ressource pour laquelle cultures et adventices sont en compétition (Park *et al.*, 2003 ; Munier-Jolain *et al.*, 2013). Néanmoins, il existe d'autres études contradictoires indiquant que la compétition pour l'azote est prédominante sur la

compétition pour la lumière (Satorre et Snaydon, 1992). La phénologie joue un rôle important en déterminant sur quelle période de leur cycle les plantes coexistent et sont en compétition.

A ce jour, peu d'études se sont concentrées sur la période d'interculture où la disponibilité en lumière (rayonnement incident) est maximale alors que la disponibilité en nutriments et en eau est souvent réduite. Or, la compétition racinaire devient de plus en plus importante au cours du cycle de vie des adventices et des couverts (Wilson, 1988) et est prédominante quand les ressources du sol sont faibles (Kiær *et al.*, 2013). Ainsi, la mise en œuvre de systèmes de culture plus durables, utilisant moins d'herbicides et d'azote minéral et recourant davantage aux couverts d'interculture, renouvelle la question des principales ressources à l'origine de la compétition entre espèces adventices et cultivées en interculture.

### **1.1.1 Compétition aérienne : pour la lumière**

La présence de plantes de couvert peut réduire la quantité de lumière disponible pour les adventices, créant un ombrage. Selon son importance, cet ombrage peut induire des modifications de la croissance et/ou de la morphologie aérienne (notamment surface foliaire, longueur de tige) et racinaire, avec des conséquences sur la production de graines.

Tant pour les espèces adventices que les espèces de couverts, la capacité des plantes à être compétitives pour la lumière résulte de :

- Leur capacité à affecter la croissance des plantes avec lesquelles sont en compétition (« effet compétitif ») qui dépend (i) de leur dynamique de croissance notamment en surface (Walker *et al.*, 1988) et en hauteur (Barnes *et al.*, 1990) et (ii) de leur structure, en particulier de l'angle foliaire (Hikosaka et Hirose, 1997) et de leur port. Ainsi, les graminées ont une surface foliaire (LAI : leaf area index) majoritairement plus élevée que les dicotylédones, mais ces dernières ont des feuilles plus horizontales maximisant la capture de la lumière et l'exclusion compétitive par ombrage. A noter aussi que certaines espèces de couvert profitent d'autres plantes pour s'en servir comme tuteur pour grimper, s'enrouler et ainsi couvrir le sol, telle que les légumineuses (ex. Vesce).
- Leur capacité à supporter les effets des plantes avec lesquelles sont en compétition (« réponse compétitive ») qui dépend de leur tolérance à l'ombrage (Sutherland, 2004), variable selon les espèces. Certaines espèces estivales comme *Solanum ptycanthum*, *Amaranthus albus* ou *Xanthium strumarium* ont une photosynthèse plus efficace quand la quantité de lumière est faible (Regnier *et al.*, 1988), c'est-à-dire que la photosynthèse par unité de surface foliaire est accrue en réponse à une diminution de la quantité de lumière. De nombreuses adventices s'accommodent d'un ombrage par leur plasticité morphologique (Holt, 1995), en augmentant par exemple la longueur de leurs entre-nœuds (étiolement) ou leur surface foliaire par unité de masse foliaire (appelée surface foliaire spécifique).

### **1.1.2 Compétition pour les ressources souterraines**

La présence de plantes de couvert réduit la disponibilité en eau (Unger et Vigil, 1998) et en nutriments dont l'azote (Kuo et Jellum, 2002 ; Teasdale, 1996) et concurrence ainsi les adventices. La présence d'un couvert peut créer un manque d'eau dans l'horizon superficiel et limiter la croissance des adventices par compétition hydrique (Cordeau *et al.* In prep).

La compétition pour l'azote et pour l'eau se met en place quand les couverts et les adventices exploitent un pool limité de ressources qui est insuffisant pour satisfaire les besoins de l'ensemble des plantes, ce qui est fréquent en interculture. Comme pour la compétition pour la lumière, la compétition pour les ressources du sol dépend de l'effet compétitif des espèces qui est conditionné par (i) la dynamique de mise en place de l'architecture racinaire des plantes qui détermine de volume de sol prospecté, la densité de racines au sein de ce volume, et les zones de sol prospectées (Hodge *et al.*, 2009 ; Malamy,

2005 ; Moreau *et al.*, 2017 ; Pagès, 2016) (ii) la dynamique de la demande en azote et en eau des plantes, fonction de leur dynamique de croissance (Gastal et Lemaire, 2002 ; Lemaire *et al.*, 2005 ; Lemaire *et al.*, 2007) ; (iii) des formes d'azote préférentiellement prélevé par les plantes (ammonium, nitrate, azote organique) qui peut différer selon les espèces et les conditions de croissance (Britto et Kronzucker, 2002 ; Britto et Kronzucker, 2013). La compétition pour les ressources du sol dépend également de la réponse compétitive des espèces, c'est-à-dire de leurs capacités à adapter, par exemple, leur développement et leur croissance racinaire en réponse à la présence de plantes voisines.

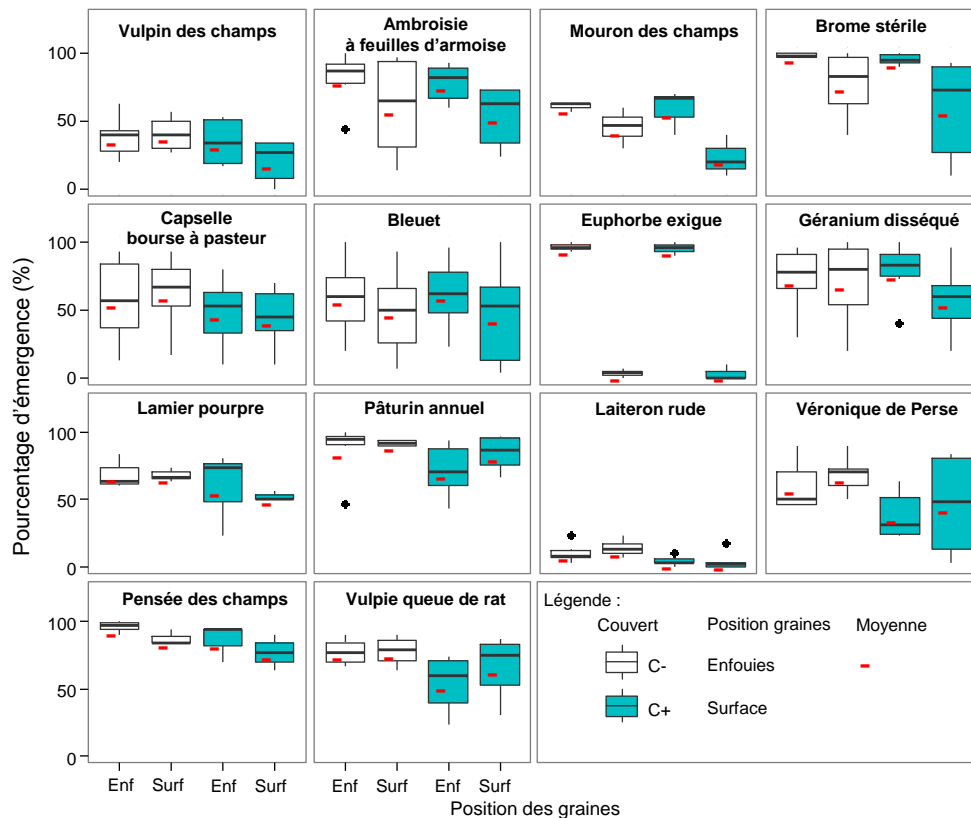
## 1.2 Allélopathie

L'allélopathie est l'ensemble de plusieurs interactions biochimiques directes ou indirectes, positives ou négatives, d'une plante sur une autre. De nombreux articles de synthèse décrivent les processus biologiques en jeu (Bhowmik et Inderjit, 2003 ; Chon et Nelson, 2010 ; de Albuquerque *et al.*, 2011 ; Leather, 1983) et les systèmes de culture qui permettent de mobiliser l'allélopathie pour gérer les adventices (de Albuquerque *et al.*, 2011 ; Farooq *et al.*, 2011 ; Jabran *et al.*, 2015 ; Leather, 1983). Dans les couverts d'interculture, ce processus de régulation est mobilisé (Nagabhushana *et al.*, 2001) selon la présence ou non dans le mélange d'espèces aux capacités allélopathiques, parmi lesquelles certaines céréales (Cheema et Khaliq, 2000), certaines espèces appartenant à la famille des Composées (Anjum *et al.*, 2005 ; Chon et Nelson, 2010), des Brassicacées (Norsworthy, 2003 ; Turk et Tawaha, 2003), et des Légumineuses (Sahid *et al.*, 1993 ; Wu *et al.*, 2010), etc... A noter qu'il est difficile de caractériser les effets dus strictement à l'allélopathie d'un couvert car indissociables des effets dus à la compétition. En effet, pour qu'un couvert ait un effet allélopathique sur la flore adventice, il est nécessaire que les racines des plantes de couvert et des plantes adventices soient situées à proximité les unes des autres ; or, une telle situation conduit nécessairement à un phénomène de compétition pour la lumière entre les plantes cultivées et adventices. De plus, il n'a jamais été tenté expérimentalement de démêler l'effet allélopathique de résidus de couverts en décomposition de leur effet sur la germination des adventices par étouffement.

## 2. Quantification de la régulation biologique des adventices

### 2.1 Germinations et émergences des adventices

Les couverts d'interculture réduisent la germination des adventices (Cordeau *et al.*, 2015) en diminuant en quantité et en qualité la lumière transmise à travers le couvert (Juroszek et Gerhards, 2004). En effet, la réduction du ratio rouge/rouge lointain réduit la germination de quelques adventices sous la canopée (Kruk *et al.*, 2006). L'effet de l'environnement lumineux sur la germination est d'autant plus important que les semences d'adventices ne sont pas enfouies par un travail du sol (Cordeau *et al.*, 2015) comme dans le cas du semis direct. Cordeau *et al.* (2015) démontrent que le non enfouissement des semences (-10.3%) et la présence du couvert (-9.5%) réduisent l'émergence des adventices annuelles. Des variations de réponses sont observées par espèces (Figure 1). Des couverts annuels de légumineuses (*Medicago polymorpha*, *Medicago truncatula*, *Trifolium alexandrinum* et *Trifolium pratense*) peuvent réduire l'émergence d'adventices dans la culture suivante de 41 à 78% (Fisk *et al.*, 2001).



**Figure 1** : effet de la position des graines (Enf : enfouies, Surf : surface) et de la présence (C+) ou absence (C-) d'un couvert de ray-grass sur la germination d'adventices. D'après (Cordeau, *et al.* 2015)

## 2.2 Production de biomasse des adventices

La majorité des études démontre « l'effet supprimeur » des couverts en quantifiant la réduction de biomasse adventice en présence ou non d'un couvert (Creamer *et al.*, 1996). La présence d'un couvert de ray-grass diminue le développement et la croissance des adventices (14 espèces testées, cf. Figure 1), à la fois en termes de nombre de feuilles (-55.4%), de hauteur (-49.9%), et de biomasse aérienne totale (-87.2%) (Cordeau *et al.*, 2015). Le pourcentage de réduction de la biomasse adventice par les couverts est néanmoins très variable, selon les espèces adventices et de couvert, et le niveau de ressources (Teasdale *et al.*, 2007). A titre d'exemple, des couverts de seigle en Alberta (Canada) réduisent la biomasse adventice de 31 à 89% (Ross *et al.*, 2001), des couverts de radis et moutarde dans l'état de New York (USA) de 81 à 99% (Lawley *et al.*, 2011), des couverts d'orge (94%), d'avoine (76%) ou de moutarde (93%) peuvent aussi montrer de très forts pourcentage de réduction de la biomasse adventice (Grimmer et Masiunas, 2004).

## 2.3 Production de semences adventices

Il n'existe quasiment pas de suivi de la phénologie des adventices dans les couverts. Même si des agriculteurs craignent que les couverts permettent aux adventices de grainer très peu d'études ont abordé cet aspect. Brennan et Smith (2005) démontrent la réduction de la production de semences pour une adventice, l'ortie (*Urtica urens*), en réponse à la présence de quelques espèces de couverts, comme la moutarde ou l'avoine. Néanmoins, à notre connaissance, il n'y a pas d'étude sur le long-terme, à l'échelle de la rotation, qui permet d'affirmer que la présence d'un couvert augmente ou réduit le stock de semences adventices dans le sol.

## 2.4 Gestion des espèces vivaces

Les espèces adventices annuelles doivent chaque année produire des semences pour maintenir leur population, ce qui n'est pas le cas des espèces vivaces. Ainsi, les couverts qui concurrencent les adventices et sont souvent détruits avant que les adventices ne viennent à graines sont plus efficaces à réguler les espèces annuelles que les espèces vivaces. Il y a très peu d'exemples dans la littérature de régulation d'adventices vivaces par des couverts (Bergkvist *et al.*, 2010 ; Fisk, *et al.*, 2001), en tout cas aucun avec des couverts en période d'interculture courte ou longue.

## 3. Aspects opérationnels de l'usage des couverts pour la gestion des adventices

### 3.1 Quelles adventices sont ciblées ?

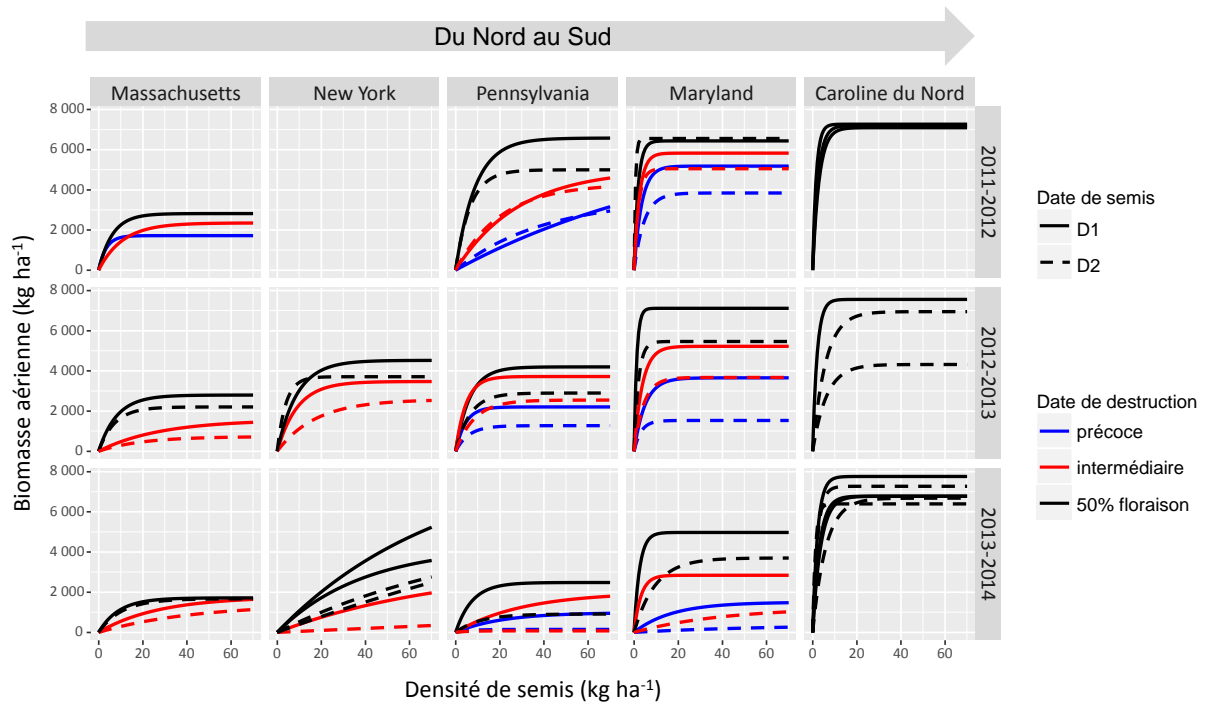
Les couverts ne ciblent que les adventices qui sont en capacité de germer, croître et se développer à la même période que les couverts. Or les adventices ont des périodes de germination préférentielle en lien avec leurs préférences écologiques (Cordeau *et al.*, 2017). Ainsi, les couverts d'interculture d'hiver gélifs ne peuvent réguler que les adventices d'automne. Aussi, l'effet d'un couvert d'interculture d'hiver n'a pas d'effet sur les adventices qui vont lever dans la culture de printemps suivante. C'est donc à l'échelle de la rotation que l'effet des couverts sera visible.

### 3.2 Raisonner le choix des espèces et des mélanges

L'effet des couverts sur la régulation des adventices varie en fonction des espèces de couvert utilisées (le plus souvent en mélange), en particulier de leurs caractéristiques biologiques (également appelées traits), et de leur densité. A titre d'exemple, en Caroline du nord (USA), des couverts de *Fagopyrum esculentum* (sarrasin) / *Vigna unguiculata* (Voeme) / *Glycine max* (Soja) / *Sesbania* sp. réduisent de 85% la biomasse des adventices alors que l'association soja/lalab n'atteint que 48% de réduction dans la même situation (Creamer et Baldwin, 2000). L'objectif, lors de la mise en place d'un couvert pour réguler la flore adventice, est de maximiser la croissance du couvert afin de diminuer la quantité de ressources (lumière, eau, nutriments) disponibles pour les adventices. Ainsi, augmenter la richesse spécifique des couverts (c'est-à-dire le nombre d'espèces du couvert) n'est pas toujours un bon moyen de maximiser la biomasse (Bybee-Finley *et al.*, 2017).

### 3.3 Conduite des couverts : installation et destruction

La date de semis à l'automne joue un rôle très important dans le potentiel de croissance du couvert, sachant que la date de destruction est souvent contrainte par la date de semis de la culture suivante. Ainsi c'est la durée de l'interculture qui permettra d'accumuler suffisamment de degrés-jours pour maximiser la biomasse (Mirsky *et al.*, 2017). Cette étude de Mirsky *et al.* (2017) a cherché à comprendre les facteurs qui déterminent la biomasse de la vesce, utilisée comme couvert d'interculture. L'effet de cette biomasse sur le pouvoir supprimeur des adventices n'est pas démontré dans l'étude mais largement démontré dans la littérature scientifique (Mohler et Teasdale, 1993 ; Teasdale et Daughtry, 1993). Ainsi, maximiser la biomasse de la vesce c'est maximiser son pouvoir concurrentiel sur les adventices. (Mirsky *et al.*, 2017) a testé sur 3 années, dans 7 sites (dans le nord-est des USA), l'effet de la densité de semis (8 modalités de 6 à 50 kg/ha), la date de semis à l'automne (4 dates), la date de destruction (3 dates au printemps), l'ensemble de ces facteurs étant croisés, et répétés 4 ou 5 fois selon les sites (Figure 2). L'effet de la densité de semis sur la biomasse peut se modéliser dans 97% des situations avec une équation non linéaire à 2 paramètres (Figure 2) dont le premier (i) l'asymptote (Asym) est principalement influencée par la somme de degré jour entre le semis et la destruction, et le second (ii) le ratio de croissance constant (Irc) est principalement influencé par la latitude.



**Figure 2 :** Effet de la densité de semis, de la date de semis (D1 précoce, D2 normale à l'automne), et date de destruction (précoce, intermédiaire, floraison) sur la biomasse de la vesce velue (*Vicia villosa*). D'après Mirsky *et al.* (2017)

On observe cependant une possibilité de compensation par la densité de semis d'une date de semis trop tardive afin de maintenir la production de biomasse (Mirsky *et al.*, 2017). Cette capacité de compensation n'est pas possible au-delà d'une certaine date de semis et en fonction du climat la région. Mais il est difficile de donner des dates butoirs car elles varient selon les sites (Mirsky *et al.*, 2017).

### 3.4 Planter des couverts ou travailler le sol en interculture

Il existe une dualité dans la gestion de l'interculture car l'obligation d'implanter des couverts d'interculture peut limiter les possibilités de travail du sol, et en particulier de faux semis en interculture, alors qu'il s'agit d'une technique efficace pour gérer la flore adventice (Rasmussen, 2004). Dans certaines régions, et quand la culture précédente le couvert est récoltée tôt (ex. orge d'hiver), il peut être possible de réaliser un faux semis avant l'implantation du couvert. Ou alors il est possible de détruire plus tôt le couvert et de réaliser un travail du sol par la suite, mais l'effet supprimeur des couverts est d'autant plus efficace que le couvert est bien implanté et qu'il est en place longtemps afin de maximiser sa biomasse potentielle (Mirsky *et al.*, 2017). Il est néanmoins certain que le travail du sol est un filtre plus sélectif sur la flore adventice que la compétition induite par les couverts. Dans la majorité des essais croisant l'effet du type du sol (labour vs. superficiel vs. semis direct) et l'effet de modalités de couvert, l'effet du couvert sur les adventices est minime par rapport à l'effet du travail du sol (Métais *et al.*, 2017).

### 3.5 Capacité des couverts à concurrencer les adventices dans des niveaux de ressources faibles

La régulation des adventices par les couverts s'opère en grande partie par compétition pour les ressources. On attend donc des couverts une forte capacité à préempter les ressources du milieu, d'où l'utilisation de *Brassicaceae* nitrophiles comme piège à nitrates (Dean et Weil, 2009) ou de graminées à forte biomasse pour créer de l'ombrage (Bybee-Finley *et al.*, 2017). Néanmoins, dans la majorité des situations, le couvert est implanté en interculture d'été, donc en saison sèche, et sur un reliquat azoté post-récolte faible (si la fertilisation du précédent a été bien pilotée). Or la majorité des adventices sont



efficientes dans des niveaux de ressources en eau (Cordeau *et al.*, In prep) et en nutriments faibles (Moreau *et al.*, 2014). Il est donc nécessaire d'étudier les capacités de compétition des espèces de couverts dans des niveaux de ressources réduits ainsi que les possibilités de piloter la conduite des couverts (Figure 3, choix espèces, densité de semis, répartition de semis, irrigation potentielle, date de destruction, mode des destruction, etc...), pour maximiser leur installation et leur chance de concurrencer les adventices.



**Figure 3** : Plateforme d'essai à l'INRA Dijon (Domaine d'Epoisses) sur les couverts d'interculture et leur effet sur les adventices sous divers niveaux de ressources et modalités de conduite. (A) couvert de 2 ou 8 espèces, avec ou sans légumineuses 60 jours après semis. (B) destruction d'un couvert au rolofaca sur le gel au 15 décembre. (C) Implantation de l'orge de printemps au 15 mars en semis direct. (D) récolte à la moissonneuse-batteuse expérimentale des micro-parcelles d'orge de printemps conduites sans azote et sans désherbage. (Crédit photo : Cordeau Stephane).

## 4. Futurs challenges pour la recherche et le développement

### 4.1 Phénologie des adventices sous couverts

La phase d'interculture a longtemps été délaissée par les malherbologues car il n'y avait pas de culture présente. Or, dans une vision systémique, le suivi des adventices est essentiel en toutes périodes de l'année, compte tenu de la présence d'un stock semencier dans le sol. Il est crucial d'identifier si les couverts ont la capacité, seuls, de perturber les patrons d'émergence des adventices, d'éviter leur montée à graine ou de réduire leur production grainière. Il est certain aujourd'hui que les couverts concurrencent les adventices qui s'établissent, mais ils doivent être accompagnés d'un travail du sol, d'un broyage, d'un désherbage chimique total pour éviter que les adventices annuelles à germination automnale ne se maintiennent dans la culture suivante.

### 4.2 Potentialité de réduire l'usage d'herbicide

La littérature foisonne d'exemples de modalités de couvert d'interculture qui réduisent les populations d'adventices. Néanmoins cette régulation biologique utilisée comme seule comme levier alternatif de la gestion des adventices ne conduit qu'à une faible réduction de l'usage des herbicides (Teasdale, 1996). Certains essais système long-terme démontrent que des systèmes à base de couvert peuvent

permettre de réguler la flore (Jernigan *et al.*, 2017 ; Mirsky *et al.*, 2013). Néanmoins il est difficile de décorrélérer l'effet des couverts de l'effet des autres composantes du système de culture.

#### 4.3 Relation de compétition dans un couvert pluri-spécifique

Afin d'assurer une multitude de service, les couverts d'interculture sont majoritairement des mélanges d'espèces même si des couverts mono-spécifiques ont démontré leur intérêt pour réguler les adventices (Maslunas *et al.*, 1995 ; Teasdale et Daughtry, 1993). Il n'est simple d'extrapoler la connaissance acquise sur les mécanismes de compétition aérienne et racinaire en situation bispécifique à des couverts multi-spécifiques complexes. De plus, les mécanismes de compétitions souterrains et le rôle de l'architecture racinaire dans l'occupation de la niche spatiale est un domaine de recherche en plein essor (Dunbabin, 2007). Il est également nécessaire d'identifier les traits et valeurs de traits souhaités pour que les couverts multi-spécifiques maximiser la régulation des adventices (Tardy *et al.*, 2015).

#### 4.4 Considérer les couverts d'interculture comme des cultures

Les couverts d'interculture doivent être considéré comme des cultures et prétendre aux mêmes soins et aux mêmes raisonnements de conduites que les cultures. Il faut soigner la phase d'implantation, la date et la densité de semis (Mirsky *et al.*, 2017). Il faut raisonner sa destruction pour maximiser la régulation des adventices présentes (Wortman *et al.*, 2012).

Les agriculteurs ont testé différentes modalités de couverts depuis des décennies et ont identifié des opportunités d'améliorer les variétés disponibles pour maximiser les services qu'ils en attendent (Wayman *et al.*, 2017). Actuellement l'adoption de certaines espèces ou certains mélanges est réduit par le manque de variétés adaptées régionalement. Des efforts sont nécessaires en sélection variétale pour évaluer les nouveaux cultivars de couvert dans leur aptitude à la concurrence lorsqu'ils sont cultivés en mélange. Evaluer les variétés en culture pure renseigne peu sur leur comportement en mélange. Il est également nécessaire de sélectionner les mélanges sur des essais conduits à bas intrants, et en présence d'adventices.

#### Remerciements

Certains travaux présentés dans l'article ont bénéficié du soutien financier de l'ANR COSAC (ANR-14-CE18-0007), de la Région Bourgogne par le projet FABER Couv'Herbi, et le projet Casdar VANCOUVER. Une partie de ces travaux a été réalisée dans le cadre d'une mission de longue durée soutenue par le Département Environnement-Agronomie de l'INRA, en collaboration avec Matthew R. Ryan et Antonio DiTommaso (Soil and Crop Sciences Section, School of Integrative Plant Science, Cornell University, Ithaca, NY 14853), et Steven B. Mirsky (USDA-ARS Sustainable Agricultural Systems Lab., 10300 Baltimore Ave., Bldg. 001, Beltsville, MD 20705).

#### Références bibliographiques

- Adeux G., Giuliano S., Cordeau S., Savoie J.-M., Alletto L., 2017. Low-input maize-based cropping systems implementing IWM match conventional maize monoculture productivity and weed control. *Agriculture* 7, 74.
- Akobundu I., Udensi U., Chikoye D., 2000. Velvetbean (*Mucuna spp.*) suppresses speargrass (*Imperata cylindrica* (L.) Raeuschel) and increases maize yield. *International Journal of Pest Management* 46, 103-108.
- Anjum T., Stevenson P., Hall D., Bajwa R., 2005. Allelopathic potential of *Helianthus annuus* L. (sunflower) as natural herbicide. Centre for Rural Social Research, Charles Sturt University, Wagga Wagga, Australia, p.
- Army T., Wiese A., Hanks R., 1961. Effect of tillage and chemical weed control practices on soil moisture losses during the fallow period. *Soil Science Society of America Journal* 25, 410-413.

- Barnes P., Beyschlag W., Ryel R., Flint S., Caldwell M., 1990. Plant competition for light analyzed with a multispecies canopy model. III. Influence of canopy structure in mixtures and monocultures of wheat and wild oat. *Oecologia* 82, 560-566.
- Barreto R.W., Ellison C.A., Seier M.K., Evans H.C., 2012. Biological Control of weeds with Plant Pathogens: Four Decades On. In: Integrated Pest Management Principles and Practice eds. Abrol D. p. and Shankar U.). CAB, p. 299-350.
- Bergkvist G., Adler A., Hansson M., Weih M., 2010. Red fescue undersown in winter wheat suppresses *Elytrigia repens*. *Weed Research* 50, 447-455.
- Bhowmik P.C., Inderjit, 2003. Challenges and opportunities in implementing allelopathy for natural weed management. *Crop Protection* 22, 661-671.
- Blackshaw R.E., Moyer J.R., Doram R.C., Boswell A.L., 2001. Yellow sweetclover, green manure, and its residues effectively suppress weeds during fallow. *Weed Science* 49, 406-413.
- Bohan D.A., Boursault A., Brooks D.R., Petit S., 2011. National-scale regulation of the weed seedbank by carabid predators. *Journal of Applied Ecology* 48, 888-898.
- Brennan E.B., Smith R.F., 2005. Winter Cover Crop Growth and Weed Suppression on the Central Coast of California. *Weed Technology* 19, 1017-1024.
- Britto D.T., Kronzucker H.J., 2002. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> toxicity in higher plants: a critical review. *Journal of Plant Physiology* 159, 567-584.
- Britto D.T., Kronzucker H.J., 2013. Ecological significance and complexity of N-source preference in plants. *Annals of botany*.
- Bybee-Finley K.A., Mirsky S.B., Ryan M.R., 2017. Crop Biomass Not Species Richness Drives Weed Suppression in Warm-Season Annual Grass–Legume Intercrops in the Northeast. *Weed Science* 65, 669-680.
- Charudattan R., Dinoor A., 2000. Biological control of weeds using plant pathogens: accomplishments and limitations. *Crop Protection* 19, 691-695.
- Cheema Z.A., Khaliq A., 2000. Use of sorghum allelopathic properties to control weeds in irrigated wheat in a semi arid region of Punjab. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 79, 105-112.
- Chon S., Nelson C.J., 2010. Allelopathy in Compositae plants. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30.
- Colbach N., Cordeau S., In prep. Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures.
- Cordeau S., Guillemin J.-P., Reibel C., Chauvel B., 2015. Weed species differ in their ability to emerge in no-till systems that include cover crops. *Annals of Applied Biology* 166, 444-455.
- Cordeau S., Smith R.G., Gallandt E.R., Brown B., Salon P., DiTommaso A., Ryan M.R., 2017. How do weeds differ in their response to the timing of tillage? A study of 61 species across the Northeastern United States. *Annals of Applied Biology* <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/aab.12377/abstract>.
- Cordeau S., Triolet M., Wayman S., Steinberg C., Guillemin J.-P., 2016. Bioherbicides: Dead in the water? A review of the existing products for integrated weed management. *Crop Protection* 87, 44-49.
- Cordeau S., Wayman S., Reibel C., Strbik F., Chauvel B., Guillemin J.P., In prep. Effects of drought on weed emergence and growth vary with seed location and presence of a cover crop.
- Creamer N.G., Baldwin K.R., 2000. An evaluation of summer cover crops for use in vegetable production systems in North Carolina. *HortScience* 35, 600-603.
- Creamer N.G., Bennett M.A., Stinner B.R., Cardina J., Regnier E.E., 1996. Mechanisms of weed suppression in cover crop-based production systems. *HortScience* 31, 410-413.
- Davis A.S., Daedlow D., Schutte B.J., Westerman P.R., 2011. Temporal scaling of episodic point estimates of seed predation to long-term predation rates. *Methods in Ecology and Evolution* 2, 682-890.

- de Albuquerque M.B., dos Santos R.C., Lima L.M., Melo P.D., Nogueira R., da Camara C.A.G., Ramos A.D., 2011. Allelopathy, an alternative tool to improve cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 31, 379-395.
- Dean J.E., Weil R.R., 2009. Brassica cover crops for nitrogen retention in the Mid-Atlantic Coastal Plain. *Journal of Environmental Quality* 38, 520-528.
- Dickey E.C., Fenster C., Laflen J., Mickelson R., 1983. Effects of tillage on soil erosion in a wheat-fallow rotation. *Transactions of the ASAE* 26, 814-0820.
- Dunbabin V., 2007. Simulating the role of rooting traits in crop-weed competition. *Field Crops Research* 104, 44-51.
- Farooq M., Jabran K., Cheema Z.A., Wahid A., Siddique K.H.M., 2011. The role of allelopathy in agricultural pest management. *Pest Management Science* 67, 493-506.
- Fickett N.D., Boerboom C.M., Stoltenberg D.E., 2013. Soybean yield loss potential associated with early-season weed competition across 64 site-years. *Weed Science* 61, 500-507.
- Fisk J.W., Hesterman O.B., Shrestha A., Kells J.J., Harwood R.R., Squire J.M., Sheaffer C.C., 2001. Weed suppression by annual legume cover crops in no-tillage corn. *Agronomy Journal* 93, 319-325.
- Gaba S., Lescourret F., Boudsocq S., Enjalbert J., Hinsinger P., Journet E.-P., Navas M.-L., Wery J., Louarn G., Malézieux E., 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 607-623.
- Gallandt E.R., 2004. Soil-improving practices for ecological weed management. In: *Weed Biology and Management*. Springer, p. 267-284.
- Gallandt E.R., 2006. How can we target the weed seedbank? *Weed Science* 54, 588-596.
- Gallandt E.R., Molloy T., Lynch R.P., Drummond F.A., 2005. Effect of cover-cropping systems on invertebrate seed predation. *Weed Science* 53, 69-76.
- Gastal F., Lemaire G., 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany* 53, 789-799.
- Ghorbani R., Leifert C., Seel W., 2005. Biological control of weeds with antagonistic plant pathogens. *Advances in Agronomy* 86, 191-225.
- Graglia E., Melander B., Jensen R.K., 2006. Mechanical and cultural strategies to control *Cirsium arvense* in organic arable cropping systems. *Weed Research* 46, 304-312.
- Grimmer O.P., Masiunas J.B., 2004. Evaluation of winter-killed cover crops preceding snap pea. *HortTechnology* 14, 349-355.
- Hikosaka K., Hirose T., 1997. Leaf angle as a strategy for light competition: optimal and evolutionarily stable light-extinction coefficient within a leaf canopy. *Ecoscience* 4, 501-507.
- Hodge A., Berta G., Doussan C., Merchan F., Crespi M., 2009. Plant root growth, architecture and function. *Plant and Soil* 321, 153-187.
- Holt J.S., 1995. Plant responses to light: a potential tool for weed management. *Weed Science* 43, 474-482.
- Jabran K., Mahajan G., Sardana V., Chauhan B.S., 2015. Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Protection* 72, 57-65.
- Jernigan A.B., Caldwell B.A., Cordeau S., DiTommaso A., Drinkwater L.E., Mohler C.L., Ryan M.R., 2017. Weed abundance and community composition in a long-term organic vegetable cropping systems trial. *Weed Science* 65, 639-649.
- Juroszek P., Gerhards R., 2004. Photocontrol of weeds. *Journal of Agronomy and Crop Science* 190, 402-415.
- Kiær L.P., Weisbach A.N., Weiner J., 2013. Root and shoot competition: a meta-analysis. *Journal of Ecology* 101, 1298-1312.
- Kruk B., Insausti P., Razul A., Benech-Arnold R., 2006. Light and thermal environments as modified by a wheat crop: effects on weed seed germination. *Journal of Applied Ecology* 43, 227-236.



- Kulkarni S.S., Dossdall L.M., Willenborg C.J., 2015. The role of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in weed seed consumption: a review. *Weed Science* 63, 335-376.
- Kuo S., Jellum E.J., 2002. Influence of Winter Cover Crop and Residue Management on Soil Nitrogen Availability and Corn Scientific Paper no. 0050-32, Dep. of Crop and Soil Sci., College of Agric. and Home Econ. Res. Cent., Washington State Univ., Pullman, WA. *Agronomy Journal* 94, 501-508.
- Lawley Y.E., Weil R.R., Teasdale J.R., 2011. Forage radish cover crop suppresses winter annual weeds in fall and before corn planting. *Agronomy Journal* 103, 137-144.
- Leather G.R., 1983. Weed control using allelopathic crop plants. *Journal of Chemical Ecology* 9, 983-989.
- Lechenet M., Dessaint F., Py G., Makowski D., Munier-Jolain N., 2017. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants* 3, 17008.
- Lemaire G., Avice J.C., Kim T.H., Ourry A., 2005. Developmental changes in shoot N dynamics of lucerne (*Medicago sativa* L.) in relation to leaf growth dynamics as a function of plant density and hierarchical position within the canopy. *Journal of Experimental Botany* 56, 935-943.
- Lemaire G., van Oosterom E., Sheehy J., Jeuffroy M.H., Massignam A., Rossato L., 2007. Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth? *Field Crops Research* 100, 91-106.
- Liebman M., Gallandt E., 1997. Many little hammers: Ecological management of crop-weed interactions. In: *Ecology in Agriculture* (ed. LE J.). Academic Press, New York, p. 291-343.
- Malamy J., 2005. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. *Plant, Cell & Environment* 28, 67-77.
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., Tournonnet S.d., Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 43-62.
- Maslunas J., Weston L.A., Weller S.C., 1995. The impact of rye cover crops on weed populations in a tomato cropping system. *Weed Science* 43, 318-318.
- McFadyen R.E.C., 1998. Biological control of weeds. *Annual Review of Entomology* 43, 369-393.
- Métais P., Vuillemin F., Cordeau S., 2017. Étude de l'effet du travail du sol et des couverts sur les adventices dans des contextes de production variés. In: *Séminaire de Restitution à mi-parcours du Projet de Recherche ANR CoSAC (Conception de Stratégies durables de gestion des Adventices dans un contexte de Changement : climat, pratiques agricoles, biodiversité). Gestion des Adventices dans un Contexte de Changement.* Paris, p. 53-55.
- Milberg P., Hallgren E., 2004. Yield loss due to weeds in cereals and its large-scale variability in Sweden. *Field Crops Research* 86, 199-209.
- Mirsky S.B., Ackroyd V.J., Cordeau S., Curran W.S., Hashemi M., Reberg-Horton C.S., Ryan M.R., Spargo J.T., 2017. Hairy vetch biomass across the Eastern United States: effects of latitude, seeding rate and date, and termination timing. *Agronomy Journal* 109, 1510-1519.
- Mirsky S.B., Ryan M.R., Teasdale J.R., Curran W.S., Reberg-Horton C.S., Spargo J.T., Wells M.S., Keene C.L., Moyer J.W., 2013. Overcoming Weed Management Challenges in Cover Crop-Based Organic Rotational No-Till Soybean Production in the Eastern United States. *Weed Technology* 27, 193-203.
- Mohler C., Teasdale J., 1993. Response of weed emergence to rate of *Vicia villosa* Roth and *Secale cereale* L. residue. *Weed Research* 33, 487-499.
- Moreau D., Abiven F., Busset H., Matejcek A., Pagès L., 2017. Effects of species and soil-nitrogen availability on root system architecture traits. Study on a set of weed and crop species. *Annals of Applied Biology* 171, 103-116.
- Moreau D., Busset H., Matejcek A., Munier-Jolain N., 2014. The ecophysiological determinants of nitrophily in annual weed species. *Weed Research* 54, 335-346.
- Müller-Schärer H., Scheepens P.C., Greaves M.P., 2000. Biological control of weeds in European crops: recent achievements and future work. *Weed Research*, 83-98.

- Munier-Jolain N.M., Guyot S.H.M., Colbach N., 2013. A 3D model for light interception in heterogeneous crop:weed canopies: Model structure and evaluation. *Ecological Modelling* 250, 101-110.
- Nagabhushana G.G., Worsham A.D., Yenish J.P., 2001. Allelopathic cover crops to reduce herbicide use in sustainable agricultural systems. *Allelopathy Journal* 8, 133-146.
- Norsworthy J.K., 2003. Allelopathic potential of wild radish (*Raphanus raphanistrum*). *Weed Technology* 17, 307-313.
- Pagès L., 2016. Branching patterns of root systems: comparison of monocotyledonous and dicotyledonous species. *Annals of botany* 118, 1337-1346.
- Park S.E., Benjamin L.R., Watkinson A.R., 2003. The theory and application of plant competition models: an agronomic perspective. *Annals of Botany* 92, 741-748.
- Perry L.G., Neuhauser C., Galatowitsch S.M., 2003. Founder control and coexistence in a simple model of asymmetric competition for light. *Journal of Theoretical Biology* 222, 425-436.
- Petit S., Boursault A., Le Guilloux M., Munier-Jolain N., Reboud X., 2010. Weeds in agricultural landscapes. A review. *Agronomy for Sustainable Development*.
- Quinio M., De Waele M., Dessaint F., Biju-Duval L., Buthiot M., Cadet E., Bybee-Finley A.K., Guillemain J.-P., Cordeau S., 2017. Separating the confounding effects of farming practices on weeds and winter wheat production using path modelling. *European Journal of Agronomy* 82, 134-143.
- Rasmussen I.A., 2004. The effect of sowing date, stale seedbed, row width and mechanical weed control on weeds and yields of organic winter wheat. *Weed Research* 44, 12-20.
- Regnier E.E., Salvucci M.E., Stoller E.W., 1988. Photosynthesis and growth responses to irradiance in soybean (*Glycine max*) and three broadleaf weeds. *Weed Science*, 487-496.
- Robinson R.G., Dunham R.S., 1954. Companion crops for weed control in soybeans. *Agronomy Journal* 46, 278-281.
- Ross S.M., King J.R., Izaurralde R.C., O'Donovan J.T., 2001. Weed suppression by seven clover species. *Agronomy Journal* 93, 820-827.
- Sahid I., Tasrif A., Sastroutomo S.S., Latiff A., 1993. Allelopathic potential of legume cover crops on selected weed species. *Plant Protection Quarterly* 8, 49-53.
- Satorre E., Snaydon R., 1992. A comparison of root and shoot competition between spring cereals and *Avena fatua* L. *Weed Research* 32, 45-55.
- Smith R.G., Mortensen D.A., Ryan M., 2010. A new hypothesis for the functional role of diversity in mediating resource pools and weed-crop competition in agroecosystems. *Weed Research* 50, 37-48.
- Soltani N., Dille J.A., Burke I.C., Everman W.J., VanGessel M.J., Davis V.M., Sikkema P.H., 2016. Potential Corn Yield Losses from Weeds in North America. *Weed Technology* 30, 979-984.
- Stoate C., Baldi A., Beja P., Boatman N.D., Herzon I., van Doorn A., de Snoo G.R., Rakosy L., Ramwell C., 2009. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe - A review. *Journal of Environmental Management* 91, 22-46.
- Sutherland S., 2004. What makes a weed a weed: life history traits of native and exotic plants in the USA. *Oecologia* 141, 24-39.
- Tardy F., Moreau D., Dorel M., Damour G., 2015. Trait-based characterisation of cover plants' light competition strategies for weed control in banana cropping systems in the French West Indies. *European Journal of Agronomy* 71, 10-18.
- Teasdale J., Brandsaeter L., Calegari A., Neto F.S., 2007. Cover crops and weed management. Non chemical weed management principles. *Concepts and Technology*, CABI, Wallingford, UK, 49-64.
- Teasdale J.R., 1996. Contribution of cover crops to weed management in sustainable agricultural systems. *Journal of Production Agriculture* 9, 475-479.
- Teasdale J.R., Daughtry C.S., 1993. Weed suppression by live and desiccated hairy vetch (*Vicia villosa*). *Weed Science* 41, 207-212.

- Trichard A., Ricci B., Ducourtieux C., Petit S., 2014. The spatio-temporal distribution of weed seed predation differs between conservation agriculture and conventional tillage. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 188, 40-47.
- Turk M., Tawaha A., 2003. Allelopathic effect of black mustard (*Brassica nigra* L.) on germination and growth of wild oat (*Avena fatua* L.). *Crop Protection* 22, 673-677.
- Unger P.W., Vigil M.F., 1998. Cover crop effects on soil water relationships. *Journal of Soil and Water Conservation* 53, 200-207.
- Walker G.K., Blackshaw R.E., Dekker J., 1988. Leaf area and competition for light between plant species using direct sunlight transmission. *Weed Technology*, 159-165.
- Wayman S., Kissing Kucek L., Mirsky S.B., Ackroyd V., Cordeau S., Ryan M.R., 2017. Organic and conventional farmers differ in their perspectives on cover crop use and breeding. *Renewable Agriculture and Food Systems* 32, 376-385.
- Westerman P., Dixon P., Liebman M., 2009. Burial rates of surrogate seeds in arable fields. *Weed Research* 49, 142-152.
- Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.-F., Ferrer A., Peigné J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34, 1-20.
- Wilson J.B., 1988. Shoot competition and root competition. *Journal of Applied Ecology* 25, 279-296.
- Wortman S.E., Francis C.A., Bernardis M.L., Drijber R.A., Lindquist J.L., 2012. Optimizing cover crop benefits with diverse mixtures and an alternative termination method. *Agronomy Journal* 104, 1425-1435.
- Wu C.X., Guo X.X., Li Z.H., Shen Y.X., 2010. Feasibility of using the allelopathic potential of yellow sweet clover for weed control. *Allelopathy Journal* 25, 173-184.

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.