

AFPP – 23^e CONFÉRENCE DU COLUMA
JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES
DIJON – 6, 7 ET 8 DÉCEMBRE 2016

ANALYSE DES EFFETS DIRECT ET INDIRECT DES PRATIQUES AGRICOLES SUR LES ADVENTICES ET LA PRODUCTION DE BLE TENDRE D'HIVER

S. CORDEAU, F. DESSAINT, M. QUINIO, M. DE WAELE, L. BIJU-DUVAL, M. BUTHIOT,
E. CADET, J.-P. GUILLEMIN

UMR Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France
(stephane.cordeau@dijon.inra.fr)

RÉSUMÉ

Les agriculteurs mettent en œuvre un ensemble de pratiques de façon raisonnée dans le but d'optimiser/maximiser leur production tout en réduisant l'action des facteurs limitant biotiques (ex. adventices) et abiotiques (ex. nutriments) sur la culture. Notre étude a pour objectif de quantifier l'effet direct et indirect (*via* une action sur la flore adventice) des pratiques agricoles sur le rendement. Nous avons analysé les relations entre les pratiques agricoles, la flore et le rendement de 152 parcelles de blé d'hiver sur la zone d'étude de Fénay (UMR Agroécologie, Dijon) par PLS-PM (partial least square path modelling). Nos résultats montrent que les pratiques agricoles ont un effet direct positif ($\beta = 0,32$) sur le rendement et négatif ($\beta = -0,19$) sur la flore. Cet effet contrebalance l'effet négatif ($\beta = -0,12$) de la flore sur le rendement. Notre étude montre que les pratiques agricoles ont un effet indirect (*via* une modification de la flore) positif sur la production (7% de l'effet total). Ce résultat confirme que la gestion et la maîtrise de la flore adventice permet le maintien du potentiel de production agricole.

Mots-clés : gestion des adventices, blé tendre d'hiver, rendement, PLS-PM, système de culture.

ABSTRACT

ANALYSIS OF DIRECT AND INDIRECT EFFECTS OF FARMING PRACTICES ON WEEDS AND WINTER WHEAT YIELD

Farmers implement farming practices to maximize production by limiting biotic (e.g. weeds) and abiotic (e.g. nutrient) growth factors. Our study aimed to quantify direct and indirect (through a change of weed pressure) effects of farming practices on yield. We analysed the relationships between farming practices, weeds and yield of 152 wheat fields located in the study site of Fénay (UMR Agroécologie, Dijon) using partial least square path modelling (PLS-PM). Our results showed that farming practices had a positive direct effect on crop productivity ($\beta = 0.32$). Farming practices decreased weed pressure ($\beta = -0.19$) and had a sufficiently negative effect on weeds to counteract the negative impact of weeds on yield ($\beta = -0.12$). Thus, the indirect effect of farming practices on productivity through a change of weed pressure was positive and accounted for 7% of the total (direct + indirect) effect of farming practices on productivity. This key result confirms that effective weed management can sustain crop production.

Keywords: Weed management, winter wheat, yield, partial least square path modelling, cropping system.

INTRODUCTION

Il est largement admis actuellement que l'agriculture intensive produit des effets négatifs sur l'environnement (Stoate et al, 2009). Dans ce contexte, le défi pour les agriculteurs est d'atteindre la performance à la fois économique et environnementale. Les agriculteurs mettent en œuvre des combinaisons de pratiques agricoles dans leurs parcelles afin d'atteindre un niveau substantiel de production tout en faisant face à différents stress biotiques et abiotiques. Les adventices représentent une des principales contraintes biotiques dans les agroécosystèmes (Oerke, 2006). Les stratégies de gestion des mauvaises herbes varient mais jusqu'à présent dans les pays développés, elles reposent essentiellement sur l'application d'herbicides de synthèse (Chauvel et al, 2012). En France, les herbicides représentaient 43,8% de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques en 2014 (<http://www.uipp.org/>). La réduction de la dépendance des systèmes de culture à l'utilisation de l'herbicide est actuellement promue dans toute l'Europe (par exemple la législation européenne et le plan ECOPHYTO en France). Ainsi, la gestion intégrée des adventices à l'échelle des systèmes de culture est expérimentée (Bastiaans et al, 2008 ; Chikowo et al, 2009).

Les décisions stratégiques de mise en œuvre des pratiques culturales se caractérisent par des choix à long terme à l'échelle du système de culture. Elles comprennent, par exemple, la succession des cultures, le type de travail du sol, la gestion des résidus de culture, ... Ces choix sont pris en compte afin d'optimiser voire maximiser la production des cultures (par exemple, diversifier la succession des cultures pour réduire l'impact des agents parasitaires, le labour pour enterrer les résidus de culture source d'inoculum primaire d'agents pathogènes et restructurer le sol, ...). Ces pratiques sont également connues pour influencer la composition et l'importance des communautés d'adventices (Fried et al, 2008). La banque de semences et l'émergence des mauvaises herbes sont également affectées par la rotation des cultures (Anderson 2007).

Un grand nombre d'études ont évalué l'impact global d'un système de culture vu dans son ensemble (rotation + itinéraire technique appliqué à chaque culture) sur les rendements des cultures et les adventices (voir par exemple Chikowo et al., 2009), mais aucune étude n'a séparé les effets confondants de chaque composante du système de culture. En effet, la plupart des pratiques agricoles mises en place pour optimiser la croissance et le développement des cultures, ont un effet direct sur la communauté de mauvaises herbes (e.g. diminution de l'abondance, stimulation de la germination, augmentation de la croissance), qui en conséquence ont probablement une incidence indirecte sur la production des cultures. Par exemple, le travail du sol peut améliorer la structure du sol pour favoriser l'émergence des plantes cultivées, l'établissement de leurs racines et leur croissance initiale (Mead et Chan, 1988). Cependant, le travail du sol stimule également la germination des semences de mauvaises herbes (Bàrberi et Lo Cascio, 2001) ce qui conduit à l'établissement d'une communauté d'adventices susceptible de concurrencer la culture de rente. La fertilisation azotée a pour objectif de maximiser la croissance de la plante cultivée (Gajri et al., 1993) mais une grande disponibilité en azote promeut les adventices nitrophiles, augmente leur croissance (Moreau et al., 2014) et donc la concurrence avec la culture, ce qui peut engendrer une diminution du rendement.

Peu d'études ont tenté de démêler les effets des pratiques culturales sur les adventices et le rendement. Des études ont porté sur l'effet global des systèmes de culture sur les adventices et les rendements des cultures. Chikowo et al. (2009) ont démontré que la gestion intégrée des mauvaises

herbes permettrait de réduire la dépendance aux herbicides, maintenir une faible pression biotique des adventices et d'assurer la productivité du système. Cependant, ces études ne permettent pas de mettre en évidence de liens de causalité entre ces trois conclusions. Aucune étude n'a jamais quantifié les effets directs des pratiques agricoles sur le rendement et l'effet indirect de ces pratiques agricoles sur le rendement *via* des changements de pression exercée par les communautés adventices.

L'objectif de cette étude a été de démêler et de quantifier les effets directs et indirects (*via* la modulation de pression exercée par les mauvaises herbes) des pratiques agricoles sur la production des cultures (i.e. de rendement) pour le blé d'hiver en conduite conventionnelle. Le blé a été choisi car c'est la principale espèce cultivée en France et en Europe (Rabbinge et van Diepen, 2000). Les pratiques agricoles, les rendements et les communautés adventices qui ont été recueillies pour 152 parcelles entre 2006 et 2013 dans une zone d'étude de l'UMR Agroécologie située à proximité de Dijon, ont été analysés. Nous avons posé comme hypothèse que l'effet indirect des pratiques agricoles sur la production *via* une modification de la pression exercée par les mauvaises herbes sur la culture est positif, puisque l'effet négatif des pratiques agricoles sur les adventices pourrait compenser l'effet négatif des mauvaises herbes sur le rendement du blé.

MATERIEL ET MÉTHODE

LA ZONE D'ÉTUDE

L'étude a été menée dans la zone d'étude de Féney près de Dijon (une zone d'étude de l'UMR Agroécologie). Cette zone agricole de 890 ha est composée d'environ 130 parcelles contiguës. La zone est considérée comme homogène pour le type de sol (argileux et limono-argileux) et pour les conditions climatiques (744 mm an⁻¹). Il s'agit d'une zone de grandes cultures avec principalement des cultures d'hiver (42% en céréales et 13% en colza) en rotation avec quelques cultures de printemps (orge de printemps et tournesol). Chaque année, des enquêtes (pratiques culturales et rendement) sont réalisées auprès des agriculteurs et des relevés de flore sont effectués pour chacune des parcelles. Le jeu de données est composé de 152 « parcelle-année » cultivées en blé d'hiver entre 2006 et 2013 (le jeu global actuel comprend 651 « parcelle-année »).

LA COLLECTE DES DONNEES

Relevé de flore

Les relevés de flore sont effectués par un parcours dans une zone de 2000 m² (40 x 50 m) à au moins 20 m du bord de la parcelle. La moitié des relevés a été faite début mars, et l'autre moitié de la mi-mars jusqu'au début du mois de mai, après la dernière application d'herbicide. Aucune parcelle ne mettant en œuvre de désherbage mécanique, nous avons donc observé la flore restante après toute action de désherbage.

L'ensemble des espèces adventices a été répertorié et leur abondance a été estimée visuellement suivant la méthodologie de Barralis (1977) et Fried et al. (2009). Il s'agit de 6 classes de densité dont les centres de classe sont : 0,0005, 0,5, 1,5, 11,5, 35,5 et 75,5. L'abondance totale a été calculée en sommant ces valeurs sur l'ensemble des espèces présentes. La richesse spécifique, l'abondance totale et l'indice de diversité de Shannon ont été calculés par chaque « parcelle-année » (Tableau I).

Tableau I : Description des variables utilisées dans l'analyse de données.
Description of variables used in the data analysis.

Variables latentes (VL)		Variables manifestes (VM)	Signification	Unité	Moyenne [min-max] N: Nombre de parcelles
Productivité		Rendement	Quantité de grain par surface	q/ha	72 [29-102]
Pression adventice		VAbondance	Nombre total d'individus (racine carrée)	Individus m ²	1,95 [0 – 10,02]
		Richesse	Nombre d'espèces	Pour 2000 m ²	5,2 [0 – 18]
		Shannon	Diversité taxonomique de Shannon	Pas d'unité	0,98 [0 – 2,49]
Pratiques agricoles	Semis	Date de semis		Nombre de jour Julien (depuis 1er juin)	134 [121 – 168]
		Densité de semis	Densité sur le rang, nombre de plante par mètre linéaire calculé à partir de la densité de semis et de l'écartement entre rang	Plante par metre linéaire	48,1 [33,8 – 72]
	Gestion chimique des bioagresseurs	IFT-H	Indice de fréquence de traitement herbicide	Pas d'unité	1,5 [0,06 – 3,90]
		IFT-F	Indice de fréquence de traitement fongicide	Pas d'unité	1,36 [0 – 4,7]
		IFT-I	Indice de fréquence de traitement insecticide	Pas d'unité	0,70 [0 – 3,33]
		IFT-T	Indice de fréquence de traitement total	Pas d'unité	3,96 [0,97 – 9,46]
		HRAC	Nombre de mode d'action herbicide utilisé par an	Pas d'unité	1: N=45 2: N=72 3: N=29 4: N=5 5: N=1
		FRAC	Nombre de mode d'action fongicide utilisé par an	Pas d'unité	0: N=3 1: N=21 2: N=68 3: N=40 4: N=19 5: N=1
	Gestion de l'interculture	IRAC	Nombre de mode d'action insecticide utilisé par an	Pas d'unité	0: N=58 1: N=94
		Décompactage	Nombre de décompactage par an (multiplié par -1)	Pas d'unité	0: N=126 -1: N=26
		Labour	Nombre de labour par an	Pas d'unité	0: N=59 1: N=93
	Fertilisation azotée	Travail du sol superficiel	Nombre de travail du sol durant l'interculture pour la gestion des pailles et la préparation du lit de semences	Pas d'unité	0 : N=2 1 : N=21 2 : N=41 3 : N=48 4 : N=36 5 : N=3 6 : N=1
		Fractionnement	Fractionnement des apports d'azote : nombre d'apport.	Pas d'unité	1: N=4 2: N=25 3: N=91 4: N=26 5: N=6
		Dose	Quantité total d'azote apportée par an	Kg N.ha ⁻¹	80,5 [52 – 266]

Enquête « Pratiques agricoles »

Des enquêtes auprès des agriculteurs ont été réalisées afin de recueillir les informations sur le rendement et les pratiques culturales. Quatorze pratiques agricoles ont été retenues (Tableau I) et organisées en quatre groupes (semis, gestion chimique des bioagresseurs, gestion de l'interculture et fertilisation azotée). Pour chaque pratique culturale, nous avons enregistré la date et le nombre de passages. Les différents IFT (indice de fréquence de traitement) ont été calculés en utilisant le nom du produit et la dose appliquée à chaque passage avec la méthode de Champeau (2006). Les modes d'action des produits phytopharmaceutiques (à savoir HRAC, FRAC, IRAC) ont été extraits de sites internet (www.hracglobal.com/, www.frac.info/ et www.irac-online.org/).

Analyse de données par PLS-PM (partial least square path modelling)

PLS-PM est une méthode principalement utilisée en sciences sociales. Depuis quelques années, elle trouve des développements sur les questions écologiques (Puech et al, 2015). Le modèle proposé repose sur les connaissances actuelles sur le fonctionnement des agroécosystèmes. Il fait l'hypothèse que la production agricole (« *Productivité* ») est liée d'une part aux pratiques agricoles (« *Pratiques agricoles* ») et d'autre part à la pression exercée par la communauté adventice présente sur la parcelle (« *Pression adventice* »). Il fait aussi l'hypothèse que les pratiques agricoles modulent la pression adventice (Figure 1).

L'effet des différentes pratiques agricoles est regroupé dans 4 indicateurs (appelé Variable Latente ou VL dans le jargon statistique PLS-PM) : « *Gestion de l'interculture* », « *Semis* », « *Gestion chimique des bioagresseurs* » et « *Fertilisation azotée* ». Chacun de ces indicateurs est estimé à partir de variables mesurées ou observées (appelées Variable Manifeste ou VM) ; ces variables ont été retenues car elles sont censées être représentatives de l'indicateur. La démarche est similaire pour les indicateurs « *Pression adventice* » et « *Productivité* ». Les différents paramètres décrivant les effets et/ou les relations entre les VL (β) ou les VL et les VM (λ) ont été estimés avec la méthode PLS-PM (Tenenhaus et al., 2005).

Toutes les analyses ont été réalisées avec le logiciel R version 3.1.2 (R Core Team, 2015), en utilisant le package PLSPM (Sanchez et Trinchera, 2012).

RESULTATS

DESCRIPTION DES PARCELLES ETUDIEES

Le rendement moyen du blé tendre d'hiver pour les 152 parcelles dans la zone d'étude de Fényay entre 2006 et 2013 a été de 72 ± 11 q/ha (moyenne \pm écart-type) avec des variations interannuelles (plus faible moyenne en 2007 avec 63 ± 12 q/ha et plus haute moyenne en 2012 avec 79 ± 7 q/ha). En région Bourgogne, le rendement moyen a été de 66 q/ha sur la même période (données Agreste). L'abondance des adventices varie entre les années (Anova, $P < 0,001$). Après désherbage, la présence des adventices dans les parcelles de la zone d'étude est modérée avec une moyenne de l'ordre de 5,2 espèces et 3,8 individus m^{-2} . La richesse spécifique varie de 0 à 18 et l'abondance totale de 0 à 100 individus m^{-2} . En ce qui concerne l'usage des herbicides, l'IFT herbicide moyen est de $1,5 \pm 0,7$ ce qui est proche de la référence régionale de 1,4 (données Agreste).

LE MODELE COMPLET

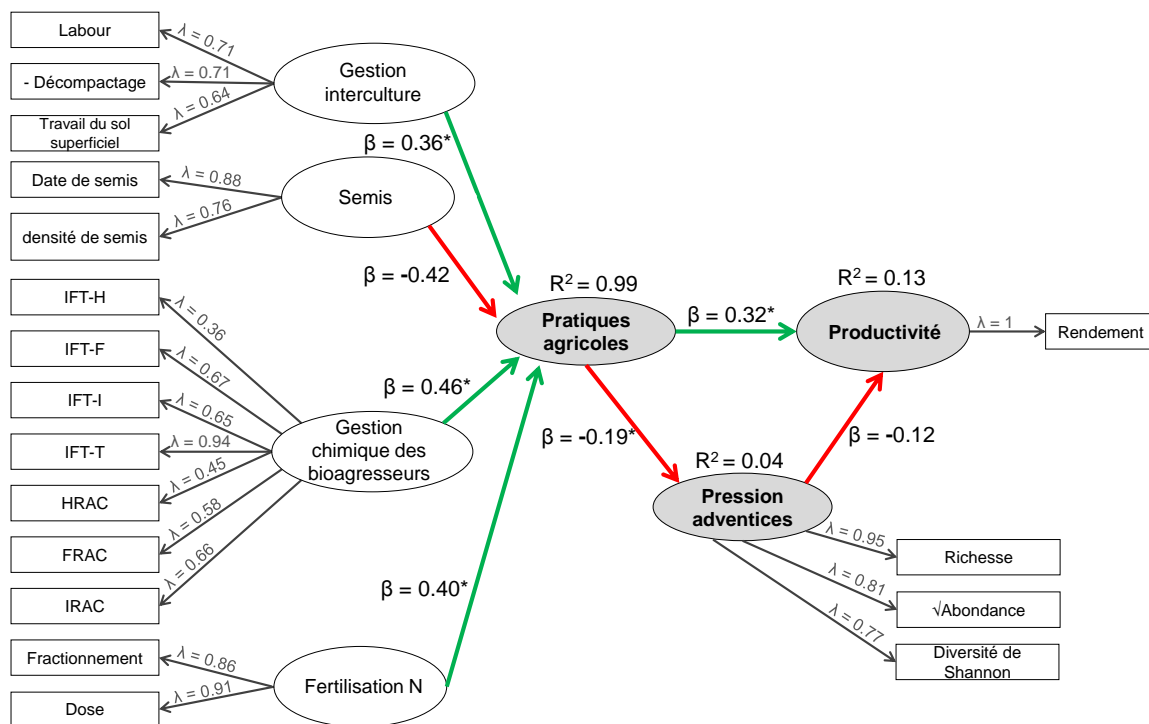
La qualité de l'ajustement (GoF) du modèle complet est de 0,44, ce qui est une valeur moyenne et acceptable au regard des autres études déjà publiées. La procédure de bootstrap a mis en évidence que cinq des sept coefficients (β) étaient significatifs au seuil de 5% (Figure 1). L'effet direct de « *Pratiques agricoles* » sur « *Productivité* » est positif ($\beta = 0,32$ alors qu'il est négatif sur « *Pression adventices* » ($\beta = -0,19$). Ce dernier est aussi plus élevé que l'effet négatif « *Pression adventices* » sur

« Productivité » ($\beta = -0,12$). Il en résulte que l'effet indirect des pratiques agricoles sur la productivité grâce à un changement de pression exercée par les adventices est faible mais positif ($\beta = -0,19 \times -0,12 = 0,02$). Cet effet indirect positif démontre que les pratiques agricoles ont un impact positif sur la productivité grâce à une baisse de la pression adventice. Par conséquent, l'accumulation de ces deux effets directs et indirects des pratiques agricoles sur la productivité conduit à un effet positif sur la productivité (effet total = $0,32 + 0,02 = 0,34$). Ainsi, la gestion efficace de la flore adventice augmente l'effet des pratiques agricole sur le rendement de l'ordre de 7%.

La variable « Pratiques agricoles » est très bien expliquée ($R^2 = 0,99$) par les autres variables de pratiques (Figure 1) : trois des VL sont corrélés positivement et significativement (« Gestion chimique des bioagresseurs », « Fertilisation N » et « Gestion de l'interculture ») alors que la VL « Semis », l'est négativement. C'est la VL « Gestion chimique des bioagresseurs » qui présente la plus forte relation avec « Pratiques agricoles » ($\beta = 0,46$). La VL « Pression adventice » est faiblement expliquée par les variables choisies pour la décrire ($R^2 = 0,04$).

Figure 1 : Relation entre pratiques agricoles, flore adventice et rendement du blé tendre de 152 parcelles analysées par PLS-PM. Les coefficients β estiment la force et le sens (rouge = négatif, vert = positif) du lien entre les indicateurs (variables latentes VL, ellipse). Les coefficients λ estiment la corrélation entre les variables observées (variables manifestes VM, rectangles) et les indicateurs (VL) qu'elles décrivent (ellipse). Les étoiles indiquent que les coefficients β sont significativement différents de 0 selon un intervalle de confiance de 95%. La signification des variables est détaillée dans le tableau I.

Relationships between farming practices, weeds and winter wheat yield from 152 fields analysed by PLS-PM. Path coefficients (β) were computed from regressions and estimated strength and direction (red arrow = negative; green arrow = positive) of relationships between the LVs (rectangles). Loadings (λ) estimated the correlation between an MV (rectangles) and its respective LV (ovals). Stars indicate that the path coefficients (β) were significantly different from 0 based on 95% percentile confidence intervals calculated using 1000 bootstrap samples. Meaning of variables are detailed in Table I.



DISCUSSION

Le modèle PLS-PM a été construit sur la base de la littérature existante. Des effets direct et indirect dues à la pression exercée par les adventices ont été quantifiés en utilisant un jeu de données récoltées sur 152 parcelles de blé tendre d'hiver de manière homogène entre 2006 et 2013 (zone d'étude de Féney, Bourgogne).

Les pratiques culturales mises en place par un agriculteur dans une parcelle ont pour objectif d'atteindre un rendement qu'il s'est fixé et donc de maîtriser les facteurs limitants cet objectif (Van Ittersum et al., 2013). Nos résultats confirment que les pratiques agricoles réalisées ont été efficaces (effet positif) pour assurer la production du blé (rendement moyen de la zone de Féney supérieur au rendement moyen de la Bourgogne). Les pratiques agricoles ont également été efficaces pour contrôler la flore adventice (effet négatif, $\beta = -0,19$) et suffisamment efficace pour contrebalancer l'effet négatif de la flore sur le rendement ($\beta = -0,12$). Ceci confirme donc notre hypothèse initiale que l'effet indirect est positif, et que gérer la flore de manière efficace permet de maintenir le potentiel de rendement élaboré par la réussite des autres pratiques agricoles.

Dans notre modèle, la variable latente « *Pratiques agricoles* » est bien expliquée ($R^2 = 0,99$) et est principalement lié à la variable latente « *Pratiques de gestion chimiques des bioagresseurs* » ($\beta = 0,46$), nous pouvons conclure que les rendements sont positivement liés à la réussite de la gestion chimique des bioagresseurs et en particulier de la flore adventice. Dans ce contexte, nous avons estimé que l'effet indirect des pratiques agricoles sur la productivité *via* le contrôle des adventices est positif et de l'ordre de 7% de l'effet total.

La modélisation PLS-PM est un outil pertinent pour modéliser l'effet de système de culture ; en effet les changements provoqués par une pratique (par exemple pré-semis labour) induisent des changements dans les autres pratiques, et cela se reflète dans le modèle par des changements dans les scores pour chacun des variables latentes. Il permet aussi, par la construction d'un modèle adapté et en phase avec les connaissances de l'agroécosystème de calculer des effets directs et indirects, ce que ne permettent pas les autres méthodes d'analyses.

CONCLUSION

Cette étude a permis de démêler l'effet direct et indirect (via une modification de la flore) des pratiques agricoles sur le rendement du blé tendre d'hiver en Bourgogne. Nous avons montré que les pratiques agricoles avaient un effet positif sur la production, négatif sur la flore adventice, et que la flore adventice avait un effet négatif sur le rendement. La modélisation PLS-PM a permis d'identifier que l'effet des pratiques sur la flore était suffisamment fort pour contrebalancer l'effet négatif de la flore sur le rendement, et ainsi assurer le maintien du potentiel de rendement.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été financièrement supporté par les projets ANR Cosac (ANR-14-CE18-0007) et Agrobiose (ANR-13-AGRO-0001). Nous remercions les agriculteurs de la zone de Féney pour leurs collaborations depuis le début du suivi de leur parcelle, effectué par l'UMR Agroécologie. Les études sur la zone de Féney sont coordonnées par Sandrine Petit et Jean Philippe Guillemin. Nous remercions Sandrine Petit pour ses efforts dans cette entreprise.

BIBLIOGRAPHIE

- Anderson, R.L., 2007. Managing weeds with a dualistic approach of prevention and control. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 13–18.
- Bàrberi, P., Lo Cascio, B., 2001. Long-term tillage and crop rotation effects on weed seedbank size and composition. *Weed Res.* 41, 325-340.
- Barralis, G., 1977. Répartition et densité des principales mauvaises herbes en France. Institut National de la Recherche Agronomique, Laboratoire de Malherbologie.
- Bastiaans, L., Paolini, R., Baumann, D.T., 2008. Focus on ecological weed management: what is hindering adoption? *Weed Res.* 48, 481–491.
- Champeaux, C., 2006. Recours à l'utilisation de pesticides en grandes cultures. Evolution de l'indicateur de fréquence de traitement au travers des enquêtes « Pratiques Culturelles » du SCEES entre 1994 et 2001. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche & INRA, Paris.
- Chauvel, B., Guillemain, J.-P., Gasquez, J., Gauvrit, C., 2012. History of chemical weeding from 1944 to 2011 in France: Changes and evolution of herbicide molecules. *Crop Protection* 42, 320-326.
- Chikowo, R., Faloya, V., Petit, S., Munier-Jolain, N.M., 2009. Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. *Agr. Ecosyst. Environ.* 132, 237-242.
- Fried, G., Norton, L.R., Reboud, X., 2008. Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. *Agr. Ecosyst. Environ.* 128, 68-76.
- Fried, G., Petit, S., Dessaint, F., Reboud, X., 2009. Arable weed decline in Northern France: Crop edges as refugia for weed conservation? *Biol. Conserv.* 142, 238-243.
- Gajri, P.R., Prihar, S.S., Arora, V.K., 1993. Interdependence of nitrogen and irrigation effects on growth and input-use efficiencies in wheat. *Field Crops Res.* 31, 71-86.
- Mead, J., Chan, K., 1988. Effect of deep tillage and seedbed preparation on the growth and yield of wheat on a hard-setting soil. *Anim. Prod. Sci.* 28, 491-498.
- Moreau, D., Busset, H., Matejicek, A., Munier-Jolain, N., 2014. The ecophysiological determinants of nitrophily in annual weed species. *Weed Res.* 54, 335-346.
- Oerke, E.-C., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science* 144, 31-43.
- Puech, C., Poggi, S., Baudry, J., Aviron, S., 2015. Do farming practices affect natural enemies at the landscape scale? *Landsc. Ecol.* 30, 125-140.
- R Core Team, 2015. R: A Language and Environment for Statistical Computing. the R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rabbinge, R., van Diepen, C.A., 2000. Changes in agriculture and land use in Europe. *European Journal of Agronomy* 13, 85-99.
- Sanchez, G., Trinchera, L., 2012. Plspm: partial least squares data analysis methods. R package version 0.2-2.
- 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.
- Tenenhaus, M., Vinzi, V.E., Chatelin, Y.-M., Lauro, C., 2005. PLS path modeling. *Comput. Stat. Data An.* 48, 159-205.
- van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crop Res.* 143, 4-17.