



HAL
open science

Relations entre niveau d'usage d'herbicides, flore adventice et rendement : analyse critique des méthodes et synthèse des acquis

Nathalie Colbach, Sandrine Petit, Bruno Chauvel, Violaine Deytieux, Martin Lechenet, Stéphane Cordeau, Nicolas M Munier-Jolain

► To cite this version:

Nathalie Colbach, Sandrine Petit, Bruno Chauvel, Violaine Deytieux, Martin Lechenet, et al.. Relations entre niveau d'usage d'herbicides, flore adventice et rendement : analyse critique des méthodes et synthèse des acquis. Innovations Agronomiques, 2020, 81, pp.1-17. 10.15454/bpst-th82 . hal-03157513v2

HAL Id: hal-03157513

<https://hal.inrae.fr/hal-03157513v2>

Submitted on 3 Feb 2022

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

Relations entre niveau d'usage d'herbicides, flore adventice et rendement : analyse critique des méthodes et synthèse des acquis

Colbach N.¹, Petit S.¹, Chauvel B.¹, Deytieux V.², Lechenet M.³, Munier-Jolain N.M.¹, Cordeau S.¹

¹ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne, Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon

² UE115 Domaine Expérimental d'Epoisses, INRAE, F-21000 Dijon

³ Groupe Dijon Céréales, 4 boulevard de Beauregard, BP 4075, F-21604 Longvic Cedex

Correspondance : Nathalie.Colbach@inrae.fr

Résumé

Pour comprendre comment gérer les adventices avec peu ou pas d'herbicides en grandes cultures, étudier la nuisibilité des adventices, l'efficacité et les effets des herbicides et de leur réduction sur le rendement est nécessaire. Cette question a été étudiée depuis des années mais les résultats apparaissent souvent contradictoires. Notre article propose une analyse critique des publications scientifiques traitant des relations entre usage d'herbicides, adventices et rendement. Nous démontrons que de nombreuses incohérences résultent de différences méthodologiques et du choix liant ces trois items. Les méthodes utilisées pour analyser la relation adventices-production sont souvent inadéquates ; cependant, il y a des preuves que, sans compensation par des combinaisons adaptées de techniques culturales, la réduction de l'utilisation des herbicides augmente les densités adventices. Des études à l'échelle du système de culture sont indispensables, qui explicitement incluent les adventices et démêlent les effets des herbicides de ceux d'autres pratiques, tant sur les adventices que sur la production. Nous concluons que l'usage d'herbicides peut être réduit sans perte de production si les systèmes de culture sont reconçus en combinant des leviers agronomiques, tenant compte du contexte de production.

Mots-clés : Interaction culture-adventice, Système de culture, Compétition, Écart de rendement, Perte de rendement, Désherbage, Herbicide, Resource trophique, Gestion des adventices

Abstract : Relationships between herbicide use intensity, weeds and yield: critical analysis of current methods and results

There is an urgent need to investigate how to manage weeds with fewer or no herbicides in arable farming. The questions of weed harmfulness, herbicide efficacy, the effects of herbicide use on crop yields, and the effect on crop production of reducing herbicides have been addressed over the years but results often appear contradictory. Here, we critically reviewed published studies focusing on the interactions between herbicide use, weeds and crop yield. We demonstrate that many inconsistencies result from differences in methodologies and in the conceptual model that links the three items. Our main findings are: (1) The methods used to assess weed impact on crop production are often inadequate, yet, there is evidence that, if not compensated by proper combined sets of cultural techniques, herbicide reduction increases weed infestation ; (2) Reducing herbicide use rarely increases crop yield loss if farmers compensate by other cultural practices ; (3) Comprehensive cropping-system studies are needed that explicitly include weeds and disentangle herbicide impacts from the effect of other practices on weeds and on crop production. We conclude that herbicide use can be reduced without losing crop production if cropping systems are redesigned by combining agronomic and biodiversity-based levers and accounting for the production context.

Keywords: Weed-crop interference, Cropping system, Competition, Yield gap, Crop loss, Weeding, Herbicide, Trophic resource use, Weed management.

1. Introduction

La gestion des adventices a toujours été centrale dans la conduite des cultures avec les stratégies de faire germer les semences adventices à un moment où elles ne gênent pas la culture et d'éliminer les plantes levées lorsqu'elles entrent en compétition avec la culture. Au début du 20^e siècle, les livres de malherbologie rapportent des pertes de rendement allant de 20 à 50% en fonction de la culture en l'absence de contrôle des adventices (Fron, 1917). Au milieu du 20^e siècle, l'arrivée des herbicides de synthèse hautement efficaces a conduit les agriculteurs à délaissier les autres techniques de gestion des adventices. Pendant cette période, la recherche s'est focalisée sur les adventices les plus agressives, généralement dans des expérimentations bi-spécifiques (1 adventice vs 1 culture) en conditions contrôlées pour établir des seuils de nuisibilité déclenchant les pulvérisations d'herbicides (Caussanel *et al.*, 1988). Des problèmes environnementaux et sanitaires ont ensuite conduit à une législation incitant à la réduction de l'usage des pesticides (plan Ecophyto¹ notamment). Cette législation et l'extension rapide de la résistance aux herbicides (Davis et Frisvold, 2017) expliquent la transition d'une gestion exclusivement chimique des adventices vers une gestion intégrée basée sur des combinaisons de techniques alternatives préventives et curatives (Liebman et Gallandt, 1997). Cette transition soulève la question de savoir dans quelle mesure la production agricole va être affectée par les adventices, et comment passer à une gestion des adventices économe en herbicides.

De nombreuses études ont ainsi exploré les effets de la réduction des pesticides sur la production (en France, Hossard *et al.*, 2014 ; Lechenet *et al.*, 2014), l'efficacité des herbicides pour contrôler les adventices et préserver la production (Milberg et Hallgren, 2004 ; Soltani *et al.*, 2016), la nuisibilité des adventices pour la production (Milberg et Hallgren, 2004 ; Song *et al.*, 2017). Leurs résultats ou interprétations paraissent parfois contradictoires, alors même que la perte de rendement due à des flores adventices plurispécifiques et l'influence de systèmes de culture complexes sur les interactions cultures-adventices ont été identifiés parmi les 30 priorités de recherche en malherbologie (Neve *et al.*, 2017).

Dans cet article, nous proposons une analyse critique des différentes méthodes utilisées et les résultats des publications² qui ont analysé la nuisibilité des adventices pour la production, les impacts des herbicides sur les adventices et la production ainsi que des effets des systèmes de culture sur l'usage d'herbicides. Notre cadre d'analyse distingue les différents modèles conceptuels utilisés dans la littérature pour explorer le triptyque 'usage herbicide – adventices – production' (Figure 1). Nous présentons les avantages et les limites de chaque méthodologie, ainsi que les implications des choix méthodologiques sur l'interprétation des résultats obtenus. Nous présentons ensuite la synthèse des acquis sur deux questions majeures, d'une part quand et dans quelle mesure les adventices affectent-elles la production et d'autre part, peut-on concilier une réduction de l'usage d'herbicides et maintien du rendement.

¹ <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest>

² Pour simplifier, nous ne listons que des exemples de publications, en préférant les références les plus récentes et/ou françaises.

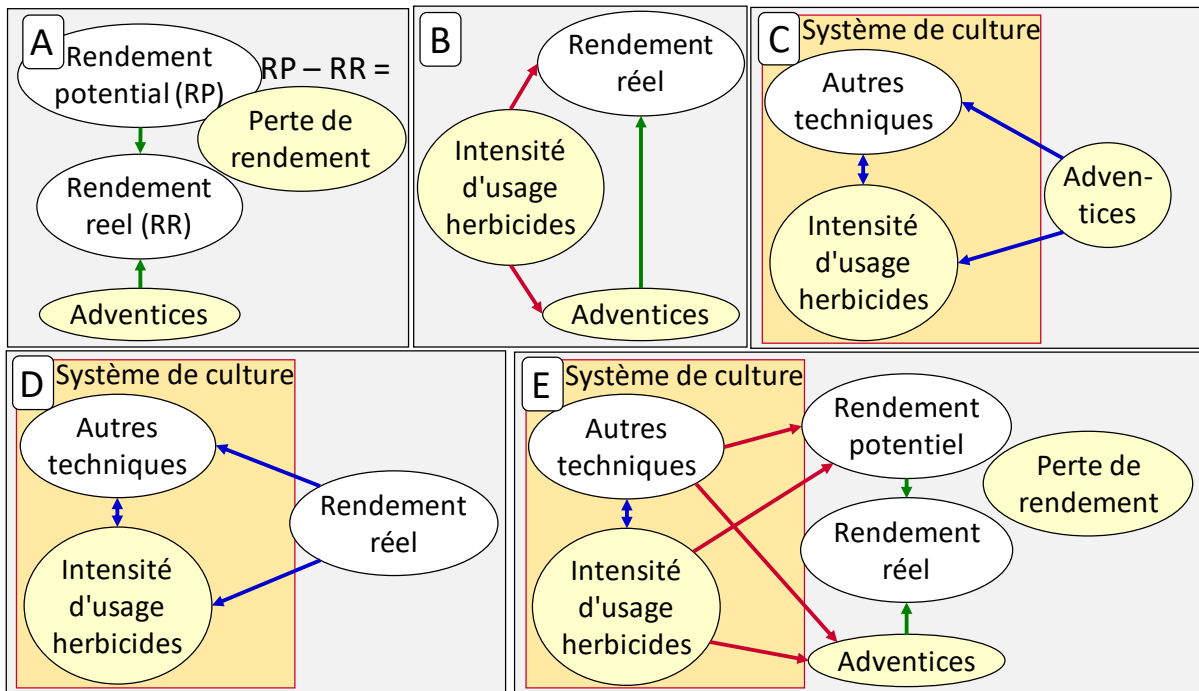


Figure 1 : Typologie d'études explorant les relations entre herbicides, adventices et rendement. A. Nuisibilité des adventices, B. Effet des herbicides, C. Stratégies herbicides en fonction du système de culture, D. Effet du système de culture sur le rendement, considérant les adventices comme boîte noire, E. Effet du système de culture sur le rendement, tenant compte explicitement des adventices. Le rendement potentiel est ici le rendement en situation continuellement sans adventices.

2. Impact des adventices sur la production des cultures

2.1 Quand et comment les adventices interfèrent-elles avec la production ?

Les adventices interagissent directement avec la culture, par compétition pour l'eau et les ressources minérales (Zimdahl, 2004), par allélopathie (Kadioglu *et al.*, 2005) et par parasitisme (Parker, 2009). Les adventices peuvent aussi héberger et/ou nourrir d'autres organismes dont les effets sur la production peuvent être bénéfiques (DiTommaso *et al.*, 2016) ou nuisibles (Gutteridge *et al.*, 2006).

La plupart des études concernant la compétition entre cultures et adventices non parasites analysent expérimentalement la compétition pour l'utilisation de ressources comme l'eau (McGiffen *et al.*, 1992), l'azote (Teyker *et al.*, 1991) et la lumière (Rajcan et Swanton, 2001). Beaucoup d'études ont cherché à identifier à quel moment la compétition se produit, afin de déterminer les périodes où le désherbage est essentiel pour assurer le potentiel de rendement. Et même si les effets de la compétition se révèlent tardivement (e.g. floraison), le potentiel de nuisibilité se définit dès les premiers stades de développement (Fahad *et al.*, 2015). Par exemple, si un colza reste indemne d'adventices jusqu'au stade 4-6 feuilles, la perte de rendement est inférieure à 10% ; par contre, détruire des adventices levant après le stade 4 feuilles n'a pas d'effet sur la perte de rendement (Martin *et al.*, 2001).

2.2 Comment quantifier l'interférence entre adventices et cultures ?

Les études des effets des adventices sur la perte de rendement souffrent de multiples défauts méthodologiques (voir la très détaillée analyse de Swanton *et al.*, 2015). Grossièrement, on distingue trois grands types de méthodes pour estimer les pertes de rendement dues aux adventices (Tableau 1).

Les **essais herbicides** (Tableau 1.A) sont des essais annuels factoriels standardisés conçus pour évaluer l'efficacité de traitements herbicides en terme de contrôle d'adventices³. Certains auteurs les ont utilisés pour calculer des pertes de rendement, en comparant le rendement des parcelles désherbées (comme proxy du témoin sans adventices) au rendement de parcelles non désherbées (et infestées d'adventices) (Milberg et Hallgren, 2004 ; Bera *et al.*, 2018).

D'autres études de nuisibilité identifient des zones à l'intérieur d'un **champ** ou de champs similaires, avec des **gradients d'enherbement** mais toutes choses égales par ailleurs (Tableau 1.B). La perte de rendement est alors estimée comme la différence des rendements des différentes zones avec le rendement le plus élevé considéré comme rendement potentiel ; cette différence est ensuite expliquée par des variables de pression adventices (densité de plantes, biomasse aérienne...).

Tableau 1 : Synthèse des méthodes d'étude des effets des adventices sur la perte de rendement

Méthode	Avantages	Limites	Conséquences
A. Essais herbicides au champ			
Comparer les rendements et adventices de parcelles/zones traitées et non traitées	<ul style="list-style-type: none"> - Nombreux systèmes de culture et pédoclimats - Flore adventice réelle plurispécifique 	Témoin rarement continuellement sans adventices	Perte sous-estimée
		Phytotoxicité des herbicides sur cultures possible	
		Essais mis en place dans des zones à fort enherbement	Perte sur-estimée, Validité locale des conclusions
		Études annuelles	Néglige la nuisibilité des adventices dans les futures cultures
B. Autres essais au champ			
Comparer le rendement de zones/parcelles avec un gradient d'enherbement au rendement le plus élevé, lier la perte de rendement à des indicateurs adventices	<ul style="list-style-type: none"> - Quelques systèmes de culture et pédoclimats - Flore adventice réelle plurispécifique - Détermination de la période critique "sans adventices" 	Le rendement le plus élevé est plus faible que le rendement potentiel	Perte sous-estimée
		Suivi insuffisant des processus, ressources et flores	Confusion des effets des adventices avec les effets environnementaux déterminant le gradient d'enherbement
		Études annuelles	Néglige la nuisibilité des adventices dans les futures cultures
C. Serre, parcelles jardinées			
Repiquage d'adventices à différentes densités et dates, Lier la perte de rendement à des indicateurs adventices	<ul style="list-style-type: none"> - Témoin sans adventices - Caractérisation de la flore adventice par des indicateurs 	Un seul couple culture-adventice	Non applicable aux flores plurispécifiques au champ
		Suivi insuffisant des processus, ressources	Incapacité à généraliser les seuils de nuisibilité
		Indicateurs trop loin des processus	
		Études annuelles	Néglige la nuisibilité des adventices dans les cultures futures

³ <https://pp1.eppo.int/standards/general>, <https://pp1.eppo.int/standards/herbicides>

Des études en **serre ou parcelles jardinées** créent des gradients d'enherbement, en repiquant des adventices (généralement une espèce) à différents moments et densités pour imiter des vagues de levées contrastées et à différents stades des cultures (Tableau 1.C). Les pertes de biomasse ou rendement des cultures sont ensuite corrélées à des variables adventices pour déterminer des seuils d'intervention (Oliver, 1988). Les variables adventices les plus fréquemment utilisées sont des densités de plantes (Cousens, 1985), la surface foliaire (Kropff et Spitters, 1991), ou la biomasse aérienne (Milberg et Hallgren, 2004).

Toutes ces méthodes souffrent de défauts méthodologiques (Tableau 1), dont le plus important est la **difficulté à estimer le rendement potentiel** en l'absence d'adventices. Même dans les essais herbicides, les zones traitées ne sont pas nécessairement continuellement sans adventices et la phytotoxicité des herbicides qui se manifeste dans certaines conditions météo ou stades (Carvalho *et al.*, 2009) peut conduire à sous-estimer le rendement potentiel. La meilleure méthode d'estimation des pertes de rendement à l'échelle annuelle consiste à comparer les rendements des zones avec flore adventice à des témoins sans flore et sans désherbage chimique ou mécanique pouvant affecter le potentiel de rendement (Adeux *et al.*, 2019b). Mais toutes ces approches **négligent la nuisibilité à long terme des adventices** alors que celle-ci est une des raisons principales de l'intervention incessante des agriculteurs pour contrôler les adventices (Cordeau et Schwartz, 2019).

Enfin, ces méthodes ne produisent que des conclusions à **validité locale**, avec un très fort **risque de confusion d'effets** mais pour différentes raisons. Les essais herbicides sont souvent mis en place dans des champs avec des fortes densités d'adventices ou des espèces problématiques (par exemple, du vulpin des champs ou de l'ivraie), et toute évaluation nationale basée sur de telles données surestime très probablement les pertes de rendement dues aux adventices. Les études suivant des gradients d'enherbement naturel au champ risquent de confondre l'effet de l'intensité de cet enherbement sur le rendement avec celui des conditions environnementales responsables de ces gradients. Les essais en conditions contrôlées ne souffrent pas de ce défaut mais d'une artificialisation extrême de la flore adventice.

2.3 Quelles implications pour la gestion des adventices ?

Certaines de ces études ont tenté de fournir des connaissances pour décider **quand désherber**, en fonction du stade la culture ou des adventices. Les essais comme ceux du Tableau 1.B ont tenté de déterminer la **période critique** qui doit être exempte d'adventices afin d'éviter les pertes de rendement (Martin *et al.*, 2001). Or, les ressources pour lesquelles cultures et adventices sont en compétition varient entre années, lieux et systèmes de culture. En conséquence, même pour une culture donnée, la période critique varie ainsi considérablement, en termes de début (2 à 14-feuilles dans le cas du maïs) et de fin (12 feuilles à 1 semaine après floraison) (Hall *et al.*, 1992 ; Hugo *et al.*, 2014).

D'autres études ont tenté de lier la décision à un **seuil de nuisibilité** des adventices, à partir des relations empiriques liant la perte de rendement à des indicateurs d'adventices établies au champ (Tableau 1.B) ou en conditions contrôlées (Tableau 1.C). Ce concept de seuil est hautement critiquable (Oliver, 1988 ; O'Donovan, 1996 ; Swanton *et al.*, 1999). En résumé, même les seuils les mieux conçus négligent généralement la variabilité des ressources du sol, quantifient rarement la perte de rendement due à des communautés d'adventices, et ne considèrent que les effets annuels. De plus, les indicateurs les plus pertinents car les plus proches des processus comme le taux de couverture ou la surface foliaire (Kropff et Spitters, 1991) ne sont pas adaptés pour la prise de décision. Enfin, le choix du seuil de nuisibilité ne modifie pas la fréquence de traitement herbicide, et la viabilité du système de culture n'est assurée que si la baisse d'usage d'herbicide est compensée par des techniques de gestion non chimiques (Munier-Jolain *et al.*, 2002).

2.4 Que peut-on retirer de ces études ?

La nuisibilité des adventices pour la production est étudiée généralement sans tenir compte de la complexité des pratiques culturales, de la nature plurispécifique de la flore adventice et des processus responsables de la perte de rendement, ce qui limite la validité et la généralité des résultats. La perte de rendement due aux adventices tend à être sous-estimée à cause de l'échelle d'analyse annuelle et des erreurs dans l'estimation du rendement potentiel. Cependant, malgré des défauts méthodologiques, toutes les études concluent que les adventices réduisent le rendement si elles ne sont pas contrôlées, particulièrement lorsqu'elles lèvent avant ou avec la culture. La perte de rendement est plus fortement corrélée à des variables proches des processus déterminant la compétition cultures-adventices qu'à la densité d'adventices.

3. Les effets des herbicides sur les adventices et la production

Cette partie évalue les études sur l'impact de l'intensité d'usage herbicide sur la flore adventice ou la perte de rendement, mais sans analyser l'impact direct des adventices sur le rendement (Figure 1.B). Pour simplifier, nous ne tiendrons pas compte de la question de la résistance aux herbicides.

3.1 Les essais herbicides

Les essais démontrent que les herbicides sont efficaces pour contrôler les adventices, avec une efficacité dépendant de l'espèce, des doses d'herbicides, dates et conditions d'application. Ces effets ont été résumés dans des guides (e.g., Mamarot et Rodriguez, 2003) et outils d'aide à la décision (e.g., Kudsk, 2008). Par contre, lorsqu'ils tentent d'évaluer à quel point les herbicides réduisent la perte de rendement due aux adventices, ils rencontrent les mêmes problèmes méthodologiques que ceux décrits dans la section précédente.

Rares sont les essais herbicides qui évaluent l'impact sur les adventices à long-terme. Une des exceptions (Boström et Fogelfors, 2002) évalue l'effet de la dose et de la fréquence des traitements sur 10 ans. Cet essai n'observait pas de différence de rendement entre champs traités annuellement à 25% et 100% de la dose pleine mais rapporte une augmentation de l'enherbement de 43-67%, infirmant donc un lien direct entre dose d'herbicides, adventices et production.

3.2 Les réseaux de parcelles agricoles

Suivre des réseaux de parcelles d'agriculteurs permet d'observer des pratiques et flores réelles et de couvrir un grand nombre de situations contrastées, à l'échelle régionale (Petit *et al.*, 2016) ou même nationale (Fried *et al.*, 2008). Ils contribuent à identifier des déterminants agronomiques, environnementaux, paysagers etc de la flore adventice mais présentent un énorme risque de confusion d'effets lorsqu'il s'agit d'évaluer l'impact de l'intensité d'usage herbicides sur les adventices ou le rendement (Tableau 2.B). Des suivis annuels, notamment ceux qui négligent l'histoire culturale et l'enherbement initial (par exemple, Gaba *et al.*, 2016), ne peuvent conclure sur le lien entre herbicides et adventices ou rendement puisque les agriculteurs adaptent l'intensité de traitement à la flore initiale et aux autres techniques culturales (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** 2, section suivante). L'absence de corrélation entre intensité herbicide et abondance d'adventices parfois rapportée (Gaba *et al.*, 2016 ; Petit *et al.*, 2016) ne peut donc pas être attribuée à une absence d'effet des herbicides mais découle des décisions de l'agriculteur.

Tableau 2 : Synthèse des méthodes d'étude des effets des herbicides sur les adventices et/ou le rendement

Méthode	Avantages	Limites	Conséquences
A. Essais herbicides au champ			
Voir Tableau 1.A			
B. Réseaux de parcelles agricoles			
Corréler adventices ou rendement à l'usage d'herbicides	- Effet des stratégies herbicides sur les adventices - Nombreux systèmes de culture et contextes de production	Intensité d'usage herbicides dépend de la flore et du système de culture	Confusion des effets de l'intensité d'usage herbicides avec ceux d'autres pratiques et de l'enherbement initial (ou de la perception de celui-ci par les agriculteurs)
		Souvent un seul relevé d'adventices, une seule année	
	- Identification de déterminants environnementaux, agronomiques et écologiques	Rendement estimé depuis vente de la récolte	Contribution des herbicides à préserver le rendement mal estimé

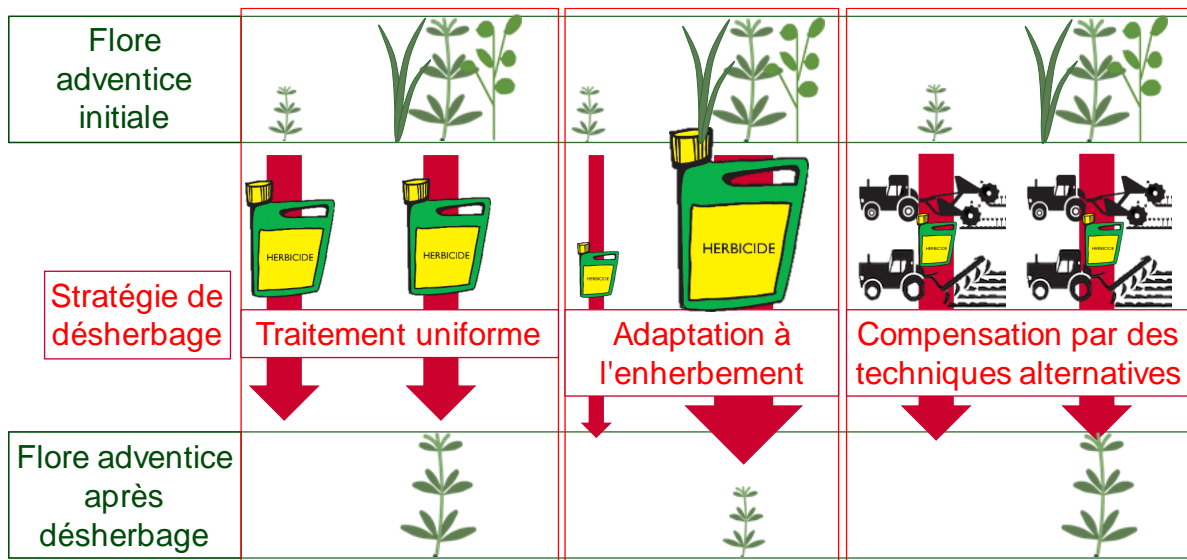


Figure 2 : Impact de l'enherbement initial et la stratégie de désherbage de l'agriculteur sur l'intensité d'usage herbicide et la flore adventice finale (Nathalie Colbach 2020 ©)

3.3 Conclusion

Dans les études annuelles et souvent limitées à une seule observation de flore par champ et par an, la contribution des herbicides au contrôle des adventices et de la perte de rendement peut être sous-estimée. Il est nécessaire d'évaluer la flore avant et après les interventions pour traiter ce type de questions. Bien que le désherbage ne soit pas toujours totalement efficace, il réduit la densité et/ou la biomasse des adventices et donc *in fine* la perte de rendement. Cependant, les adventices et la perte de rendement augmentent rarement quand l'intensité de l'usage des herbicides est réduite dans les parcelles agricoles pour lesquelles il est difficile d'estimer le rendement potentiel et de démêler l'effet des herbicides de celui des autres pratiques.

4. Comment les agriculteurs adaptent leur stratégie herbicide aux autres pratiques

L'intensité d'usage herbicide dépend des autres pratiques (Figure 1.C) et de la stratégie de gestion des agriculteurs (Tableau 3). Elle diminue fortement en cas de travail du sol, désherbage mécanique ou rotation diversifiée (Yvoz *et al.*, 2020), avec un effet non seulement du nombre mais aussi de la date des perturbations non chimiques (Tableau 4). Ce raisonnement stratégique doit se faire à long terme pour prévenir plutôt que détruire les adventices (Macé *et al.*, 2007). Cependant, de nombreux agriculteurs préfèrent contrôler plutôt que prévenir pour minimiser les risques d'échecs (Wilson *et al.*, 2008), et le type d'approche dépend, entre autres, de la situation de production. Par exemple, les agriculteurs ayant accès à des variétés tolérantes à des herbicides non sélectifs comme le glyphosate simplifient fréquemment leurs rotations (Fausti *et al.*, 2014) et leur travail du sol (Cerdeira et Duke, 2006). Leur raisonnement de gestion de la flore repose uniquement sur l'efficacité du glyphosate en culture pour compenser le semis dans un champ "sale" (Johnson *et al.*, 2007). Ils n'ont recours à la protection intégrée qu'une fois dans l'impasse technique, par exemple lorsque les adventices deviennent résistantes aux herbicides (Llewellyn *et al.*, 2004).

Tableau 3 : Schématisation des éléments clé déterminant la stratégie de gestion des adventices des agriculteurs, allant d'un contrôle exclusivement chimique à une protection intégrée.

Contrôle chimique	Déterminants de la stratégie de gestion	Protection intégrée
Forte	Intensité d'usage herbicide	Faible
Tactique	Raisonnement	Stratégique
Curative	Gestion	Préventive
Oui	Accès à des herbicides hautement efficaces	Non
Non	Risque accepté	Oui
Présence inévitable	Perception des adventices	Biologie/écologie connue
Faible	Prix des herbicides	Élevée

Tableau 4 : Variations majeures de l'intensité d'usage herbicide (IFT) en fonction des autres pratiques des agriculteurs, identifiées sur 272 systèmes de culture provenant d'enquêtes, statistiques agricoles, expertise de 6 régions françaises et 1 région espagnole (basé sur Colbach et Cordeau, 2018).

Pratique permettant de réduire l'IFT herbicide	Au lieu de	Variation IFT herbicide
Nombre de désherbages mécaniques ≥ 0.7 opération/an	< 0.7 opération/an	-1.2
Fréquence de travail du sol superficiel Oct-Mars > 1 an/3	≤ 1 an/3	-0.8
Dernier travail du sol < 20 j avant semis	≥ 20 j	-0.7
Rotation contenant des cultures d'été	Sans	-0.6
5 Rotations contenant 50% cultures d'été (ou prairies) et 50% cultures d'hiver	Un type de culture dominant	-0.6

L'aversion au risque influence aussi la stratégie de gestion, les agriculteurs préférant réduire la performance économique moyenne si cela permet de limiter les risques d'échec (Ridier *et al.*, 2013). Ceci explique pourquoi l'intensité d'usage herbicide est plus élevée dans les systèmes de culture provenant de parcelles d'agriculteurs que ceux testés en station expérimentale (-3% en moyenne sur la rotation), proposés par des conseillers (-15%) ou conçus par simulation (-26%) (Colbach et Cordeau, 2018). Des

facteurs économiques (prix des herbicides, taille de l'exploitation...), les besoins en main d'œuvre et l'organisation des chantiers de l'exploitation sont d'autres déterminants de la stratégie de gestion des agriculteurs (par ex, Llewellyn *et al.*, 2004). La perception des adventices par les agriculteurs peut également être un frein à la réduction de l'usage des herbicides, s'ils considèrent les adventices comme une fatalité, parfois attribuée au comportement de leurs voisins (voir Pasquier *et al.*, ce même numéro).

En conclusion, ces différents éléments indiquent que la stratégie d'usage d'herbicide de l'agriculteur, en termes de choix des produits, doses et dates/stades d'application, dépend des autres pratiques appliquées dans le champ ainsi que de la flore perçue par l'agriculteur, sa stratégie de gestion de risque et son contexte de production. Toute tentative d'évaluation de l'impact de l'intensité d'usage herbicide sur les adventices et la perte de rendement doit prendre en compte ces interactions pour éviter la confusion d'effets.

5. Les effets des systèmes de culture sur la production

Cette section traite des études qui ont analysé l'effet des systèmes de culture en entier sur la production, soit sans suivi de la flore adventice ou d'autres bioagresseurs (approche "boîte noire", (Figure 1.D), soit en les intégrant (Figure 1.E).

5.1 Les essais "système"

Des essais "système" ont été mis en place à travers toute l'Europe, visant une évaluation multicritère détaillée et pluriannuelle de systèmes de culture innovants (Lechenet *et al.*, 2017b). La plupart de ces essais ont été mis en place pour évaluer la faisabilité de ces systèmes, et très peu suivent la flore adventice ou tentent d'estimer une perte de rendement due aux adventices (le plus récemment en France, Adeux *et al.*, 2019a), avec tous les risques de confusion d'effets qui en découlent (Tableau 5.A).

L'approche holistique des essais "système", comparant des systèmes logiques et non pas des facteurs, peut produire des résultats apparemment contradictoires si on les compare. Une étude française conclue ainsi que le rendement diminuerait de 5-13% si l'usage de pesticides était réduit de 50% (Hossard *et al.*, 2014). Cependant, cette étude ne permet pas d'identifier le ou les bioagresseur(s) causant la réduction de rendement ou si cette réduction résulte d'une diminution du rendement potentiel causée par les changements de pratiques accompagnant la réduction de pesticides. Par exemple, retarder le semis du blé d'hiver permet de réduire la levée d'adventices (20-30%) mais diminue souvent le rendement en l'absence d'adventices (jusqu'à 30%) parce que les conditions météorologiques sont moins favorables en cas de semis retardé ou parce que cette pratique s'est accompagnée du choix d'une variété moins productive (Christensen *et al.*, 1994). Si, au contraire, les études prennent spécifiquement en compte la flore adventice, aucune corrélation entre intensité d'usage herbicide, densité d'adventices et production n'a pu être observée (le plus récemment en France, Adeux *et al.*, 2019a).

Par conséquent, la plupart des essais "système" démontrent la faisabilité locale d'une conciliation entre un faible usage herbicide et une faible perte de rendement, mais ne peuvent pas en expliquer les causes ni fournir du conseil qui soit généralisable dans d'autres contextes (Deytieux *et al.*, 2016). De plus, les résultats provenant de stations expérimentales (Deytieux, 2017) peuvent diverger de ceux collectés en exploitation (Lechenet *et al.*, 2017a). Les expérimentateurs ne raisonnent pas comme les agriculteurs puisque ils s'efforcent d'explorer des stratégies alternatives extrêmes sans que la survie économique de leur exploitation n'en dépende (Deytieux *et al.*, 2012).

Tableau 5 : Synthèse des méthodes d'étude des effets des systèmes de culture sur la production

Méthode	Avantages	Limites	Conséquences
A. Essais et réseaux d'essais "système"			
Évaluation multicritère et pluriannuelle de systèmes de culture innovants	<ul style="list-style-type: none"> - Vrais champs - Démonstration de faisabilité de systèmes innovants - Caractérisation des états du milieu et des cultures 	Adventices rarement suivies	Risque de confusion d'effets, ex. entre perte de rendement due aux adventices et baisse du rendement potentiel due aux changements de pratiques accompagnant la réduction d'herbicides
		Perte de rendement rarement mesurée mais estimée	
		Réduction d'usage herbicide compensée par pratiques alternatives	
		Suivi de peu de systèmes dans peu de pédoclimats	
B. Réseaux de parcelles agricoles			
Voir aussi Tableau 2.B			
Prise en compte du contexte de production et du système de culture	Nombreux contextes et systèmes	Pas de suivi des adventices mais intensité d'usage des pesticides comme proxy de la pression biotique	Risque de confusion entre perte de rendement due aux adventices et perte de rendement potentiel due aux changements de pratiques
PLS-PM et SEM [§] pour démêler les liens	Idem + Réseau avec suivi d'adventices + Moins de confusion d'effets	Système de culture adapté à l'enherbement	Confusion des effets des adventices sur les décisions des agriculteurs et des effets des pratiques sur les adventices
Diagnostic agronomique	<ul style="list-style-type: none"> - Caractérisation des états du milieu, des cultures et des adventices - Composantes du rendement 	Mesures annuelles	Néglige les effets long terme des adventices et des pratiques
		Difficile de suivre beaucoup de contextes/systèmes	Conclusions parfois difficiles à extrapoler
C. Combiner des simulations avec des mesures de terrain			
Comparer le rendement mesuré et celui simulé en l'absence d'adventices à partir de l'histoire culturale	<ul style="list-style-type: none"> - De nombreuses situations et/ou régions - Vraies pratiques agricoles - Identification de facteurs limitants du rendement 	Généralement annuel	Effets long terme des adventices négligés
		Adventices rarement suivies sur le terrain	Confusion d'effets des adventices avec d'autres facteurs limitants
		Comparaison de rendement réel observé au rendement potentiel simulé	Confusion d'effets des adventices avec biais dans le modèle
D. Simuler un réseau de parcelles virtuelles			
Simuler des systèmes de culture de nombreuses régions avec ou sans adventices, avec et sans herbicides	Idem cas précédent + Discrimination des effets des adventices vs autres facteurs limitants + Discrimination des effets des herbicides vs autres pratiques	Simulation	Conclusions dépendantes de la qualité du modèle

§ PLS-PM : partial least square path modelling et SEM : structural equation modelling

5.2 Les réseaux de parcelles agricoles

L'utilisation de données issues de réseaux de parcelles agricoles permet d'explorer une diversité importante de contextes de production et systèmes de culture, mais pose de nombreux problèmes méthodologiques (Tableau 2.B). Toutefois, de nouvelles méthodes d'analyses et de suivis ont été tentées. Par exemple, en prenant en compte la situation de production dans leur analyse, Lechenet et al. (2017a) n'ont pas trouvé de corrélation entre usage d'herbicides d'une part, et productivité ou rentabilité d'autre part. Cependant, leur étude ne comprenait pas de suivi des adventices sur le terrain, ce qui a limité l'exploration des sources de variations dans le réseau de parcelles (Tableau 5.B).

Quinio et al. (2017) ont associé des relevés détaillés d'histoires culturales, de flore adventice et de rendement avec des nouvelles méthodes statistiques (PLS-PM, partial least square path modelling et SEM, structural equation modelling). Cette approche permet de discriminer les trois voies qui lient l'intensité de gestion (gestion d'interculture, semis, pesticides, fertilisation), le rendement et la pression adventice (Tableau 5.B et Figure 3). Cette analyse diminue considérablement le risque de confusion d'effets, montrant que le rendement augmente avec l'intensité de gestion et diminue avec la pression adventice. Ainsi, les auteurs montrent que l'intensité de gestion diminue la pression biotique suffisamment pour annuler les effets négatifs des adventices sur le rendement.

Certaines études de diagnostic agronomique vont encore plus loin dans l'identification des facteurs limitants du rendement, avec des suivis très fins des bioagresseurs, du statut nutritionnel du couvert, des ressources disponibles dans le sol ou des composantes du rendement. Ces composantes sont alors liées à des facteurs limitants potentiels, montrant souvent que les adventices sont le facteur limitant le plus important, identifiant les variables adventices les plus liées à la variance des composantes de rendement (ex. la biomasse et la densité des adventices expliquent presque 40% de la variance du nombre de grains par m² en colza) ou les déterminants techniques de la flore adventice (ex. précédent, travail du sol et densité de semis en colza) (Valantin-Morison et Meynard, 2008). Cependant, le coût des mesures caractérisant la culture et les contraintes biotiques et abiotiques limite à la fois le nombre de situations suivies et la durée de ce suivi, négligeant ainsi les effets long terme des adventices et des pratiques.

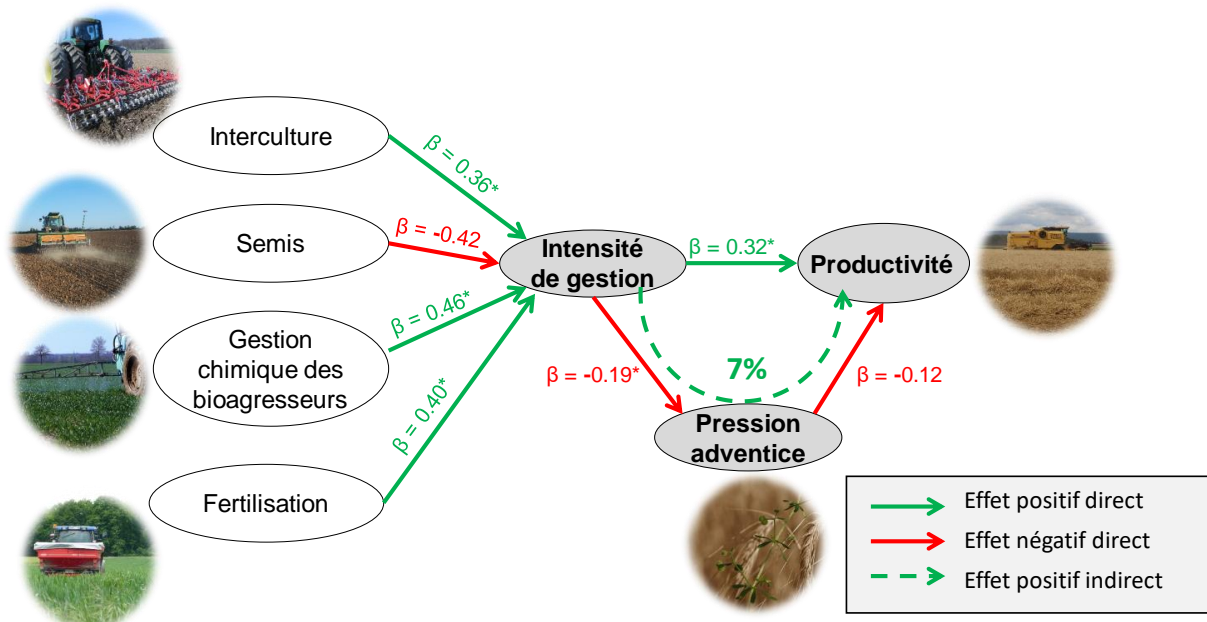


Figure 3 : L'intensité de gestion des parcelles diminue la pression adventice ($\beta = -0.19$) suffisamment pour limiter l'impact des adventices sur la production ($\beta = -0.12$). Ainsi, l'effet indirect des pratiques agricoles sur la productivité via une gestion des adventices est positif et correspond à 7% de l'effet total (direct + indirect) des pratiques sur le rendement (d'après Quinio *et al.*, 2017) (Stéphane Cordeau © 2018)

5.3 Combiner des simulations à des données de terrain

Les études de simulation tentent de dépasser toutes ces limites, en utilisant des modèles mécanistes de cultures (avec ou sans adventices) pour estimer le rendement potentiel (en l'absence d'adventices) si difficile à apprécier sur le terrain (Tableau 5.C), et le rendement réel dans de nombreuses situations et systèmes (en présence d'adventices) (Tableau 5.D). Dans la mesure des processus décrits dans le modèle, cette approche permet d'identifier les facteurs limitants et processus responsables, en réduisant le risque de confusion d'effet. Dans le premier cas, cette identification se fait en comparant le rendement potentiel simulé à des observations de terrain (Affholder *et al.*, 2013). Outre certains problèmes méthodologiques relevés pour d'autres approches (Tableau 5.C), ceci crée le risque de confondre des effets des conditions agronomiques et environnementaux avec le biais et l'erreur du modèle.

Pour limiter ce risque et étendre la dimension spatio-temporelle de l'étude, d'autres études ont opté pour le 100% virtuel (Colbach et Cordeau, 2018 ; Colbach *et al.*, 2019). Plusieurs centaines de systèmes de culture provenant d'enquêtes en exploitation, statistiques agricoles ou conseillers agricoles ont été simulés sur une durée de 30 ans (pour apprécier les effets long terme) et avec 10 scénarios climatiques. Cette approche a permis de démêler les effets de l'intensité d'usage herbicide de ceux des autres pratiques en comparant les flores et rendement simulés des systèmes de culture avec ceux de ces mêmes systèmes mais sans herbicides (et sans autre changement dans les pratiques). Les effets relatifs des adventices et des pratiques sur le rendement ont été discriminés en comparant le rendement de simulations avec et sans adventices. Cette étude a pu confirmer et/ou démontrer toutes les conclusions majeures de cette synthèse (Encadré 1), mais en les quantifiant avec des valeurs chiffrées valables sur une large gamme de situations et systèmes. Par exemple, la perte de rendement dépasse 50% lorsque la biomasse adventice dépasse la biomasse de la culture (Encadré 1.1), la biomasse adventice et la perte de rendement augmentent de respectivement 116% et 62% (en moyenne sur la rotation) lorsque les herbicides sont supprimés sans reconception du système de culture (Encadré 1.4).

Encadré 1 : Conclusions majeures sur les relations entre adventices, herbicides et rendement tirées de notre synthèse bibliographique.

1. La **perte de rendement augmente** avec la biomasse des adventices (mais pas la densité), et surtout le **ratio de la biomasse adventice / biomasse de la culture** au début de la floraison de la culture.
2. Les adventices les plus nuisibles occupent le champ tôt et rapidement et font de l'ombrage aux plantes voisines.
3. L'**intensité d'usage herbicide** n'est **pas liée** ni aux **adventices** ni à la **perte de rendement** parce que **les agriculteurs compensent** la réduction des herbicides par des moyens alternatifs préventifs et curatifs.
4. La biomasse **adventice** et la **perte de rendement augmentent** lorsque les **herbicides sont supprimés** sans compensation, et ces augmentations sont d'autant plus fortes lorsque l'usage d'herbicides était initialement important.
5. Ces **effets** étaient **plus visibles** à l'échelle **pluriannuelle** qu'annuelle.

6. Des conseils méthodologiques pour les futures études

Outre les conclusions sur les relations entre herbicides, adventices et rendement (Encadré 1), notre analyse bibliographique a permis d'identifier des recommandations pour la recherche. Il est impératif de considérer toutes les composantes du système étudié (Figure 1.E) et de décomposer finement comme illustré par la Figure 3. Notre analyse montre que les incohérences apparentes de la littérature au sujet

de l'effet des adventices et des herbicides sur la production sont dues à des différences méthodologiques. Le Tableau 6 résume quelques précautions indispensables pour éviter des confusions d'effets.

Tableau 6 : Précautions majeures à prendre dans les études des relations entre herbicides, adventices et rendement pour limiter les défauts méthodologiques.

Précautions	Pour éviter...	Suggestions
Tenir compte du contexte de production, des objectifs et perceptions des agriculteurs	De généraliser/extrapoler à des situations non concernées	Enquêter les agriculteurs avant (pour identifier leur perception) ou après l'étude pour confronter les résultats à l'étude à leurs dires Renseigner des variables pour décrire le contexte de production (pédoclimat, filière, recours irrigation, ...)
Tenir compte de toutes les composantes du système de culture en plus des herbicides	De confondre les effets des herbicides avec ceux des pratiques mises en place par les agriculteurs pour accompagner la réduction d'intensité d'usage herbicide	Documenter les pratiques agricoles finement, si possible par entretien
Caractériser les états des adventices et des ressources (lumière, azote, eau...) avant et après les pratiques étudiées	De confondre les effets des pratiques sur les adventices et le milieu avec ceux des pratiques mises en place par les agriculteurs pour s'adapter aux adventices et au milieu	Deux suivis par an, avant et après les pratiques, et mesures quantifiées des ressources
Mesurer des variables proches du processus visé	De ne pas détecter les effets recherchés	Mesurer la biomasse des adventices et celle de la culture et calculer le ratio des deux
Suivre sur plusieurs années ou mesurer des variables indicatrices des futurs effets (ex. production de semences adventices)	De ne pas détecter les effets des systèmes de culture et des adventices sur les cultures à venir	Positionner des mesures sur plusieurs années aux mêmes endroits

7. Conclusion

Notre analyse de la littérature montre que :

- Les adventices sont nuisibles pour la production mais cette nuisibilité est très variable et diminue lorsque :
 - o leur biomasse diminue,
 - o elles lèvent plus tard que la culture,
 - o la communauté adventice est diversifiée,
 - o les ressources du sol ne sont pas limitantes.
- L'étude de la nuisibilité réelle des adventices impose des contraintes méthodologiques..
- Les herbicides sont efficaces pour contrôler les adventices et réduire la perte de rendement mais leur usage peut être réduit sans perte de rendement due aux adventices si les systèmes de culture sont adaptés ou reconçus, en combinant les leviers agronomiques pour stimuler la régulation biologique des adventices.
- Il n'y a pas de solution unique mais un besoin de règles tenant compte du contexte de production, de la flore adventice, et des objectifs et perceptions de l'agriculteur.

Remerciements

Cette analyse bibliographique est le résultat de nombreux projets conduits au pôle *Gestion Durable des Adventices* à l'UMR Agroécologie, INRAE Dijon, en particulier des projets INRAE des départements *Environnement et Agronomie* et *Santé des Plantes et Environnement*, les projets ANR CoSAC (ANR-15-CE18-0007) et ADVHERB (ANR-08-001), le projet européen Horizon 2020 Research and Innovation programme N 727321 (IWMPPRAISE project), et des projets DEPHY-ferme et DEPHY-EXPE.

Références bibliographiques

- Adeux G., Munier-Jolain N., Meunier D., Farcy P., Carlesi S., Barberi P., Cordeau S., 2019a. Diversified grain-based cropping systems provide long-term weed control while limiting herbicide use and yield losses. *Agronomy for Sustainable Development* 39, 42.
- Adeux G., Munier-Jolain N. M., Vieren E., Carlesi S., Barberi P., Cordeau S., 2019b. Mitigating crop yield losses through weed diversity. *Nature Sustainability* 2, 1018-1026.
- Affholder F., Poeydebat C., Corbeels M., Scopel E., Tittonell P., 2013. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. *Field Crops Research* 143, 106-118.
- Bera S., Banerjee S., Soren C., 2018. Performance of sunflower as influenced by establishment technique and weed management. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7, 3193-3198.
- Bernhard R.H., Jensen J.E., Andreasen C., 1998. Prediction of yield loss caused by *Orobanche* spp. in carrot and pea crops based on the soil seedbank. *Weed Research* 38, 191-197.
- Blackshaw R.E., 1994. Differential Competitive Ability of Winter Wheat Cultivars against Downy Brome. *Agronomy Journal* 86, 649-654.
- Boström U., Fogelfors H., 2002. Long-term effects of herbicide-application strategies on weeds and yield in spring-sown cereals. *Weed Science* 50, 196-203.
- Carvalho (de) S.J.P., Nicolai M., Ferreira R.R., Oliveira Figueira (de) A.V., Christoffoleti P.J., 2009. Herbicide selectivity by differential metabolism: considerations for reducing crop damages. *Scientia Agricola* 66, 136-142.
- Caussanel J.-P., Kafiz B., Carteron A., 1988. Analyse expérimentale des effets de concurrence d'une graminée adventice dans un blé de printemps en relation avec le désherbage. *Weed Research* 28, 309-322.
- Cerdeira A.L., Duke S.O., 2006. The current status and environmental impacts of glyphosate-resistant crops: a review. *Journal of Environmental Quality* 35, 1633-1658.
- Christensen S., Rasmussen G., Olesen J.E., 1994. Differential weed suppression and weed control in winter wheat. *Aspects of Applied Biology* 40, 335-342.
- Colbach N., Cordeau S., 2018. Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. *European Journal of Agronomy* 94, 67-78.
- Colbach N., Gardarin A., Moreau D., 2019. The response of weed and crop species to shading: which parameters explain weed impacts on crop production? *Field Crops Research* 238, 45-55.
- Cordeau S., Schwartz M., 2019. Perception des adventices par les agriculteurs, conseillers, techniciens d'expérimentations et chercheurs en France. *In: AFPP, editor. 24e Conférence du COLUMA - journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Orléans, France*
- Cousens R., 1985. A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology* 107, 239-252.
- Davis A.S., Frisvold G.B., 2017. Are herbicides a once in a century method of weed control? *Pest Management Science* 73, 2209-2220.

- Deytieux V., Nemecek T., Freiermuth Knuchel R., Gaillard G., Munier-Jolain N.M., 2012. Is Integrated Weed Management efficient for reducing environmental impacts of cropping systems? A case study based on life cycle assessment. *European Journal of Agronomy* 36, 55-65.
- Deytieux V., Munier-Jolain N., Caneill J., 2016. Assessing the sustainability of cropping systems in single- and multi-site studies. A review of methods. *European Journal of Agronomy* 72, 107-126.
- Deytieux V., 2017. Performance et durabilité de systèmes de grande culture en production intégrée. PhD, Université de Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France.
- DiTommaso A., Averill K.M., Hoffmann M.P., Fuchsberg J.R., Losey J.E., 2016. Integrating insect, resistance, and floral resource management in weed control decision-making. *Weed Science* 64, 743-756.
- Fahad S., Hussain S., Chauhan B. S., Saud S., Wu C., Hassan S., Tanveer M., Jan A. & Huang J., 2015. Weed growth and crop yield loss in wheat as influenced by row spacing and weed emergence times. *Crop Protection* 71, 101-108.
- Fausti S.W., Sluis E.v.d., Qasmi B.A., Lundgren J., 2014. The effect of biotechnology and biofuels on U.S. Corn Belt Cropping Systems: updated version. Economics Staff Paper - Department of Economics, South Dakota State University, 23.
- Fried G., Norton L.R., Reboud X., 2008. Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 128, 68-76.
- Fron G., 1917. Plantes nuisibles à l'agriculture. *Encyclopédie agricole*. J.B. Baillières et Fils, Paris, 346p.
- Gaba S., Gabriel E., Chadœuf J., Bonneau F., Bretagnolle V., 2016. Herbicides do not ensure for higher wheat yield, but eliminate rare plant species. *Scientific Reports* 6, 30112.
- Gutteridge R.J., Jenkyn J.F., Bateman G.L., 2006. Effects of different cultivated or weed grasses, grown as pure stands or in combination with wheat, on take-all and its suppression in subsequent wheat crops. *Plant Pathology* 55, 696-704.
- Hall M.R., Swanton C.J., Anderson G.W., 1992. The critical period of weed control in grain corn (*Zea mays*). *Weed Science* 40, 441-447.
- Hossard L., Philibert A., Bertrand M., Colnenne-David C., Debaeke P., Munier-Jolain N., Jeuffroy M.-H., Richard G., Makowski D., 2014. Effects of halving pesticide use on wheat production. *Scientific Reports* 4.
- Hugo E., Morey L., Saayman-Du Toit A.E., Reinhardt C.F., 2014. Critical periods of weed control for naked crabgrass (*Digitaria nuda*), a grass weed in corn in South Africa. *Weed Science* 62, 647-656.
- Jäck O., Menegat A., Gerhards R., 2017. Winter wheat yield loss in response to *Avena fatua* competition and effect of reduced herbicide dose rates on seed production of this species. *Journal of Plant Diseases and Protection* 124, 371-382.
- Johnson W.G., Gibson K.D., Conley S.P., 2007. Does weed size matter? An Indiana grower perspective about weed control timing. *Weed Technology* 21, 542-546.
- Kadioglu I., Yanar Y., Asav U., 2005. Allelopathic effects of weeds extracts against seed germination of some plants. *Journal of Environmental Biology* 26, 169-173.
- Kropff M.J., Spitters C.J.T., 1991. A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of the weeds. *Weed Research* 31, 97-105.
- Kudsk P., 2008. Optimising herbicide dose: a straightforward approach to reduce the risk of side effects of herbicides. *The Environmentalist* 28, 49-55.
- Lechenet M., Bretagnolle V., Bockstaller C., Boissinot F., Petit M.-S., Petit S., Munier-Jolain N., 2014. Reconciling pesticide reduction with economic and environmental sustainability in arable farming. *PlosOne* 9, e97922.
- Lechenet M., Dessaint F., Py G., Makowski D., Munier-Jolain N., 2017a. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants* 3, 17008.
- Lechenet M., Deytieux V., Antichi D., Aubertot J.-N., Bärberi P., Bertrand M., Cellier V., Charles R., Colnenne-David C., Dachbrodt-Saaydeh S., Debaeke P., Doré T., Farcy P., Fernandez-Quintanilla C., Grandeau G., Hawes C., Jouy L., Justes E., Kierzek R., Kudsk P., Lamichhane J.R., Lescouret F.,

- Mazzoncini M., Melander B., Messéan A., Moonen A.-C., Newton A.C., Nolot J.-M., Panozzo S., Retaureau P., Sattin M., Schwarz J., Toqué C., Vasileiadis V.P., Munier-Jolain N., 2017b. Diversity of methodologies to experiment Integrated Pest Management in arable cropping systems: Analysis and reflections based on a European network. *European Journal of Agronomy* 83, 86-99.
- Liebman M., Gallandt E.R., 1997. Many Little Hammers: Ecological Management of Crop-Weed Interactions. In: *Ecology in Agriculture* (L.E. Jackson, Ed.) Academic Press: 291-343
- Llewellyn R.S., Lindner R.K., Pannell D.J., Powles S.B., 2004. Grain grower perceptions and use of integrated weed management. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 44, 993-1001.
- Macé K., Morlon P., Munier-Jolain N., Quéré L., 2007. Time scales as a factor in decision-making by French farmers on weed management in annual crops. *Agricultural Systems* 93, 115-142.
- Mamarot J., Rodriguez A., 2003. Sensibilité des mauvaises herbes aux herbicides en grandes cultures. ACTA, Paris
- Martin S.G., Van Acker R.C., Friesen L.F., 2001. Critical period of weed control in spring canola. *Weed Science* 49, 326-333.
- McGiffen M.E., Masiunas J.B., Huck M.G., 1992. Tomato and nightshade (*Solanum nigrum* L. and *S. ptycanthum* Dun.) effects on soil water content. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117, 730-735.
- 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.
- Munier-Jolain N.M., Chauvel B., Gasquez J., 2002. Long-term modelling of weed control strategies: analysis of threshold-based options for weed species with contrasted competitive abilities. *Weed Research* 42, 107-122.
- Neve P., Barney J.N., Buckley Y., Cousens R.D., Graham S., Jordan N.R., Lawton-Rauh A., Liebman M., Mesgaran M.B., Schut M., Shaw J., Storkey J., Baraibar B., Baucom R.S., Chalak M., Childs D.Z., Christensen S., Eizenberg H., Fernández-Quintanilla C., French K., Harsch M., Heijting S., Harrison L., Lodo D., Macel M., Maczey N., Merotto A., Mortensen D., Necajeva J., Peltzer D.A., Recasens J., Renton M., Riemens M., Sønderskov M., Williams M., 2017. Reviewing research priorities in weed ecology, evolution and management: a horizon scan. *Weed Research*.
- O'Donovan J.T., 1996. Weed economic thresholds: useful agronomic tool or pipe dream? *Phytoprotection* 77, 13-28.
- Oerke E.-C., Dehne H.W., Schonbeck F., Weber A., 1994. Crop production and crop protection - Estimated losses in major food and cash crops. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, 808 p.
- Oerke E.-C., 2006. Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science* 144, 31-43
- Oliver L.R., 1988. Principles of weed threshold research. *Weed Technology* 2, 398-403.
- Parker C., 2009. Observations on the current status of Orobanche and Striga problems worldwide. *Pest Management Science* 65, 453-459.
- Pasquier C., Angevin F., Le Bail M., 2020. Contribuer au diagnostic des obstacles à la réduction des herbicides dans les exploitations agricoles françaises. *Enquêtes sur le plateau du Neubourg. Innovations Agronomiques* 81, 151-171.
- Petit S., Gaba S., Grison A.-L., Meiss H., Simmoneau B., Munier-Jolain N., Bretagnolle V., 2016. Landscape scale management affects weed richness but not weed abundance in winter wheat fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 223, 41-47.
- Quinio M., De Waele M., Dessaint F., Biju-Duval L., Buthiot M., Cadet E., Bybee-Finley A.K., Guillemin 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, Part A, 134-143.
- Rajcan I., Swanton C.J., 2001. Understanding maize-weed competition: resource competition, light quality and the whole plant. *Field Crops Research* 71, 139-150.
- Ridier A., Ghali M.B.E., Nguyen G., Kephaliacos C., 2013. The role of risk aversion and labor constraints in the adoption of low input practices supported by the CAP green payments in cash crop farms. *Revue d'Études en Agriculture et Environnement* 94, 195-219.

- Soltani N., Dille J.A., Burke I.C., Everman W.J., Van Gessel M.J., Davis V.M., Sikkema P.H., 2016. Potential corn yield losses from weeds in North America. *Weed Technology* 30, 979-984.
- Song J.-S., Kim J.-W., Im J.-H., Lee K.-J., Lee B.-W., Kim D.-S., 2017. The Effects of Single- and Multiple-Weed Interference on Soybean Yield in the Far-Eastern Region of Russia. *Weed Science* 65, 371-380.
- Swanton C.J., Weaver S., Cowan P., Van Acker R., Deen W., Shrestha A., 1999. Weed thresholds: theory and applicability. *Journal of crop production* 2, 9-29.
- Swanton C.J., Nkoa R., Blackshaw R.E., 2015. Experimental methods for crop–weed competition studies. *Weed Science* 63, 2-11.
- Teyker R., Hoelzer H., Liebl R., 1991. Maize and pigweed response to nitrogen supply and form. *Plant and Soil* 135, 287-292.
- Valantin-Morison M., Meynard J.-M., 2008. Diagnosis of limiting factors of organic oilseed rape yield. A survey of farmers' fields. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 527-539.
- Wilson R.S., Tucker M.A., Hooker N.H., LeJeune J.T., Doohan D., 2008. Perceptions and beliefs about weed management: perspectives of Ohio grain and produce farmers. *Weed Technology* 22, 339-350.
- Yvoz S., Petit S., Biju-Duval L., Cordeau S., 2020. A framework to type crop management strategies within a production situation to improve the comprehension of weed communities. *European Journal of Agronomy* 115, 126009.
- Zimdahl R.L., 2004. *Weed-crop competition - A review*. 2nd Edition edition. Blackwell Publishing, Oxford, 220 p.

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 ou DOI).