



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



2014-2015

MASTER FAGE
Biologie et Ecologie pour la Forêt,
l'Agronomie et l'Environnement

Spécialité
Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes

ANALYSE DES RELATIONS ENTRE PRATIQUES
AGRICOLES, FLORE ADVENTICE ET
PRODUCTION AGRICOLE

Mélanie De Waele

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 01/09/2015

Maîtres de stage : Stéphane Cordeau, Chargé de recherche
Fabrice Dessaint, Ingénieur d'étude
Jean Philippe Guillemain, Enseignant-Chercheur

Tuteur universitaire : Sophie Slezack-Deschaumes, Maître de conférences

INRA Dijon, UMR 1347 Agroécologie
17 rue Sully - BP 86510 - 21065 DIJON Cedex

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble des personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de ce stage.

Un grand merci à Stéphane Cordeau, Jean-Philippe Guillemin et Fabrice Dessaint, mes encadrants, pour leur disponibilité et leurs précieux conseils qui m'ont guidés pendant ces 6 mois et jusqu'à la rédaction de ce rapport. Merci également de m'avoir permis de participer entièrement à la vie scientifique de l'équipe (réunion plénière à Avignon, colloque EWRS à Montpellier).

Un remerciement tout particulier à Fabrice Dessaint avec qui j'ai partagé le bureau pendant ces 6 mois de stage et grâce à qui j'ai pu bénéficier d'une complète immersion dans le monde des statistiques. Merci pour ton aide !

Merci à Sophie Slezack-Deschaumes, tuteur universitaire, pour son suivi.

Merci à toute l'équipée de stagiaires, thésards, CDD et autres membres de l'INRA pour avoir rendu ces 6 mois plus légers, pendant les pauses et autres moments de détente à l'INRA et au-delà.

Je remercie aussi Camille, Emilien, Aymeric, Maxime, Jonathan, Noémie, Laure, Audrey et toute la bande du M2 FAGE de m'avoir permis de passer deux merveilleuses années sur Nancy.

Merci également à ma famille de m'avoir soutenu et encouragé lors de mes études !

Liste des abréviations

PAC : Politique Agricole Commune
UMR : Unité Mixte de Recherche
ANR : Agence Nationale de la Recherche
WP : Work Package
TSS : Travail Superficiel du Sol
IFT : Indice de Fréquence Traitement
HRAC : Herbicide Resistance Action Committee
FRAC : Fungicide Resistance Action Committee
IRAC : Insecticide Resistance Action Committee
ACP: Analyse en Composantes Principales
PLS-PM : Partial Least Square Path Modeling
SEM : Structural Equation Modeling
VM : Variable Manifeste
VL : Variable Latente

Liste des figures

Figure 1 : Relations établies entre les pratiques agricoles, la flore adventice et la production agricole.....	11
Figure 2 : Diagramme théorique qui représente le modèle PLS-PM avec le modèle interne et le modèle externe.....	15
Figure 3 : Corrélations entre les variables de rendement, de flore adventice et de pratiques agricoles.....	16
Figure 4 : Relation entre le rendement et l'abondance totale des adventices et la richesse spécifique des adventices.....	18
Figure 5 : Effet des différentes classes d'intensité de labour sur l'IFT herbicide.....	18
Figure 6 : Effet sur l'abondance et la richesse spécifique de la flore adventice de l'application d'herbicide après le relevé de flore et de l'application d'herbicide avant le relevé de flore.....	18
Figure 7 : Relation entre l'abondance totale et la richesse spécifique des adventices.....	19
Figure 8 : Analyse en Composantes Principales réalisées sur les cultures de blé d'hiver pour les variables du bloc Pression Biotique.....	20
Figure 9 : Analyse en Composantes Principales sur les cultures de blé d'hiver réalisée pour l'ensemble des variables du bloc « Pratiques agricoles ».....	21
Figure 10 : Diagramme du modèle de type PLS.....	22
Figure 11 : Diagramme du modèle de type PLS.....	23
Figure 12 : « Path effects » mesurés entre les variables endogènes et exogènes.....	24

Liste des tableaux

Tableau 1 : Echelle de Barralis et classe d'individus correspondante.....	12
Tableau 2 : Présentation des 21 variables.....	14

Liste des annexes

Annexe 1 : Distribution du nombre de parcelles et de relevés par type de culture.....	30
Annexe 2 : Distribution du nombre de parcelle selon le nombre de relevé de flore réalisés.....	30
Annexe 3 : Distribution des parcelles selon la période d'application des herbicides par rapport au relevé de flore.....	30
Annexe 4 : Coefficients obtenus pour chaque variable manifeste du modèle PLS-PM qui explore les relations entre pratiques agricoles, flore adventice et production agricole.....	30
Annexe 5 : Cross-loadings observés pour le modèle PLS-PM qui explore les relations entre pratiques agricoles, flore adventice et production agricole.....	31
Annexe 6 : Résultats de la procédure de bootstrap obtenu après 200 itérations sur le modèle PLS-PM qui explore les relations entre pratiques agricoles, flore adventice et production agricole.....	31

Sommaire

Remerciements	1
Liste des abréviations	2
Liste des figures	2
Liste des tableaux	2
Liste des annexes.....	2
Sommaire	3
1. Introduction.....	4
2. Etat de l’art.....	4
2.1. Les enjeux actuels de l’agriculture et de la gestion des adventices	4
2.2. Effets des pratiques agricoles sur la production agricole	5
2.3. Effets des pratiques agricoles sur la flore adventice.....	6
2.3.1. Effets de pratiques agricoles individuelles	6
2.3.2. Effets des systèmes de culture.....	8
2.4. Effets de la flore adventice sur le rendement.....	9
2.5. Comprendre les systèmes de culture par des approches globales.....	9
2.6. Problématique et hypothèses	10
2.7. L’organisme d’accueil et ses missions	11
3. Matériel et méthodes	11
3.1. Site d’étude	11
3.2. Collecte des données	12
3.2.1. Pratiques agricoles et rendement.....	12
3.2.2. Flore adventice	12
3.3. Données disponibles	12
3.4. Données analysées : le cas du blé tendre d’hiver	12
3.5. Présentation des variables.....	13
3.6. Analyses statistiques.....	13
4. Résultats.....	15
4.1. Analyses exploratoires.....	15
4.1.1. Relations avec la production agricole	16
4.1.2. Relations avec la flore adventice.....	16
4.2. Analyses exploratoires : prise en compte des interactions entre les variables	17
4.2.1. Relations au sein du bloc de variables « Pression biotique ».....	17
4.2.2. Relations au sein des blocs de variables « Pratiques agricoles »	20
4.3. Modélisation	21
5. Discussion	24
5.1. Des relations complexes pour expliquer les communautés adventices	24
5.2. Des relations complexes pour expliquer la production agricole.....	25
5.3. Perspectives : les relations entre pratiques agricoles, flore adventice et rendement ..	26
6. Conclusion	27
7. Bibliographie.....	28
Annexes	30

1. Introduction

Après la seconde guerre mondiale, l'agriculture doit répondre à une forte demande alimentaire de la population. Face à cette exigence de rentabilité, l'intensification de l'agriculture, amorcée dans les années 1950, a permis d'augmenter considérablement la production agricole. Dans les années 1990, suite au constat des conséquences environnementales de l'intensification de l'agriculture (augmentation de la pollution et des risques sanitaires...), le monde agricole fait face à de nouvelles directives visant à réduire l'utilisation d'intrants chimiques (pesticides, fertilisants chimiques...). Aujourd'hui, les exigences d'une production agricole de qualité et en quantité suffisante imposent à l'agriculture d'être doublement performante : économiquement et environnementalement. La dualité entre ces deux performances est particulièrement marquée pour la gestion de la flore adventice. Communément appelées « mauvaises herbes », les espèces adventices causent des pertes potentielles de rendement de 34% si aucune mesure de gestion n'est prise mais, parallèlement, leur contrôle passe par l'utilisation des herbicides qui représentent à eux seuls 34% de l'utilisation totale de pesticides. Pour répondre à ce nouveau défi de concevoir des systèmes de culture innovants, à la fois rentables et moins polluants, il est nécessaire de bien comprendre les relations qui existent entre les pratiques agricoles, la flore adventice et la production agricole. Les études sur les effets des pratiques agricoles sur la production agricole permettent de déterminer les pratiques les plus favorables à la production agricole. De plus, des études sur l'impact des pratiques agricoles sur la flore adventice ont permis d'identifier les pratiques ou les combinaisons de pratiques qui permettent de maintenir les communautés adventices à un niveau acceptable, c'est-à-dire sans effets visibles sur la production agricole. Enfin, les effets négatifs des adventices sur le rendement sont démontrés même s'ils sont parfois à nuancer par les services écosystémiques rendus par ces espèces. Pourtant, les effets indirects des pratiques agricoles sur la production agricole *via* un effet sur la flore adventice n'ont jusque-là pas encore été étudiés. Démêler les effets confondants des pratiques agricoles et de la flore adventice sur la production agricole est l'un des objectifs du projet scientifique AgrobioSe et notamment du WP2 auquel répond ce stage. La problématique ainsi soulevée est la suivante : **quels sont les effets directs, ou indirects *via* une modification de la flore adventice, des pratiques agricoles sur la production agricole ?**

Le présent rapport se décline en quatre parties principales. Dans un premier temps, un état de l'art introduira la problématique du stage. Les données et les méthodes d'analyses utilisées pour y répondre seront présentées. Puis les résultats obtenus par les différentes analyses statistiques seront exposés puis discutés dans une dernière partie.

2. Etat de l'art

2.1. Les enjeux actuels de l'agriculture et de la gestion des adventices

Suite à la seconde Guerre Mondiale, l'agriculture s'est trouvée dans un contexte économique avec pour objectif la rentabilité de l'emploi agricole et le maintien de systèmes productifs à hauts rendements pour répondre aux besoins alimentaires d'une population croissante. L'intensification de l'agriculture qui a alors eu lieu dans les années 1950 s'est traduite par l'utilisation massive d'intrants chimiques (pesticides et engrais chimiques) et par la mécanisation de l'agriculture accompagnée de remembrements successifs (Révolution Verte). L'intensification de l'agriculture a permis aux systèmes agricoles d'atteindre les performances de productivité exigées. Mais les changements induits ont entraîné l'homogénéisation des territoires, ont contribué à la pollution de l'environnement (Stoate et

al., 2009) et à l'augmentation des risques pour les agriculteurs qui manipulent les produits phytopharmaceutiques (exemple du glyphosate classé cancérigène « probable pour l'homme », selon l'Organisation Mondiale de la Santé).

Dans les années 1990, avec la prise de conscience de ces conséquences, l'agriculture se trouve alors dans un contexte environnemental caractérisé par la mise en place de directives par la PAC (Politique Agricole Commune) et de plans de réduction des pesticides et autres intrants. En France, c'est le cas du plan ECOPHYTO mis en place à l'issue du Grenelle de l'Environnement qui a pour objectif la réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2015).

Actuellement, l'agriculture est dans un double contexte : elle doit maintenir voir accroître son niveau de production tout en étant moins polluante pour répondre à la demande alimentaire et aux exigences de qualité environnementale. Pourtant, aujourd'hui, il est difficile de dire s'il est possible d'atteindre cette double performance. Le contrôle des bioagresseurs et notamment des adventices est au cœur de la dualité entre ces deux performances. Les adventices sont des espèces végétales qui apparaissent spontanément dans les parcelles cultivées. Elles sont indésirables car elles ont la capacité d'exercer de la compétition pour les ressources vis-à-vis des cultures de rente (pour l'eau, la lumière et les éléments nutritifs) pouvant entraîner une réduction de la productivité (Popp et al., 2012). Les herbicides restent le moyen majoritairement utilisé pour contenir les communautés d'adventices à des niveaux faibles en adéquation avec un objectif de production. Or, réduire la pollution doit en particulier passer par la diminution de l'utilisation des herbicides car elle représente à elle seule 34 % de l'utilisation totale des pesticides en France (Aubertot et al., 2005). Pour répondre à ce nouveau défi de concevoir des systèmes de culture innovants, à la fois rentables et moins polluants, il est alors nécessaire de bien comprendre les relations qui existent entre les pratiques agricoles, la flore adventice et la production agricole.

2.2. Effets des pratiques agricoles sur la production agricole

Les systèmes de cultures sont définis par un ensemble de procédures de gestion (ici appelées pratiques agricoles), par le type de culture et de succession culturale appliquées sur une surface agricole donnée (ici la parcelle), traitée de façon homogène à une période donnée (Boiffin et al., 2001). Ils sont mis en place pour répondre à des objectifs de production et de gestion par rapport à des bioagresseurs. Certaines pratiques, préventives ou de contrôle, ont pour objectif sur le plus ou moins long terme de gérer les communautés adventices en influençant la compétition culture-adventices (Santín-Montanyá et al., 2013) pour que le rendement réalisé soit le plus proche possible du rendement potentiel (usage de produits phytopharmaceutiques, successions, travail du sol, ...). Certaines pratiques agricoles permettent de rassembler les conditions optimales pour une bonne implantation de la culture. C'est le cas du **travail du sol**. Il est réalisé par une ou plusieurs façons culturales successives *via* des instruments aratoires qui engendrent un travail du sol plus ou moins profond ou superficiel, avant ou après le semis de la culture. Il peut être effectué pour préparer le sol à l'implantation de la culture, favoriser ainsi son bon développement et optimiser son rendement (oxygénation du sol, décompactage, structuration du sol,...). Mais certains travaux du sol peuvent s'avérer défavorables pour la culture. Le labour, par exemple, a un effet négatif sur la qualité physique, biologique et chimique des sols (Roux et al., 2009).

D'autres pratiques agricoles permettent d'améliorer le développement et les performances productives de la culture en répondant à des besoins particuliers. Dans un premier temps,

certaines caractéristiques propres au choix de la culture semée peuvent impacter le rendement. C'est le cas de la **variété** choisie : le blé dur aura par exemple un potentiel de rendement plus élevé que le blé tendre, ces différences étant liées à leur efficacité d'utilisation de l'eau et de l'azote (Marti et al., 2014). La **succession culturale**, suite de cultures mises en place sur une parcelle au cours du temps, permet de lutter contre l'appauvrissement des sols au profit de la culture : la variation des types de cultures, à travers la profondeur du système racinaire ou des différences de besoins nutritifs, permet de varier les ressources utilisées pour ne pas les épuiser (Zegada-Lizarazu et al., 2011). Dos Santos et al. (2014) ont montré, par exemple, que la succession de culture, en utilisant du maïs ou du sorgho, permettait d'avoir de meilleurs rendements en soja comparés à une monoculture de soja. La **date de semis**, qui peut être plus ou moins tardive, affecte le rendement. Par exemple, les orges de printemps semées précocement (mi-mai vs. fin-mai et mi-juin) ont un meilleur rendement et une meilleure qualité de grain que celles semées tardivement (Juskiw et al., 2003). Houdard et al. (1978) ont par ailleurs observés que les semis précoces augmentent les rendements de blé d'hiver si les techniques culturales utilisées localement sont adaptées. La **fertilisation** est une pratique courante, quasi-systématique en agriculture conventionnelle. En effet, la fertilité chimique des sols est un point devenu problématique en agriculture, notamment pour l'azote. Certaines pratiques agricoles ont conduits à réduire les teneurs en matières organiques des sols (travail du sol) et à altérer l'activité biologique de sols (application de pesticides), ce qui peut avoir une influence sur la libération d'azote issue de la minéralisation, et à terme l'azote peut venir à manquer pour la croissance des plantes (Attard et al., 2011). Les effets de la fertilisation ont majoritairement été étudiés pour l'azote minéral et la fertilisation organique, l'azote étant souvent l'élément limitant dans le sol et l'effet des autres types d'engrais étant peu connu. Les apports d'azote (notamment les nitrates) ont un effet positif pour la culture qui devient plus compétitive et augmente son rendement (surtout si elle a été sélectionnée sur ce critère de pouvoir compétitif) (Roux et al., 2009).

C'est la succession de l'ensemble des pratiques agricoles d'un système de culture qui permet d'optimiser la production agricole d'une culture. Il faut néanmoins noter que les facteurs environnementaux, en étant plus ou moins favorables aux cultures (climat, pluviométrie, caractéristiques du sol), sont également des paramètres qui impactent la production agricole.

2.3. Effets des pratiques agricoles sur la flore adventice

2.3.1. Effets de pratiques agricoles individuelles

Certaines pratiques agricoles sont mises en place dans le but de contrôler les communautés d'adventices et de les contenir à un niveau acceptable, c'est-à-dire qui n'affectera pas la production agricole. C'est spécifiquement le cas des **herbicides** qui sont appliqués sur les cultures pour gérer chimiquement les adventices. La diversité des modes d'action existant permet de gérer un grand nombre d'espèces adventices différentes. Différents modes d'action existent parfois pour gérer un même type d'adventice. En alternant ces modes d'action sur toute la succession, il est possible d'accroître leur efficacité et leur pérennité (frein aux phénomènes de résistances) (Arvalis, 2012). Le **travail du sol** peut également être utilisé comme technique de gestion de la flore adventice, comme le désherbage mécanique grâce à une herse étrille. C'est aussi le cas du faux-semis puisque c'est une technique qui consiste à laisser se développer les adventices pour ensuite les détruire mécaniquement avant de semer la culture. De même le labour peut permettre de réduire la densité des adventices par enfouissement des semences. Mais selon Hernández Plaza et al.

(2015), le travail du sol conventionnel (charrue + outil à dents) agirait comme une perturbation qui augmente les opportunités de niches disponibles pour les adventices (en termes de trait de régénération, poids des semences et germination) et à l'inverse, en l'absence de travail du sol, les semences d'adventices qui restent alors en surface sont plus exposées aux conditions extrêmes et à la prédation que si elles étaient enfouies. Par exemple, selon Anderson (2007), dans les prairies canadiennes seules 10% des semences de la sétaire verte (*Setaria viridis subsp. viridis*) survivent après 2 ans lorsqu'elles restent en surface contre 20% et 50% quand elles sont enfouies respectivement à 1 et 10 cm. De plus, en absence de travail du sol, les résidus de la culture précédente assurent une certaine couverture du sol qui réduit l'établissement des adventices. Néanmoins, les espèces adventices sont souvent plus nombreuses en l'absence de travail du sol (semis-direct) par rapport à un travail du sol réduit ou conventionnel. En effet, selon le stade de croissance et le type d'adventice, la profondeur à laquelle se forment les nouvelles racines, ses capacités à résister à l'enfouissement, les instruments de travail du sol infligent des dégâts aux adventices (section, enfouissement, déracinement) (Koocheki et al., 2009). De même, certaines espèces adventices sont favorisées par certaines façon culturales : les vivaces comme le pissenlit (*Taraxacum sp.*) et le laiteron des champs (*Sonchus arvensis*) sont associés au non-travail du sol, mais le chardon des champs (*Cirsium arvense*) se retrouve là où on retourne la terre (Blackshaw et al., 2001).

D'autres pratiques agricoles, dans un premier temps mises en place pour garantir une production acceptable, permettent de gérer les adventices. Le **type de culture**, caractérisé par la saison de semis (cultures d'hiver, de printemps et d'été), induit trois périodes de perturbations possibles pour les communautés d'adventices, influençant de cette façon leur richesse spécifique (soit le nombre d'espèce) et leur composition (c'est-à-dire l'assemblage des espèces adventices) (Fried et al., 2008). Plus spécifiquement, la **date de semis** affecte les caractéristiques phénologiques des adventices. Avec un semis tardif, par exemple, les adventices commencent à germer plus tard, fleurir plus tard et leurs périodes de floraison sont plus courtes (Gunton et al., 2011). Les **apports de fertilisants** ont, de manière générale, un effet positif sur l'abondance des adventices des zones cultivées mais il est plus contrasté pour la richesse spécifique et la diversité. Il existe un effet positif de la fertilisation azotée (surtout des nitrates) sur les espèces adventices nitrophiles ou généralistes qui bénéficient des apports d'azote. C'est pourquoi, sur le long terme, il peut y avoir sélection d'une gamme d'espèces et réduction de la richesse spécifique des adventices (Roux et al., 2009). Enfin, la **succession culturale** permet de lutter contre les adventices en perturbant leur cycle de développement (une espèce favorisée par un type de culture ne le sera peut-être plus avec un autre type de culture) (Roux et al., 2009). La durée de la succession et le choix des cultures successives doivent cependant être précis. La succession 2:2 (deux cultures de printemps et deux cultures d'hiver) réduit de huit fois la densité de semences adventices par rapport à une succession à seulement deux cultures. Pour éviter le mimétisme des cultures, il est également plus efficace que les deux cultures de printemps et celles d'hiver soient différentes en termes de date de semis (par exemple maïs et tournesol et blé et pois sec respectivement) (Anderson, 2007). La succession culturale influence également la banque de semences adventices en réduisant leurs opportunités de croissance et de régénération à travers la compétition pour les ressources et la perturbation de niche (Koocheki et al., 2009). Pourtant Bohan et al. (2011) ont montré que la banque de semences d'adventices dépend de l'effet historique de trois années de succession maximum mais que la culture actuelle plus que la culture précédente influence le stock de semences.

2.3.2. Effets des systèmes de culture

Il est difficile d'identifier les pratiques agricoles les plus influentes de celles qui ont peu d'impact sur la gestion de la flore adventice. La diversité des conclusions des études sur ce thème en est une bonne illustration. Par exemple, Santín-Montanyá et al. (2013) ont montré que la densité totale et la richesse spécifique des adventices sont plus affectées par le système de travail du sol (semis-direct, travail minimal, labour) que par le type de succession et la fertilisation, ce qui diffère des observations de Anderson (2007). Ceci est sûrement dû d'une part à la diversité des conditions d'étude (géographiques, climatiques, environnementales,...). D'autre part, plus souvent que l'effet d'une seule de ces pratiques, c'est souvent l'association de plusieurs techniques culturales entre elles qui a une action sur les adventices.

Ces associations peuvent avoir un effet positif. Par exemple, pour que l'absence de travail du sol soit plus efficace dans son rôle de gestion de la flore adventice, Koocheki et al. (2009) proposent d'y associer un couvert en interculture ou bien de réaliser des successions de différentes cultures (betterave-blé d'hiver ou maïs-blé d'hiver au lieu de blé d'hiver en continu), tout comme Anderson (2007) qui a montré que le bénéfice de l'absence de travail du sol sur la réduction de l'émergence des semences d'adventices est huit fois plus important après 3 ans de succession. La combinaison des herbicides intra-rangs et du binage inter-rang donne la meilleure efficacité (en moyenne 99% de contrôle des adventices dans une culture de maïs), avec une réduction de 50% de la charge chimique de l'environnement sans perte de rendement (Pannacci et al., 2014). Anderson (2007) montre que les effets positifs des pratiques culturales pour réduire la densité des communautés d'adventices sont décuplés quand elles sont combinées, car elles permettent d'augmenter la compétitivité et la tolérance des cultures par rapport aux adventices. Par exemple, en culture de maïs et de tournesol, l'effet seul d'une de ces méthodes (augmenter la densité de semis, réduire l'espacement des rangs, localiser les apports de fertilisants et retarder les semis, le tout en absence de travail du sol) réduit la biomasse des adventices de 5 à 10% contre 20 à 25% quand deux d'entre elles sont associées et contre 60 et 90% quand trois sont combinées. De plus, l'efficacité des herbicides est supérieure quand ils sont associés à des techniques culturales qui augmentent la compétitivité des cultures et peuvent même y être substitués quand la densité d'adventices est faible.

Il ne s'agit pas toujours d'associer les pratiques pour accroître les bénéfices en termes de réduction des adventices. Dans l'étude de Salonen et al. (2013), en agriculture conventionnelle, la gestion des adventices consiste en une balance entre travail du sol et utilisation des herbicides. Dans les années 1990, parallèlement à la réduction des pratiques de travail du sol (notamment le labour), apparaît une augmentation de l'utilisation d'herbicides pour lutter contre l'augmentation de l'occurrence des graminées. Puis dans les années 2000, la diminution de l'utilisation d'herbicides est accompagnée d'une augmentation de travail du sol.

En plus des facteurs anthropiques, la flore adventice des zones cultivées est également influencée par les facteurs environnementaux (climat, pluviométrie, caractéristiques du sol, altitude) (Bohan et al., 2011 ; Chikowo et al., 2009 ; Koocheki et al., 2009 ; Salonen et al., 2013). Par exemple, Neve et al. (2009) expliquent que la variation temporelle et spatiale des habitats agricoles affecte la composition et la diversité des communautés adventices. Mais tous ces facteurs n'affectent pas les mêmes propriétés des adventices. Par exemple, en considérant une échelle large, les pratiques de gestion et l'environnement paysager local ont un impact faible sur la composition mais un impact fort sur la richesse spécifique. Le climat,

au travers des précipitations aura plus d'influence sur la composition des communautés adventices tandis que l'altitude affectera plus la richesse spécifique. De manière générale, les facteurs environnementaux expliquent moins les communautés d'adventices que les pratiques (Fried et al., 2008) tandis que la dynamique des adventices serait avant tout affectée par la variation annuelle des paramètres environnementaux (précipitations abondantes et températures supérieures à la moyenne), puis par les systèmes de cultures (Blackshaw et al., 2001).

2.4. Effets de la flore adventice sur le rendement

Selon certaines estimations mondiales, les adventices, par compétition pour les ressources et la surface d'occupation, causent des pertes potentielles de rendement (c'est-à-dire sans pratiques de prévention ou de contrôle) estimées à 34% (sur 70% pour l'ensemble des bioagresseurs) et des pertes observées (c'est-à-dire avec pratiques de prévention et de contrôle) qui s'élèvent à 9% (Oerke, 2006 ; Popp et al., 2012).

2.5. Comprendre les systèmes de culture par des approches globales

Beaucoup d'études sont focalisées sur l'effet des pratiques agricoles sur la production agricole, de la flore adventice sur la production agricole ou des pratiques agricoles sur la flore adventices. Qu'il s'agisse d'analyses « simples » ou de modélisation, d'autres études visent à établir à la fois l'effet d'une ou plusieurs pratiques agricoles et de la flore sur la production agricole. Les méthodes de modélisation, de plus en plus utilisées pour l'étude des systèmes de culture, permettent de tenir compte d'une large gamme de variables, de mettre en évidence des relations attendues ou non et de les quantifier à des fins explicatives ou prédictives. Kropff et al. (1991) analysent les relations entre la perte de rendement et la surface de couverture relative des adventices en incluant les effets de différents facteurs comme le temps d'émergence relative et la fertilisation azotée (qui peut fortement influencer la compétition entre la culture et les adventices). Or la mesure de « surface de couverture relative des feuilles » des cultures et des adventices ne semblent pas être fortement en lien dans les champs, ce qui limite les conclusions de cette étude. Parallèlement, des modèles ont été mis en place pour prédire le rendement des cultures compte tenu de la présence de la flore adventice et de la densité de la culture. Ils sont soit basés sur des jeux de données issues d'une seule expérimentation et d'hypothèses théoriques (Wilson et al., 1990) et sont de ce fait difficilement généralisables, soit ils ne sont valables que pour des assemblages quasi mono-spécifiques d'adventices (Berti et al., 1994) ce qui réduit la capacité prédictive du modèle dès lors que la diversité augmente. Certaines études intègrent un ensemble de pratiques agricoles comme celle de De la Fuente et al. (1999) à l'aide de nombreuses analyses multivariées ou encore comme celle de Colbach et al. (2014) avec une approche de modélisation mécanistique (prédire et expliquer). Ces démarches restent cependant centrées sur les adventices, sans chercher à départager les effets des adventices et des pratiques sur la production agricole. Plus récemment, Benjamin et al. (2010) ont mis en place un modèle prédictif pour une campagne en cours. Il est cependant basé sur un nombre restreint d'adventices (12).

La plupart de ces études ont été réalisées à des fins prédictives et non explicatives. Il semble donc que la modélisation soit peu utilisée dans une démarche explicative des relations entre les pratiques agricoles, la flore adventice et la production agricole. Pourtant, comme expliqué dans la partie précédente, les adventices et le rendement sont impactés par une diversité de pratiques agricoles (culture, variété, travail du sol, date de semis, type et niveau d'intrants, désherbage chimique et mécanique, récolte, interculture, succession culturale,

etc.), en interaction avec les caractéristiques environnementales. Il est donc difficile d'établir des relations causales claires entre deux facteurs dans les agroécosystèmes compte tenu des multiples interactions. De même, il est compliqué d'avoir une vision précise de la gestion des adventices et de leur part de responsabilité dans la réalisation du rendement effectif par rapport à l'ensemble des pratiques. Dans ce cas, la modélisation pourrait être un outil très utile pour tenter de démêler, quantifier et synthétiser des relations complexes (même si elle simplifie) qui existent dans un agroécosystème.

2.6. Problématique et hypothèses

Les effets directs des pratiques agricoles sur la production agricole sont connus. Il en va de même l'effet direct des pratiques agricole sur la flore adventice et de la flore adventice sur la production agricole. Il est donc évident qu'il y a un effet indirect des pratiques agricoles sur la production agricole *via* la flore adventice. Cependant, aucun article n'a pour le moment étudié et quantifié ce lien indirect. Pour concevoir des systèmes de culture innovants à la fois productifs et moins polluants, il est tout d'abord nécessaire de comprendre et d'évaluer les relations directes et indirectes qui existent entre les pratiques agricoles, la flore adventice et la production agricole. L'objectif de ce stage est d'analyser, expliquer et traduire quantitativement ces relations par une démarche globale (dans le sens où on tient compte d'un maximum de paramètres des pratiques agricoles et de l'ensemble de la flore adventice observée), basée sur des données réelles et centrée sur l'explication du rendement. La problématique est donc :

Quels sont les effets directs, ou indirects *via* une modification de la flore adventice, des pratiques agricoles sur la production agricole ?

Elle peut se décliner de la manière suivante :

- Comment et en quelles proportions les pratiques agricoles influencent-elles la production agricole ?
- Comment et en quelles proportions les pratiques agricoles influencent-elles indirectement la production agricole *via* une modification de la flore adventice ?

Un certain nombre d'hypothèses peuvent-être émises. La pression des adventices, bien que majeure, ne représente pas la totalité de la pression des bioagresseurs (agents pathogènes comme les champignons, virus et ravageurs comme les insectes, mollusques,...) sur les cultures. A l'inverse les pratiques agricoles sont l'ensemble des techniques mises en place sur la culture. Elles prennent en compte non seulement les techniques de gestion des adventices mais aussi celles pour gérer tous les bioagresseurs et pour optimiser la production agricole. En ce sens, il est attendu que le poids de la relation entre pratiques agricoles et production agricole soit plus important que celui des relations entre pratiques agricoles et flore adventice et entre flore adventice et production agricole (Figure 1). Cependant, il existe des effets d'antagonismes dans le cadre conceptuel ainsi posé. C'est le cas des apports de fertilisants azotés. Ils bénéficient directement à la culture en couvrant ses besoins minéraux ce qui conduira à assurer une certaine production agricole. Mais ces apports peuvent également profiter aux espèces adventices potentiellement présentes dans la culture, qui par compétition pour les ressources vont nuire à la croissance de la culture et par conséquent réduire sa production potentielle. L'effet positif des apports d'azote peut alors être en partie annulé par l'impact de la présence de la flore adventice. La répétition d'effets antagonistes pourrait amener à réduire la différence attendue de poids des relations explicitée précédemment.

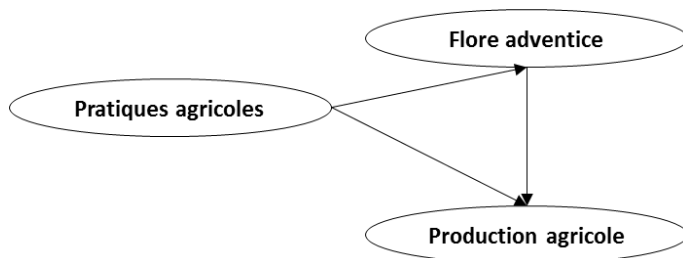


Figure 1 : Relations établies entre les pratiques agricoles, la flore adventice et la production agricole.

2.7. L'organisme d'accueil et ses missions

L'agroécologie est une discipline en pleine expansion. L'Unité Mixte de Recherche Agroécologie en a fait son principal axe de recherche. Elle a pour objectif finalisé de fournir des réponses pour le développement d'une agriculture durable, qui permettrait une production qualitativement et quantitativement en phase avec les besoins alimentaires, tout en respectant l'environnement. Elle promeut comme moyen les services rendus par la biodiversité et les interactions entre organismes (plante-plante, plante-microorganismes,...). Son champ d'étude est l'agroécosystème. L'étude de l'agroécosystème, ou écosystème cultivé, prend en compte l'impact des activités humaines sur l'écosystème cultivé et sur les communautés qui y sont inféodées (Berthet, 2013).

Les principes de l'agroécologie reposent sur la notion de durabilité. A ce titre, les systèmes de culture innovants doivent répondre au mieux aux principes de durabilité (être économiquement, environnementalement et socialement acceptables). S'il y a peu d'études sur le sujet pour le moment, il existe des publications récentes dont l'une d'entre elles évalue les relations entre les performances de différents systèmes de cultures (conventionnels, intégrés, biologiques) et leur durabilité (économique, environnementale et sociale). Il en ressort que les systèmes intégrés apparaissent comme le meilleur compromis en terme de durabilité (Lechenet et al., 2014). Une autre étude avec une approche dualistique de prévention et de contrôle pour une gestion intégrée des adventices estime une meilleure rentabilité économique mais des impacts sociaux plus contrastés car ce type d'approche nécessite plus de planification et de gestion que l'approche basée sur les herbicides (Anderson, 2007). Ces résultats, plutôt encourageants pour la mise en place de systèmes innovants, doivent pousser les recherches de l'agroécologie dans ce sens.

L'UMR Agroécologie est partenaire d'un projet scientifique ANR, le projet AgrobioSe, lancé en 2013, qui s'inscrit dans le cadre du défi proposé par le plan ECOPHYTO en ciblant un objectif de réduction des herbicides. Le projet se découpe en plusieurs thématiques (Work Package, WP). Ce stage participe à répondre aux objectifs du WP2, soit comprendre et évaluer les relations qui existent entre les pratiques agricoles, la flore adventice et la production agricole, et en particulier de distinguer les effets confondants des pratiques agricoles sur la flore adventice et le rendement.

3. Matériel et méthodes

3.1. Site d'étude

L'étude porte sur la zone d'étude de Fénay située en Côte-d'Or (France). La zone est considérée comme homogène en termes de climat et de caractéristiques géographiques et paysagères avec des sols de type argileux et argilo-limoneux (Guillemin et al., 2013). Elle comporte environ 150 parcelles contiguës réparties sur 950 hectares de surfaces cultivées,

appartenant à 29 exploitants. Pour cette étude, les campagnes¹ de 2006 à 2013 ont été analysées, soit un total de **563 parcelles** sur la période.

3.2. Collecte des données

3.2.1. Pratiques agricoles et rendement

Des enquêtes annuelles, réalisées par du personnel de l'UMR auprès des agriculteurs, ont permis de rassembler les pratiques agricoles et le rendement réalisés sur chaque parcelle.

3.2.2. Flore adventice

En parallèle, des relevés de flore (liste d'espèces et abondance de chaque espèce) ont été effectués à l'intérieur des parcelles entre mars et juin, sur des quadras de 40x50 m explorés en W. L'abondance a été relevée suivant une échelle de notation dite de Barralis et a été traduite en nombre total d'individus (centre de classe) par m² (Tableau 1).

Tableau 1 : Echelle de Barralis et classe d'individus correspondante.

Echelle de Barralis	0,1	1	2	3	4	5	7	9
Classe (nb ind/m ²)	1/2000	0-0,999	1-2	3-20	21-50	51-100	culture	inconnu
Centre de classe (nb ind/m ²)	0,0005	0,5	1,5	11,5	35,5	75,5	0	vide

3.3. Données disponibles

N'ont été gardées pour cette étude que les parcelles pour lesquelles les pratiques agricoles, le rendement et la flore adventice étaient renseignées. Il s'agit uniquement de parcelles gérées en agriculture conventionnelle. Quinze cultures différentes sont disponibles dans la base de données sur la période 2006-2013. Parmi elles, la culture de blé d'hiver est majoritaire (188 parcelles, 220 relevés floristiques), suivie par l'orge d'hiver et le colza d'hiver (respectivement 94 et 92 parcelles et 110 et 103 relevés floristiques). Les cultures d'orge de printemps, de moutarde, de tournesol, de soja et de betterave sucrière sont présentes en moins grande quantité et les 7 cultures restantes (triticale, pois de printemps, maïs, oignon, luzerne, blé tendre de printemps et avoine d'hiver) sont rares avec moins de 10 parcelles et relevés (Annexe 1). Les données ont été traitées de manière indépendante pour chaque type de culture, d'une part par soucis d'homogénéisation des données (selon les cultures, les ordres de grandeurs des différentes variables sont très hétérogènes), d'autre part car les pratiques agricoles mises en place sur une parcelle dépendent du type de culture mis en place. Comme pour certaine parcelle plusieurs relevés ont pu être faits la même année (de 1 à 4 ; Annexe 2), il a été choisi de dupliquer les informations de la parcelle autant de fois qu'il y a de relevé de flore pour ne pas réduire le nombre de relevé au nombre de parcelle mais avoir un relevé par parcelle.

3.4. Données analysées : le cas du blé tendre d'hiver

Bien que la préparation des données ait été faite sur toute la base de données, toutes cultures confondues, il a été décidé de cibler la suite de ce travail sur la culture de blé tendre d'hiver, culture pour laquelle le nombre de parcelle est le plus élevé et qui par ailleurs présente un intérêt majeur puisqu'il représente la culture majoritaire en France avec une

¹ Une campagne agricole correspond ici à la période d'un itinéraire technique, qui s'étend de la fin de la récolte de la culture de l'année n à la récolte de la culture de l'année suivante n+1

superficie développée de 4 983 597 ha en 2014 (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2015). L'IFT total (Indice de Fréquence de Traitement²) pour la culture de blé tendre d'hiver est de l'ordre de 4 (référence nationale). A l'échelle de la Bourgogne, il est de 5,5 (contre 7,82 pour le colza et 4,50 pour l'orge) sachant qu'en général c'est l'IFT herbicide qui y contribue le plus (Guillemin et al., 2013). La suite du rapport (à partir du point 3.5) est alors ciblée sur le blé tendre d'hiver (ou blé d'hiver).

3.5. Présentation des variables

Les variables présentées correspondent uniquement à celles utilisées dans l'analyse ciblée sur le blé d'hiver. Elles ont été regroupées dans des blocs définissant une grande fonction : production agricole, pression biotique (flore adventice) et optimisation de la surface cultivée (pratiques agricoles) (Tableau 2).

La production agricole est caractérisée par le *rendement*, seule variable disponible dans la base de données. Les variables *richesse spécifique*, *abondance totale*, *diversité de Shannon* et *équitabilité* de la flore adventice caractérisent la pression biotique du système (Santín-Montanyá et al., 2013 pour le calcul des deux dernières). Les pratiques agricoles mises en place pour optimiser la surface cultivée sont quant à elles découpées en quatre blocs. L'intensité de *travail superficiel du sol* (TSS), l'intensité de *décompactage* et le *labour* sont les variables représentant les interventions de travail du sol du bloc gestion interculturelle. La *date de semis* et la *densité sur le rang* ont été sélectionnées pour caractériser le bloc installation de la culture, correspondant à l'opération de semis. Le bloc lutte chimique contre les bioagresseurs est traduit par l'Indice de Fréquence Traitement (*IFT*) décliné pour chaque type de pesticide et par la diversité de mode d'action des herbicides (*HRAC*), fongicides (*FRAC*) et insecticides (*IRAC*). Enfin, le bloc fertilité chimique est reflété par les variables de *quantité d'azote* apportée et de *fractionnement de l'azote* apporté.

Remarque : Pour certaines variables impactant la communauté adventice, les opérations ayant eu lieu avant le relevé de flore ont été différenciés de celles ayant eu lieu après (les effets des interventions ayant eu lieu après les relevés ne pouvant être évalués).

3.6. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel libre R dans sa version 3.1.2 et les packages *corrplot*, *car*, *FactoMineR*, *plsrm*, *plsdepot*. Dans une première partie, des analyses exploratoires de la base de données ont été réalisées pour décrire et comprendre les relations entre les variables. Pour cela ont été effectués :

- des tests de corrélation de Pearson avec un niveau de probabilité $\alpha=0.05$ ($p \leq 0,05$) qui permet l'analyse d'une relation linéaire entre deux variables. Pour ces analyses on pose H_0 = pas de relation et H_1 = relation (test bilatéral),
- des analyses de variance ou des tests de Student si l'une des variables est qualitative,
- des Analyse en Composantes Principales pour l'analyse des matrices de corrélations.

La deuxième partie de l'analyse statistique correspond à une modélisation des relations entre les pratiques agricoles, la flore adventice et la production agricole par la méthode

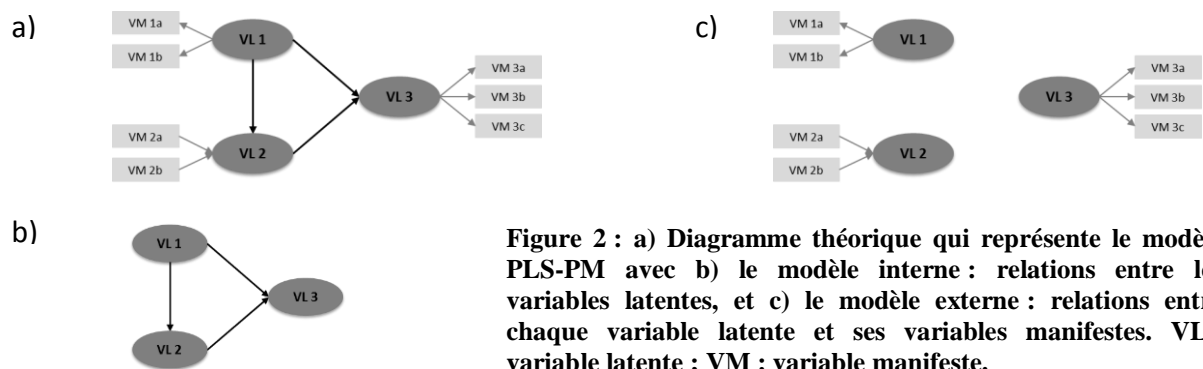
² L'Indice de Fréquence de Traitement est un indicateur d'intensité d'utilisation des produits phytopharmaceutiques calculé par parcelle selon la formule suivante : $IFT = (dose\ appliquée * surface\ traitée) / (dose\ homologuée\ minimale\ pour\ le\ produit * surface\ de\ la\ parcelle)$ (Dessaint et al., 2014).

Tableau 2 : Présentation des 21 variables utilisées pour les analyses sur culture de blé d'hiver, selon leur bloc d'appartenance (pratiques agricoles, pression biotique et production agricole). NA : valeurs manquantes sur N = 220 parcelles.

Blocs de variables		Variables mesurées	Unité	Détails & remarques	Valeurs moy [min – max]	
Production agricole		<i>Rendement</i>	q/ha		72 ³ [29 - 102]	
Pression biotique (Flore adventice)		<i>Abondance totale</i>	Densité/m ²	Somme des centres de classe de chaque espèce/m ² Traduit quantitativement la pression adventice	8,9 [0 - 117] NA = 1	
		<i>Richesse spécifique</i>	Nombre d'espèces /relevé	S = richesse spécifique	5,8 [0 - 29]	
		<i>Diversité de Shannon</i>		Shannon : $H = -\sum (pi * \ln(pi))$ où $pi = ni/N$, ni , nombre d'individus de l'espèce, et N , nombre total d'individus	1,1 [0 - 2,6] NA = 6	
		<i>Equitabilité</i>	Répartition des espèces/relevé	Indice de Pielou : $E = H/\ln(S)$ (0 ≈ dominance d'une espèce, 1 ≈ équirépartition)	0,7 [0 - 1] NA = 17	
Optimisation de la surface cultivée (Pratiques agricoles)	Gestion interculturelle	<i>Intensité de décompactage</i>	Nombre de passage/parcelle		0,2 [0 - 2]	
		<i>Labour</i>	Classe de profondeur	0 : absence, 1 : labour peu profond de 0 à 20cm, 2 : labour profond de 20 à 25cm	N ₀ = 138 N ₁ = 28 NA = 32 N ₂ = 22	
		<i>Intensité de travail superficiel du sol avant le semis(TSS)</i>	Nombre de passage/parcelle	Interventions de déchaumage, reprise de sol (après un travail profond, passage de herse, etc.), préparation semis (dernière intervention avant semis) et de faux-semis	2,6 [0 - 6]	
	Installation de la culture (semis)	<i>Date de semis</i>	Jours Julien (depuis 1 ^{er} juin)		136,8 [121 - 186]	
		<i>Densité sur le rang</i>	Nombre pieds/ml	Compilation densité au m ² (P) et écartement interrang (E) : (1/[E/100])=nb de rang et (P/nb de rang)=densité sur le rang d'où (P*[E/100]) exprimé en mètre linéaire (ml)	48,8 [33,8 - 77,9] NA = 2	
	Lutte chimique contre les bioagresseurs		<i>IFT herbicide</i>			1,5 [0 - 4]
			<i>IFT herbicide avant relevé</i>		Décomposition utile car seuls les herbicides appliqués avant le relevé impactent la flore	1,2 [0 - 3,9]
			<i>IFT fongicide</i>			1,4 [0 - 4,7]
			<i>IFT insecticide</i>			0,6 [0 - 3,3]
			<i>IFT molluscicide</i>			0,1 [0 - 1,4]
		<i>IFT régulateur</i>		Régulateur de croissance	0,3 [0 - 1,5]	
		<i>IFT total</i>		Somme des IFT herbicide, fongicide, insecticide, molluscicide et régulateur pour chaque parcelle	3,9 [1 ; 9,5]	
		<i>HRAC</i>	Nombre de mode d'action / parcelle	(Herbicide Resistance Action Committee) Diversité de mode d'action des herbicides	2,1 [0 - 6]	
		<i>FRAC</i>	Nombre de mode d'action / parcelle	(Fungicide Resistance Action Committee) Diversité de mode d'action des fongicides	2,3 [0 - 5]	
	<i>IRAC</i>	Nombre de mode d'action / parcelle	(Insecticide Resistance Action Committee) Diversité de mode d'action des insecticides	0,5 [0 - 1]		
Fertilité chimique	<i>Fractionnement N</i>	Nombre d'apport/parcelle		3,1 [1 - 5]		
	<i>Quantité N</i>	Kg/ha	Quantité d'azote apportée. N.B. : en cas de fertilisation organique, la quantité d'azote disponible pour la culture a été calculée	177,8 [52 - 266]		

³ Le rendement moyen national de la campagne 2014 est de 75 q/ha (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2015)

PLS-PM (Partial Least Square Path Modeling). C'est une méthode de la famille des modèles à équations structurelles à variables latentes (SEM ou « Structural Equation Modeling ») généralement utilisée en sciences sociales. Elle suscite depuis peu l'intérêt des sciences agronomiques et de l'écologie car elle présente de nombreux avantages pour explorer des relations complexes de systèmes multivariés et pour inférer des relations de causalité à partir de données observées en quantifiant le poids de bloc de variables (Puech et al., 2014 ; Shipley, 2000). Un modèle de type PLS-PM (Figure 2a) est composé d'un modèle interne (Figure 2b) et d'un modèle externe (Figure 2c). Le premier décrit les relations entre les variables latentes du modèle. Le second décrit quant à lui les relations entre un ensemble de variables observées, dites variables manifestes (VM), et une variable latente (VL) non observable et qui représente un concept théorique. Le groupe formé par une VL et ses VM est appelé un bloc. Une VL peut être construite en mode réflectif ou formatif. Dans le cas où la VL est réflective (blocs 1 et 3 de la Figure 2a), l'ensemble des VM reflètent un même phénomène représenté par la VL. Il est alors indispensable que les VM qui reflètent un même phénomène varient toutes dans le même sens (unidimensionnalité des blocs, vérifiée par le Dillon-Goldstein's rho). Les analyses exploratoires de cette étude permettent de vérifier au préalable l'unidimensionnalité des blocs, comme il est requis de le faire pour ce type de modèle (Sanchez, 2013). Dans le cas où la VL est formative (bloc 2 de la Figure 2a), l'ensemble des VM permettent de construire la VL. Avec la méthode PLS-PM, les relations entre les VL sont traitées comme des régressions linéaires (mesurées par un coefficient R^2). L'association entre une VM et une VL est mesurée par un poids (« weight ») et une valeur de corrélation (« loading ») associée à un coefficient de détermination (R^2). Les résultats du « cross-loadings » permettent de vérifier que les VM d'un bloc ne sont pas plus corrélées à un autre bloc. La robustesse globale du modèle est évaluée avec le critère « goodness of fit » et une procédure de bootstrapp.



4. Résultats

Les résultats correspondent à l'analyse des données ciblée sur la culture de blé d'hiver. Ils se décomposent en trois parties, les deux premières correspondant aux analyses exploratoires de la base de données et la dernière étant dédiée à la réalisation du modèle.

4.1. Analyses exploratoires

Cette première partie a pour objectif de donner une vue d'ensemble des relations simples, positives, négatives, significatives ou non, qui existent entre les variables de pratiques agricoles, de flore adventice et de production agricole pour mieux comprendre comment elles interagissent entre elles.

4.1.1. Relations avec la production agricole

Aucune corrélation significative n'est observée entre le *rendement* et les interventions de *décompactage*, de *labour* et de *TSS*. Par ailleurs, l'analyse des corrélations entre le *rendement* et les variables *date de semis* et *densité sur le rang* montre une tendance avec de plus faibles rendements lorsque les semis sont tardifs et peu denses (Figure 3). Il existe une corrélation positive entre le *rendement* et l'*IFT total*, cependant elle ne semble pas être due à la quantité d'herbicide apportée mais plutôt à la quantité des autres pesticides. Parmi eux, seuls les *IFT insecticides* et *IFT régulateurs* sont corrélés positivement au *rendement* (Figure 3). Cette observation est également valable pour les diversités de modes d'action, puisque seul l'*IRAC* est corrélé positivement avec le *rendement* (Figure 3). Le *rendement* est fortement corrélé à la *quantité d'azote* apportée à la culture mais le nombre d'apport (*fractionnement N*) n'a pas de relation avec le *rendement* (Figure 3).

	Rendement	Abondance	Richesse	Équitabilité	Shannon	Intensité de décompactage	Labour	TSS	Date de semis	Densité sur le rang	IFT herbicide relevé	IFT fongicide	IFT insecticide	IFT molluscicide	IFT régulateurs	IFT total	HRAC	FRAC	IRAC	Fractionnement N	Quantité N	
Rendement	1	-0,16	-0,24						-0,14	-0,14					0,28	0,24				0,36		0,38
Abondance	-0,16	1	0,54	-0,25											-0,2				-0,14			
Richesse	-0,24	0,54	1		0,61	-0,15		-0,15		0,14		-0,23			-0,16	-0,15			-0,2			-0,22
Équitabilité		-0,25		1	0,8								-0,18									
Shannon			0,61	0,8	1			-0,17	0,23	0,18		-0,14		-0,19								
Intensité de décompactage			-0,15			1	-0,22	-0,2		-0,2												0,15
Labour						-0,22	1				-0,22											0,17
TSS			-0,15		-0,17	-0,2		1	-0,36	-0,19		0,17		0,27		0,24	0,17	0,15	0,29			-0,17
Date de semis	-0,14				0,23			-0,36	1	0,31		-0,25	-0,15	-0,24		-0,28	-0,16	-0,16	-0,27			-0,23
Densité sur le rang	-0,14		0,14		0,18	-0,2		-0,19	0,31	1					-0,14							-0,22
IFT herbicide							-0,22				1	0,71		0,25	-0,18	0,57	0,74					-0,23
IFT herbicide avant relevé											0,71	1		0,15	0,28	0,54	0,58	0,19	0,26			
IFT fongicide			-0,23		-0,14			0,17	-0,25				1	0,19	0,25	0,65	0,22	0,62				
IFT insecticide	0,3			-0,18	-0,19			0,27	-0,24			0,15		1	-0,14	0,51	0,22	0,62	0,81	0,14		
IFT molluscicide											0,25	0,28	0,19	-0,14	1	-0,19	0,27	0,19	0,15			
IFT régulateur	0,28	-0,2	-0,16							-0,14	-0,18	0,25		-0,19	1	0,33	0,2					
IFT total	0,24		-0,15		-0,19			0,24	-0,28		0,57	0,54	0,65	0,51	0,27	0,33	1	0,53	0,45	0,52		
HRAC								0,17	-0,16		0,74	0,58	0,22	0,19	0,53	1	0,19	0,16				
FRAC		-0,14	-0,2					0,15	-0,16		0,19	0,62	0,15	0,2	0,45	0,19	1					
IRAC	0,36							0,29	-0,27		0,26	0,81			0,52	0,16		1			0,14	
Fractionnement N							0,17						0,14							1	0,43	
Quantité N	0,38		-0,22		0,15			-0,17	-0,23	-0,22	-0,23								0,14	0,43	1	

Figure 3 : Corrélations entre les variables de rendement, de flore adventice et de pratiques agricoles. Les cases vides sont celles pour lesquelles les corrélations ne sont pas significatives ($\alpha=0.05$). TSS : Travail Superficiel du Sol.

Une corrélation négative entre l'*abondance totale* des adventices et le *rendement* est observée ($\text{cor} = -0,16$, $P = 0,02$) (Figure 4a). Cette relation négative est plus marquée et significative avec la *richesse spécifique* ($\text{cor} = -0,24$, $P = 0,00026$) (Figure 4b). En revanche aucune relation n'est observée entre l'indice de *diversité de Shannon* et le *rendement* ni entre l'*équitabilité* et le *rendement* (Figure 3).

4.1.2. Relations avec la flore adventice

Les pratiques de gestion de l'interculture (*TSS*, *labour* et *décompactage*) et de semis (*date de semis* et *densité sur le rang*) étudiées individuellement ne sont corrélées ni à l'*abondance* ni à l'*équitabilité* des adventices. Elles ne sont pas (*labour* et *date de semis*) ou faiblement corrélées avec la *richesse spécifique* des adventices (*TSS*, *décompactage*, *densité sur le rang*).

L'indice de *diversité de Shannon* se distingue des variables précédentes puisqu'il est corrélé négativement au *TSS* et positivement à la *date de semis* et à la *densité sur le rang* (Figure 3). La diversité des adventices est défavorisée par la pratique d'un travail du sol superficiel mais elle est avantagée par un semis tardif et dense. Par ailleurs, le *labour* est négativement corrélé à l'*IFT herbicide* (Figure 3) mais il apparaît sur la Figure 5 qu'il y a un effet du labour, peu importe sa profondeur. Toutefois, ces résultats sont à tempérer car sur les 188 parcelles renseignées pour la variable *labour*, seules 50 ont été labourées. Parmi ces dernières, il s'agit d'un labour peu profond (0-20 cm) pour 28 parcelles et d'un labour profond (20-25cm) pour les 22 restantes. Il y a donc un déséquilibre entre le nombre de parcelles labourées et non-labourées. Par ailleurs, si le labour permet en partie de réduire l'application d'herbicide, on s'attend à ce qu'il agisse comme un moyen de réduire la flore adventice. Or on a vu précédemment qu'il n'y a aucun lien significatif entre la *richesse spécifique* ou l'*abondance totale* des adventices et le *labour*.

Les parcelles dont les herbicides ont été appliqués avant le relevé de flore ont été analysées séparément. Les effets des applications d'herbicides après relevé n'étant pas visibles au moment où le relevé a été fait, des valeurs d'*abondance totale* et de *richesse spécifique* plus élevées sont observées pour ces parcelles (Figure 6a). L'application d'herbicide réduit la flore adventice (Figure 6b), effet plus marqué sur la *richesse spécifique*, dont la médiane passe de huit espèces par relevé sans herbicide à quatre avec herbicide. En revanche, il s'avère que la quantité et la diversité de mode d'action des herbicides n'ont pas de relation avec l'*abondance totale* des adventices puisque leur augmentation n'entraîne pas la diminution de cette variable (Figure 3). A l'inverse, l'*IFT herbicide avant relevé* est négativement corrélé à la *richesse spécifique* de la flore adventice (Figure 3).

Toutes les parcelles étudiées ont reçu au minimum un apport d'azote. La *quantité d'azote* apportée, bien que non corrélée avec l'*abondance totale* des adventices, est corrélée négativement avec la *richesse spécifique* (Figure 3). L'apport d'azote, qui doit bénéficier à la culture, devrait pouvoir bénéficier également aux espèces adventices présentes dans la parcelle. Dans ce cas, la *quantité d'azote* apportée pourrait être corrélée positivement à la flore adventice. Le *fractionnement de l'azote* n'a pas de lien particulier avec la flore adventice (absence de corrélation) (Figure 3). Pour finir, il est noté que l'*équitabilité* n'est jamais corrélée avec les variables de pratiques. Seul l'indice de *diversité de Shannon* est faiblement corrélé négativement au *TSS* (Figure 3).

4.2. Analyses exploratoires : prise en compte des interactions entre les variables

Les résultats précédents permettent de décrire les relations pour chaque variable considérée individuellement, indépendamment des autres. La complexité de ces relations amène à les étudier en tenant compte de possibles interactions entre les variables, avec l'utilisation de méthodes multivariées, comme l'ACP.

4.2.1. Relations au sein du bloc de variables « Pression biotique »

Sur la période étudiée, un total de 97 espèces adventices a été recensé dans les parcelles de blé d'hiver. Sur cinq parcelles, aucune espèce adventice n'a été relevée. 25 espèces ont été trouvées seulement dans une parcelle.

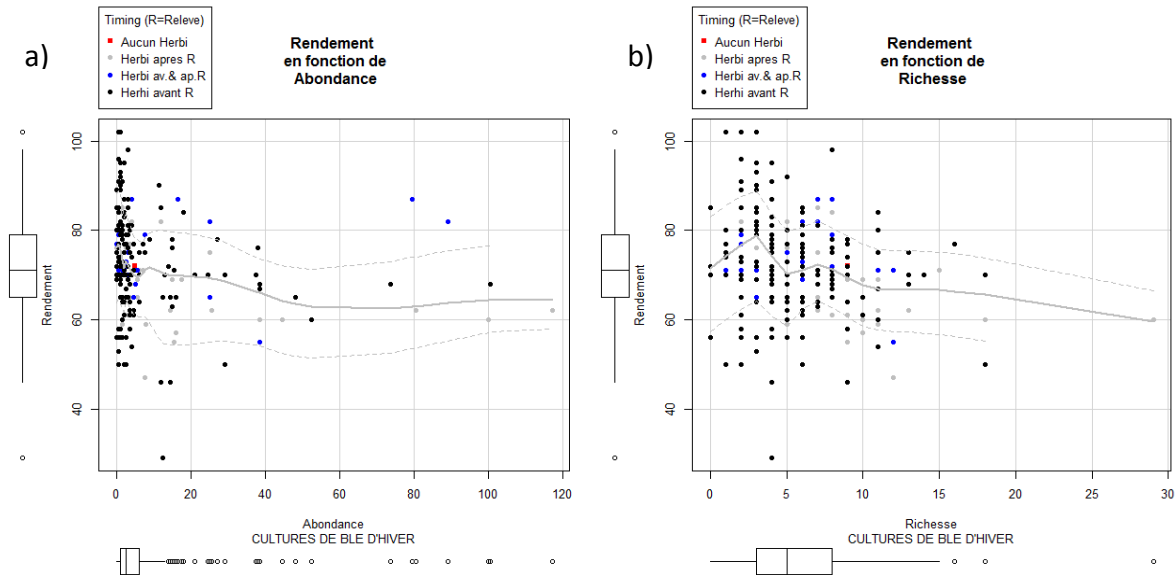


Figure 4 : Relation entre le rendement (q/ha) et a) l'abondance totale des adventices (densité/m²) b) la richesse spécifique des adventices (nombre d'espèce/relevé floristique). En gris : courbe de tendance (trait plein) et lissage du nuage de points (pointillé).

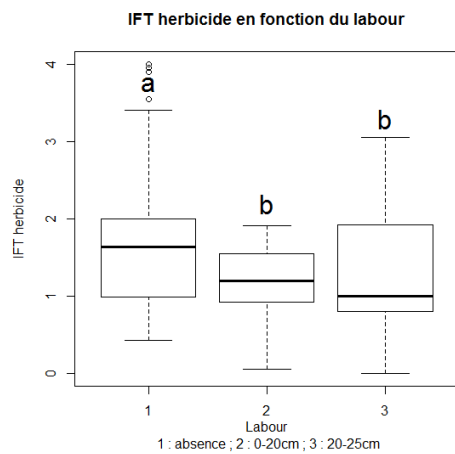


Figure 5 : Effet des différentes classes d'intensité de labour (0 : absence de labour, 1 : 0-20cm, 2 : 20-25cm) sur l'IFT herbicide.

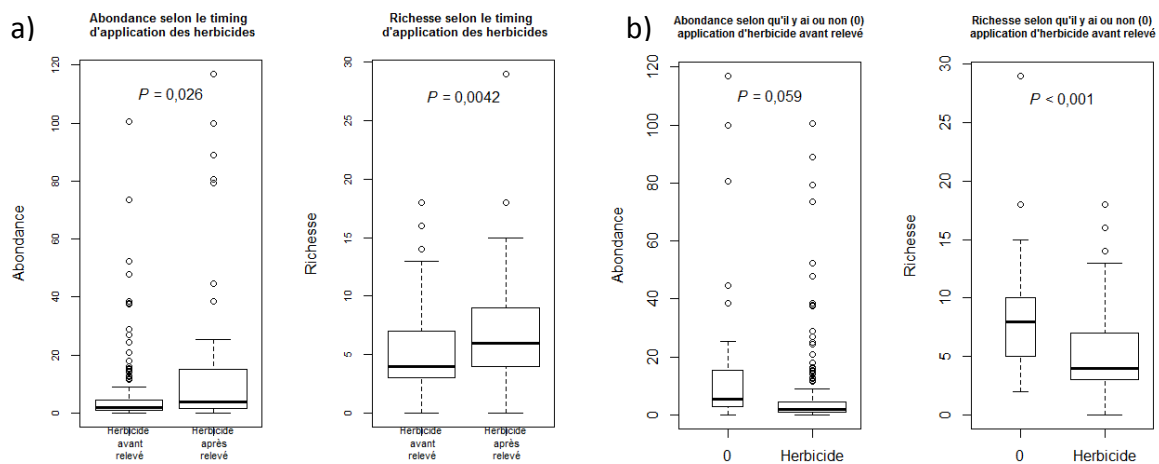


Figure 6 : Effet sur l'abondance (densité/m²) et la richesse spécifique (nombre d'espèce/relevé floristique) de la flore adventice de a) l'application d'herbicide (IFT) après le relevé de flore b) l'application d'herbicide (IFT) avant le relevé de flore.

Les dix espèces adventices les plus représentées, c'est-à-dire présentes dans plus de 18 % des parcelles (soit environ 40 parcelles sur les 220) sont la renouée liseron (*Fallopia convolvulus*), la pensée des champs (*Viola tricolor*), le gaillet gratteron (*Galium aparine*), le chénopode blanc (*Chenopodium album*), la petite ciguë (*Aethusa cynapium*), le coquelicot (*Papaver rhoeas*), la véronique à feuilles de lierre (*Veronica hederifolia*), la renouée des oiseaux (*Polygonum aviculare*), le chardon des champs (*Cirsium arvense*) et la fumeterre officinale (*Fumaria officinalis*). Les deux premières espèces sont présentes dans plus de 100 parcelles.

Les résultats de l'analyse entre les variables du bloc « Pression biotique » qui correspond à la flore adventice montrent qu'il y a une corrélation positive entre l'abondance totale et la richesse spécifique (Figure 3). Les droites de régularité traduisent l'équitabilité théorique à différents niveaux d'abondance de l'échelle de Barralis (Figure 7). 20% des parcelles ont des relevés floristiques en situation de régularité (points superposés aux droites), c'est-à-dire que toutes les espèces ont la même note d'abondance. Les points qui ne se trouvent pas sur les droites sont des parcelles avec des relevés floristiques moins réguliers. C'est notamment le cas lorsque l'abondance totale est supérieure à 20 ind/m². La corrélation négative entre abondance et équitabilité (Figure 3) va dans ce sens : plus l'abondance totale est élevée, plus il y a de probabilité que les relevés soient dominés par une espèce (équitabilité proche de 0). Ainsi l'abondance totale est liée à l'équitabilité de la communauté. En revanche, il n'y a pas de corrélation entre la richesse spécifique et l'équitabilité. Il n'y a pas non plus de corrélation entre l'abondance totale et l'indice de diversité de Shannon (il y a pourtant une corrélation entre abondance totale et équitabilité) (Figure 3). D'une manière générale, les variables qui caractérisent la flore sont opposées à la variable de rendement (Figure 8).

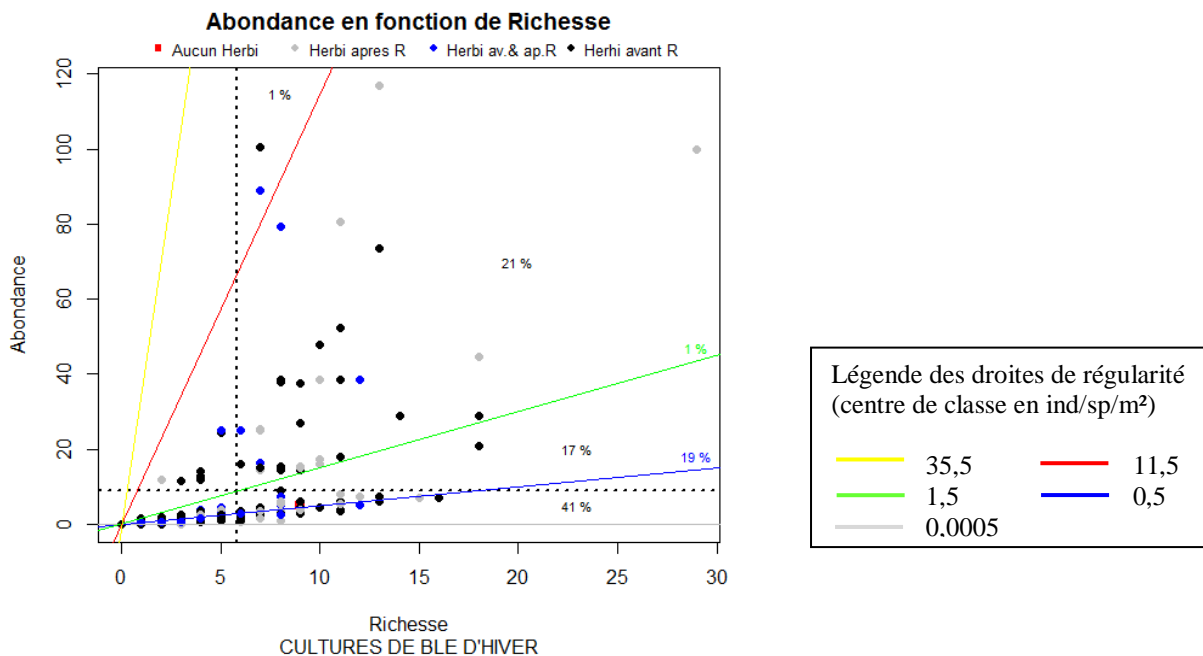


Figure 7 : Relation entre l'abondance totale (densité/m²) et la richesse spécifique (nombre d'espèce/relevé floristique) des adventices (R=relevé). Les droites de couleur, qu'on appellera droites de régularité sont de droites théoriques qui représentent les situations où toutes les espèces de la communauté ont la même abondance, et ce pour chaque centre de classe d'abondance (Tableau 1). Les pourcentages de points entre ou sur chaque droite de régularité sont indiqués. Les droites pointillées représentent les moyennes des deux variables.

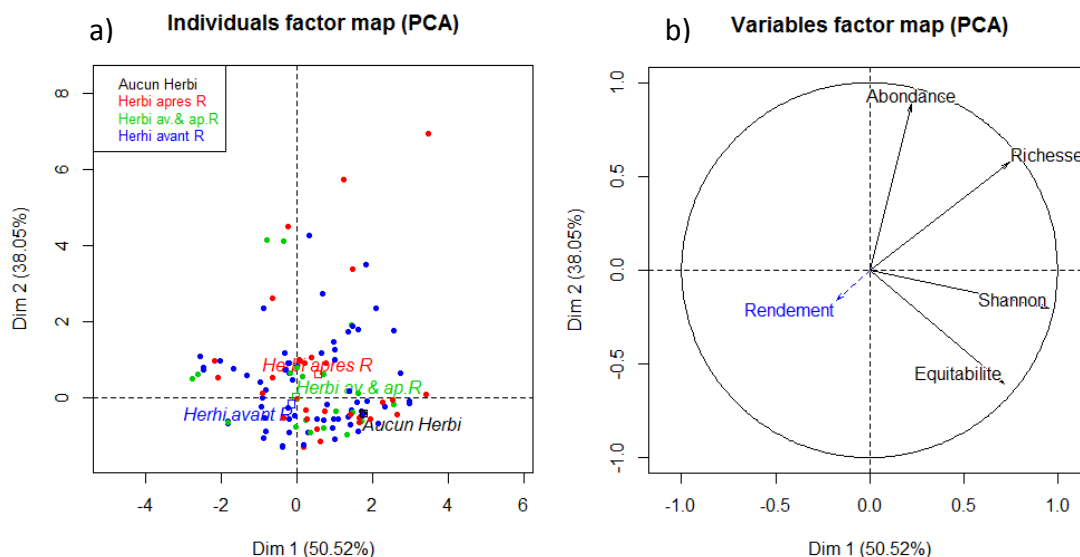


Figure 8 : Analyse en Composantes Principales réalisées sur les cultures de blé d’hiver pour les variables du bloc Pression Biotique, avec a) les plan des individus ; les couleurs correspondent aux 4 modalités d’application des herbicides, b) le plan des variables avec le rendement (en bleu) en variable supplémentaire.

4.2.2. Relations au sein des blocs de variables « Pratiques agricoles »

La Figure 9 présente le plan 1x2 de l’ACP faite sur toutes les variables du bloc « Pratiques agricole » mais présentée par sous-bloc de variables. Ce plan résume 35,9% de la variabilité. Le rendement et la richesse spécifique sont deux variables opposées tandis que l’abondance totale n’est pas expliquée par ce plan.

L’axe 1 du cercle des corrélations représente un gradient d’application de pesticides (Figure 9a). Le rendement va dans le sens des traitements tandis que la richesse spécifique des adventices y est opposée. Les diversités de mode d’action des différents types de pesticide (HRAC, FRAC et IRAC) sont respectivement corrélées positivement aux IFT herbicides, fongicides et insecticides. Deux grandes stratégies de traitement semblent être mises en place par les agriculteurs de la zone d’étude. La première stratégie se caractérise par des applications d’herbicides et de molluscicides, la seconde par des applications de fongicides, insecticides et régulateurs de croissance.

L’axe 2 du cercle des corrélations oppose les variables d’installation de la culture, notamment la densité de rang, et celles de fertilité azotée (Figure 9b et 9c). Cette dernière va dans le sens du rendement tandis que les variables d’installation de la culture vont dans le sens de la richesse spécifique. La date de semis et la densité sur le rang, varient positivement dans le même sens. Autrement dit, plus une culture est semée tôt, moins elle sera semée dense et plus la richesse spécifique de la flore adventice sera potentiellement élevée (Figure 9b). Il en va de même pour la quantité d’azote et le fractionnement d’azote : plus il y a d’azote apportée, plus le nombre d’apports d’azote est important (Figure 9c).

Trois stratégies ont été identifiées en termes de gestion de l’interculture (Figure 9d) : elles correspondent à l’utilisation du décompactage, du labour ou du TSS. Cependant, seules 45 parcelles sur 220 ont été décompactées, ce qui est trop peu pour considérer l’utilisation du décompactage comme une stratégie strictement opposable aux deux autres.

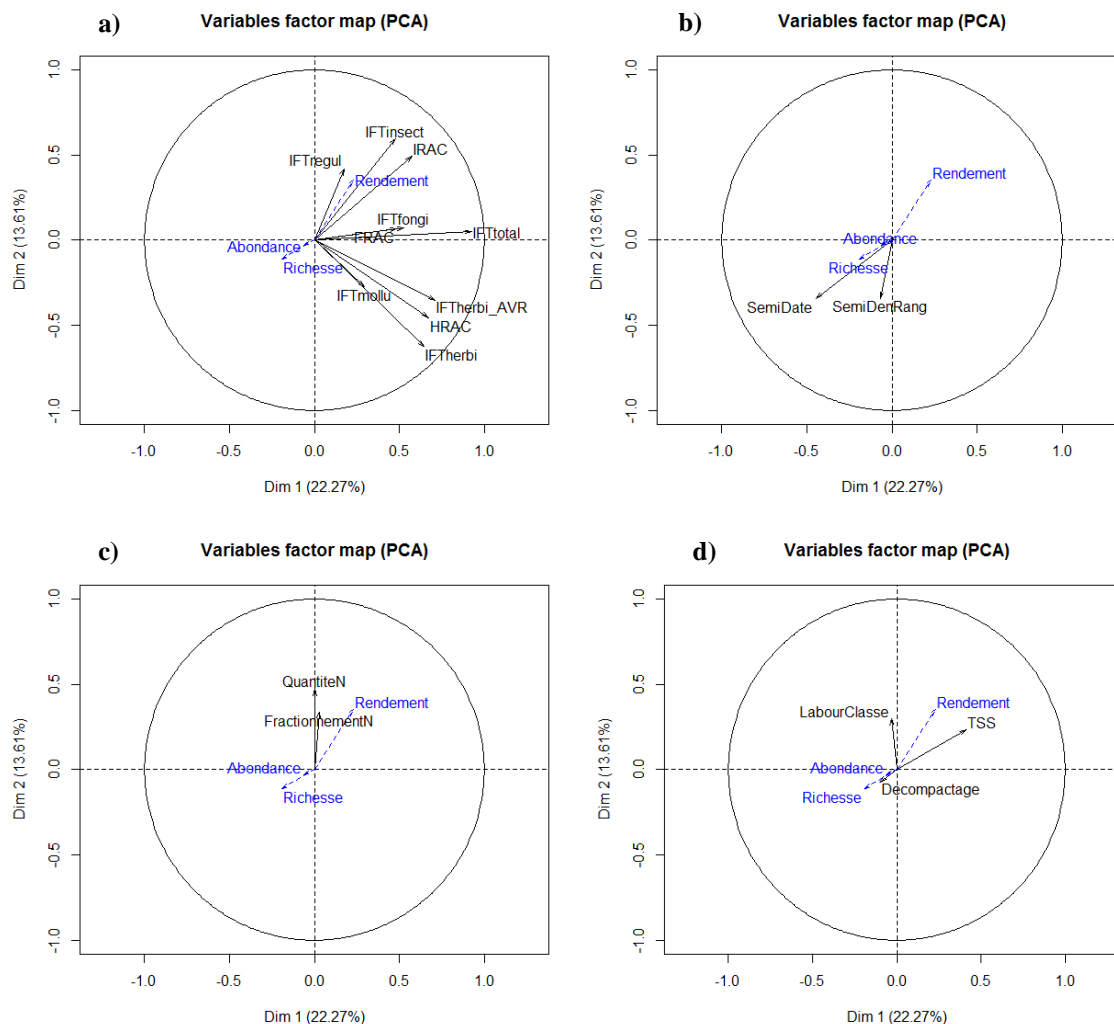


Figure 9 : Analyse en Composantes Principales sur les cultures de blé d’hiver réalisée pour l’ensemble des variables du bloc « Pratiques agricoles » et représentée pour chacun des sous-blocs a) « Lutte chimique contre les bioagresseurs », b) « Installation de la culture », c) « Fertilité chimique » et d) « Gestion interculturelle ». Les variables supplémentaires sont repérées en bleu.

Seuls des liens de corrélations entre les différentes variables de l’étude ont pu être mis en évidence au travers des analyses exploratoires. Comme plusieurs variables interviennent pour un seul phénomène, il est nécessaire d’utiliser une méthode globale qui permette d’analyser et de synthétiser les relations directes et indirectes entre les variables en tenant en compte des interactions existantes dans le système dans son ensemble. Dans cette optique, l’utilisation de la méthode PLS-PM permet d’aller plus loin dans l’analyse des relations entre les pratiques agricole, la flore adventice et la production agricole.

4.3. Modélisation

Les liens entre les variables latentes (VL) du modèle interne et les liens entre les VL et les variables manifestes (VM) du modèle externe ont été construits à partir des connaissances sur le fonctionnement des agroécosystèmes. Toutes les VL du modèle ont été construites en mode réflectif car il est considéré que les VM de chaque bloc reflètent un même phénomène.

Le modèle envisagé est composé de 3 VL (Figure 10) :

- « Production agricole » qui est le reflet de la VM *Rendement*. Le rendement étant une composante de la production agricole, il est établi que, plus le rendement est élevé, meilleure sera la production agricole.
- « Pression biotique » est une VL qui traduit l'effet de la flore. Elle est le reflet des VM *Abondance*, *Richesse*, *Diversité* et *Equitabilité*. Plus ces variables sont élevées, plus la pression biotique est estimée forte.
- « Optimisation de la surface cultivée » est une VL qui traduit l'effet des pratiques agricoles. En effet, ces pratiques sont mises en œuvres dans l'objectif de rendre la surface cultivée la plus favorable pour la culture. Cette VL est particulière puisqu'elle est elle-même le reflet de quatre « sous-VL » :
 - « Gestion interculturelle » est le reflet des VM *Décompactage*, *Labour* et *TSS*.
 - « Installation de la culture » est le reflet des VM *Date de semis* et *Densité sur le rang*
 - « Lutte chimique contre les bioagresseurs » est le reflet des VM *IFT herbicide*, *IFT herbicide avant relevé*, *IFT fongicide*, *IFT insecticide*, *IFT molluscicide*, *IFT régulateur*, *IFT total*, *HRAC*, *FRAC* et *IRAC*
 - « Fertilité chimique » est le reflet des VM *Fractionnement N* et *Quantité N*.

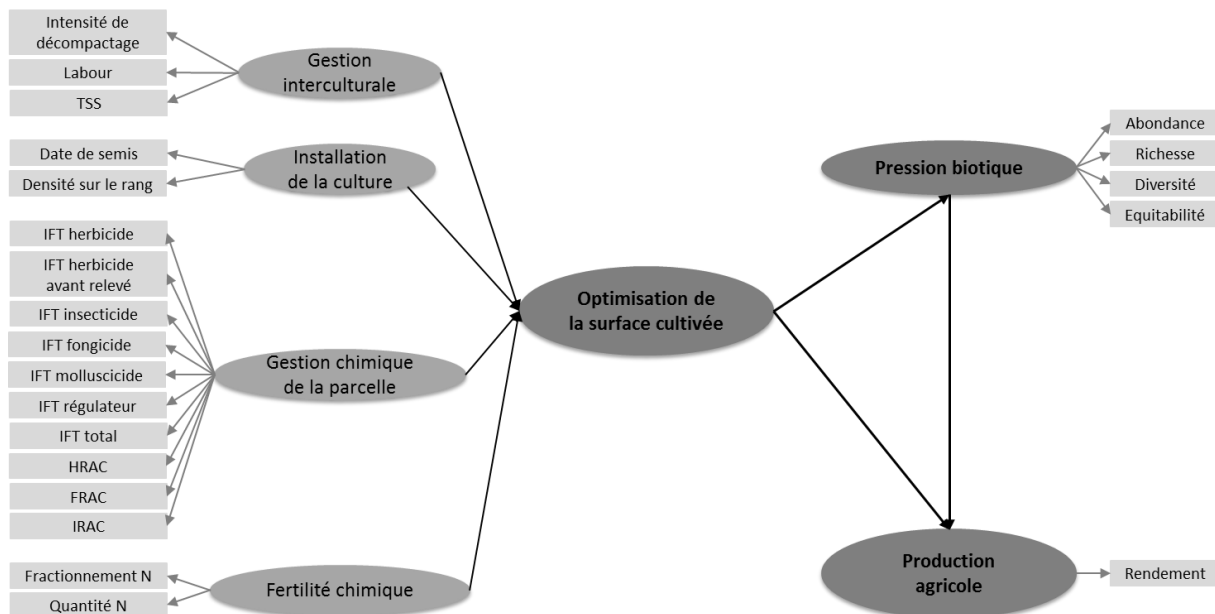


Figure 10 : Diagramme du modèle de type PLS qui décrit les relations entre les variables latentes « Gestion interculturelle », « Installation de la culture », « Gestion chimique de la parcelle », Fertilité chimique », « Optimisation de la surface cultivée », « Pression biotique » et « Production agricole », chacune décrite par leur variables manifestes.

Les résultats des analyses exploratoires ont permis de constater que quelques ajustements étaient nécessaires avant d'exécuter le modèle :

- La complexité des relations avec la variable *abondance* a conduit à utiliser la racine carrée de cette variable ($\sqrt{Abondance}$) pour atténuer l'effet des valeurs extrêmes.
- *L'équitabilité* est supprimée car elle ne permet pas de vérifier l'unidimensionnalité du bloc « Pression biotique » et qu'elle n'intervient que rarement dans les relations analysées.

De même, comme conseillé par Sanchez (2013), le signe de la variable *Décompactage* a été changé (*-Décompactage*) pour qu'elle varie dans le même sens que les autres variables du bloc « Gestion de l'interculture » et valide la condition d'unidimensionnalité du bloc.

Les résultats de l'exécution du modèle sont présentés sur la Figure 11. La robustesse globale du modèle est de 0,40. Les effets directs des VL entre elles sont donnés par la valeur de corrélation Corr (Figure 11). La Figure 12 permet de représenter les effets directs et indirects des VL entre elles. L'effet indirect de l'« Optimisation de la surface cultivée » sur la « Production agricole » via la « Pression biotique » est de 0,035, soit 1/7^e de l'effet direct (Figure 12). L'unidimensionnalité, exprimée par le coefficient de Dillon-Goldstein, est bien vérifiée pour chaque bloc ($Rho > 0,7$). Le modèle externe n'est pas totalement validé : pour beaucoup de VM, R^2 est inférieur au seuil de 0,49 et le poids (« weight ») de certaines VM pour expliquer la VL est faible (Annexe 4). Pour chaque bloc, les VM sont plus corrélées avec la VL qui leur ont été assignées qu'avec les autres VL (Annexe 5). Cependant, la procédure de bootstrap souligne la faible capacité prédictive du modèle, car la plupart des VM présentent une importante variabilité entre la valeur originale et la valeur prédite (Annexe 6).

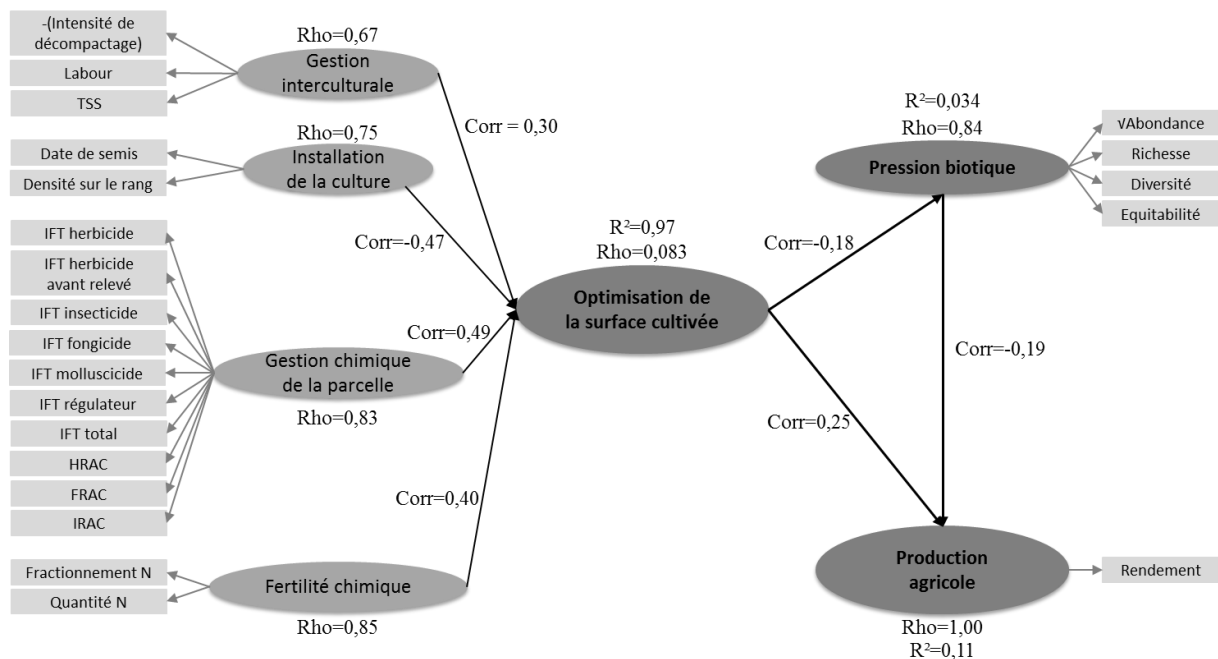


Figure 11 : Diagramme du modèle de type PLS qui décrit les relations entre les variables latentes « Gestion interculturelle », « Installation de la culture », « Gestion chimique de la parcelle », Fertilité chimique », « Optimisation de la surface cultivée », « Pression biotique » et « Production agricole », chacune décrite par leur variables manifestes. Corr est la valeur de corrélation entre deux variables latentes ; Rho est le coefficient Dillon-Goldstein de chaque variable latente ; R² est le coefficient de régression entre une variable latente endogène et ses variables latentes exogènes liées. La variable avec une transformation négative est indiquée par « -(Variable) » et la variable avec une transformation racine carré est indiquée par « √Variable ».

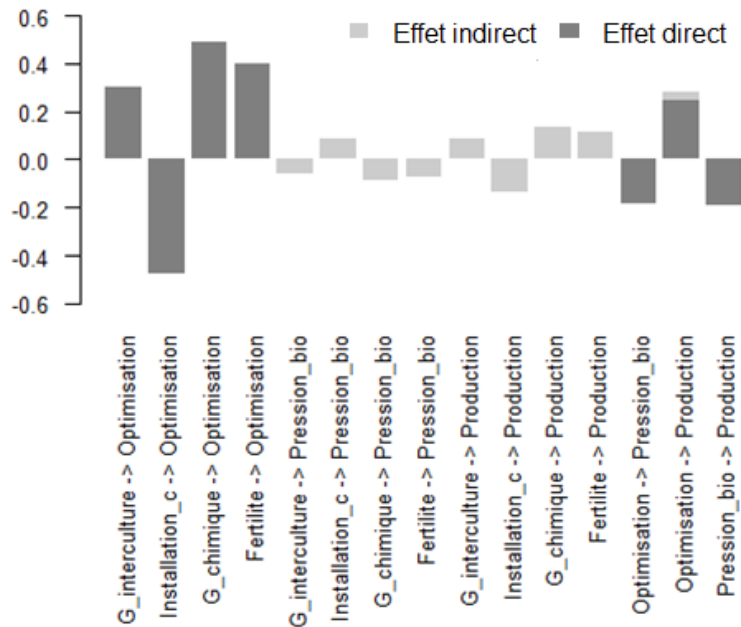


Figure 12 : « Path effects » mesurés entre les variables endogènes « Optimisation de la surface cultivée » (Optimisation), « Pression biotique » (Pression_bio) et « Production agricole » (Production) et leurs variables exogènes. Les effets directs et indirects sont représentés.

5. Discussion

5.1. Des relations complexes pour expliquer les communautés adventices

Dans la plupart des relations étudiées, la *richesse spécifique* de la flore adventice est souvent plus explicative (car plus corrélée) que l'*abondance totale*. Si ces résultats sont surprenants, ils peuvent en partie être expliqués par ce qui sera appelé le décalage temporel entre les relevés de flore. En effet, les relevés de flore sont faits à des moments différents vis-à-vis des interventions sur les parcelles, et notamment du désherbage chimique. Pour 16,4% des parcelles, tous les herbicides ont été appliqués après le relevé de flore (Annexe 3). Pour ces parcelles, les relevés reflètent un état de flore encore non gérés par les herbicides ce qui n'est pas le cas pour le rendement enquêté à la fin de la campagne lorsque toutes les interventions d'herbicides ont été réalisées. De même (mais dans une moindre mesure), pour les 14,1 % des parcelles dont une partie des applications d'herbicides ont été faites après relevé. Le décalage temporel a probablement moins d'impact sur la *richesse spécifique* que sur l'*abondance totale*. En effet, quel que soit le moment du relevé, si l'espèce est potentiellement présente dans la parcelle, la probabilité de la voir est élevée (à pondérer par sa biologie). En effet, il est très peu probable qu'un désherbage produise une destruction totale de l'espèce. La différence d'échelle entre parcelles et relevé floristique peut également atténuer les relations avec l'*abondance totale*.

Dans cette étude, si l'*IFT herbicide* peut en partie expliquer la *richesse spécifique* observée, il n'explique pas à lui seul l'*abondance totale* de la flore adventice observée. C'est également ce qu'a pu mettre en évidence De la Fuente et al. (1999) selon qui l'utilisation d'herbicide a un faible impact sur les différences d'abondance des adventices observées. Au-delà de la quantité d'herbicide apportée, il y a néanmoins un effet réducteur de l'application du traitement herbicide sur l'*abondance totale* de la communauté adventice. Au-delà d'un certain seuil, l'augmentation de la quantité d'herbicide appliquée n'aurait d'effet sur l'abondance totale des adventices que si son application est associée à d'autre(s) pratique(s) agricole(s).

L'absence de corrélation entre *quantité d'azote* et *fractionnement des apports azotés*, et *abondance totale* des adventices permet de constater que, pour cette base de données, les apports d'azote ont été plus profitables à la culture qu'aux adventices. D'autre part, la présence d'une corrélation négative entre *quantité d'azote* et *richesse spécifique* permet de dire que l'application d'une quantité d'azote importante a peut-être conduit à la sélection de quelques espèces adaptées à ces conditions, réduisant le nombre d'espèces (Roux et al., 2009).

Des résultats similaires ont déjà été mis en évidence : les apports d'azote et les applications d'herbicides, lorsque leurs effets sont étudiés isolés, n'ont pas d'effet sur l'*abondance* et la *richesse spécifique* des adventices. C'est en fait la combinaison des effets de l'azote, des herbicides et de la culture qui impactent la flore adventice (Deroulers, 2014).

5.2. Des relations complexes pour expliquer la production agricole

Le décalage temporel entre les relevés de flore et la récolte peut en partie expliquer la faible relation entre l'*abondance totale* des adventices et le *rendement*. La complexité des systèmes de cultures amène à penser que, si cette relation est faiblement significative ($\text{cor} = -0,16$, $P = 0,02$), alors d'autres paramètres doivent agir.

Toutes les espèces adventices ne sont pas égales en termes de compétitivité entraînant un impact négatif sur le rendement. Par exemple, d'après une étude de Wilson et al. (1990) sur du blé d'hiver, parmi 12 espèces adventices, *Galium aparine* est la troisième la plus compétitive tandis que *Papaver rhoeas* (8^e position) et *Veronica heredifolia* (11^e position) n'induisent pas de perte majeure de rendement ce qui ne fait pas d'elles des espèces prioritaires à contrôler. C'est donc surtout la compétitivité des espèces qui va induire une réponse de l'agriculteur en termes de pratiques agricoles (traitements herbicides ou travail du sol). Une espèce très fréquente et abondante mais qui serait très peu compétitive (levée tardive, petite taille) ne constituerait pas une gêne pour l'agriculteur et pourrait même présenter un intérêt (couverture de sol) (Dessaint et al., 2014).

Donc l'impact de la flore adventice dépend des caractéristiques propres de chacune des espèces qu'il serait intéressant de prendre en compte, de même que le stade de développement des adventices selon lequel la concurrence exercée sur la culture sera différente. Par ailleurs, les résultats avec la flore adventice peuvent être quelque peu biaisés par la date d'échantillonnage qui varie entre mars et mai selon les relevés dans le blé d'hiver. En effet, le nombre d'adventices varie avec la date de l'échantillonnage : Koocheki et al. (2009) ont trouvés un nombre d'espèce différent selon que les relevés aient été réalisés en avril, juin ou août.

Dans cette étude, en utilisant l'*abondance totale* et la *richesse spécifique* comme variables représentatives de la communauté adventice, toutes les espèces sont placées à un même niveau d'importance. Envisager d'intégrer ces informations (compétitivité et impact de chacune des espèces, stade de développement au moment du relevé, relevé réalisé à la même période) permettrait de mieux comprendre les relations entre la flore adventice et le *rendement*.

Le *travail superficiel du sol* et le *décompactage* influencent la *richesse spécifique*. Donc, si les interventions qui engendrent un travail du sol n'ont pas de lien direct avec le *rendement*, c'est *via* cet effet sur la flore adventice, qu'elles peuvent avoir un effet sur le *rendement*.

La *date de semis* est corrélée positivement au *rendement*. Une culture semée tôt aura le temps nécessaire pour maximiser son développement et sa croissance. A l'inverse, si le semis

est tardif, la culture aura moins de temps pour se développer et il sera nécessaire de semer plus dense pour tenter de compenser les éventuelles pertes de rendement. Les résultats ont montré que le *rendement* est plus faible lorsque le semis est tardif ou peu dense. Ceci montre que le blé d'hiver n'est pas en mesure de totalement compenser un semis qui n'est pas réalisé aux dates et densités optimales par les autres composantes du rendement (nombre de talles, d'épis et de grains, et poids des grains).

Les densités de semis préconisées tiennent compte des exigences de chaque variété (gestion de l'espace pour optimiser le développement tout en évitant la compétition intraspécifique). Or plus la *densité sur le rang* est forte, plus le *rendement* diminue. Ceci peut être le résultat d'une compétition intra-spécifique qui aurait lieu en cas de forte densité. Ces résultats sont cependant à nuancer car faiblement significatifs. De plus, les données des densités analysées sont celles du semis et non celles du peuplement réellement établi. Elles sont sans doute plus faibles en réalité (problèmes de germination, pertes pendant l'hiver, inondations,...).

Le *rendement* augmente avec l'*IFT total* sur la période 2006-2013. L'inverse a été observé dans une étude de Guillemin et al. (2013) où le rendement du blé tendre d'hiver n'augmente pas avec le niveau de l'*IFT total*. Ceci sous-entend que la relation positive observée ici n'est probablement pas une relation de causalité directe et que d'autres facteurs peuvent intervenir.

La *quantité d'azote* est fortement corrélée significativement au *rendement* et négativement à la *richesse spécifique*. C'est une pratique culturale doublement bénéfique. Aucune relation n'est relevée avec le *fractionnement des apports azotés*. Il a pour objectif d'optimiser l'absorption de l'azote par la culture : il s'agit d'apporter la bonne quantité au moment où la plante en a besoin (ceci permet d'éviter les pertes et de réduire les quantités totales de fertilisants dans une campagne). Les résultats montrent pourtant que, plus les apports d'azote sont fractionnés, plus la quantité totale d'azote apportée est élevée et ce pour un même rendement (aucune corrélation entre le fractionnement des apports d'azote et le rendement).

L'analyse de données de cette étude dans leur ensemble permet de mettre en évidence des relations complexes. Il est difficile de mettre en évidence des relations de causalité entre les variables ce qui permet de dire qu'il existe de nombreuses interactions entre elles.

5.3. Perspectives : les relations entre pratiques agricoles, flore adventice et rendement

Les résultats de la modélisation présentés dans cette étude montrent que les pratiques agricoles affectent positivement la production agricole (rendement). Elles permettent également de contrôler la flore adventice (corrélation négative entre les deux VL) qui elle-même affecte négativement la production agricole. L'effet indirect des pratiques agricoles sur la production agricole *via* un effet sur la flore adventice est positif mais assez faible. Ceci signifie qu'il y a une quasi-complète compensation de l'effet négatif de la flore adventice sur le rendement par l'effet négatif des pratiques agricoles sur la flore adventice. Ces résultats soulignent donc l'efficacité des pratiques agricoles pour le contrôle des adventices et pour l'augmentation du rendement. Ils soulignent également que le contrôle des adventices par les pratiques agricoles peut empêcher que le rendement diminue. Face à ces constats, la conception de systèmes doublement performants repose sur un jeu de balance entre les effets des pratiques agricoles sur la flore adventice et les effets de la flore adventice sur la

production agricole pour limiter les pratiques polluantes de gestion des adventices sans risquer de trop réduire la productivité.

La faible capacité prédictive du modèle montre néanmoins que le modèle tel qu'il a été construit est discutable. Le modèle devra être complété, perfectionné et ajusté avant de pouvoir le valider. Les ajustements peuvent consister dans un premier temps en des ajouts et/ou remplacement des variables plus adaptées. Il est possible d'envisager d'intégrer de variables pour inclure les effets de la succession culturale, les effets des facteurs environnementaux ou encore l'effet année. En effet, la succession culturale est un outil complémentaire non négligeable pour la gestion des adventices (Doucet et al., 1999 ; Roux et al., 2009). De plus, si d'une manière générale, les facteurs environnementaux expliquent moins les communautés d'adventices que les pratiques agricoles (Fried et al., 2008), le climat, par exemple, est un facteur influant fortement le niveau d'usage des pesticides en plus des risques sanitaires identifiés chaque année (Guillemin et al., 2013). Dans un deuxième temps, il est possible de revoir la conception du modèle. En retirant la variable latente « Optimisation de la surface cultivée », il est possible de lier directement les variables « Gestion interculturelle », « Installation de la culture », « Gestion chimique de la parcelle » et « Fertilité chimique » aux variables latentes « Pression biotique » et « Production agricole ». La pertinence de l'utilisation seule du rendement pour refléter la production agricole peut être restrictive. Le rendement est le résultat de la compilation de différentes composantes : nombre de pied/m² x nombre d'épis/pied x nombre de grains/épis x poids d'un grain. Les pratiques agricoles n'interviennent pas toutes sur la même composante. De ce fait, il est possible d'imaginer un modèle plus précis qui déclinerait ainsi le rendement. Ce travail d'amélioration du modèle fera l'objet d'un prochain stage de 6 mois à partir du mois de septembre.

Un tel modèle, basé sur des données d'enquêtes chez des agriculteurs (non-expérimentales) peut être utile comme support d'aide à la décision pour la gestion des agroécosystèmes pour identifier les zones où mettre en place des leviers d'action dans les systèmes alternatifs et ainsi répondre aux enjeux environnementaux de la gestion des adventices, mais aussi aux enjeux productifs (Puech et al., 2014). Si l'utilité de tel outil est avérée, il reste néanmoins établi que chaque agriculteur choisit un ensemble de pratiques en fonction de la nature de la culture, des contraintes environnementales, économiques et agronomiques et de ses objectifs personnels notamment de sa volonté de réduire voir supprimer les intrants chimiques. L'application des systèmes innovants par les agriculteurs est alors fortement dépendante de cet aspect social qu'il ne faut pas négliger. Ce modèle prend en compte les règles de décision des agriculteurs (pratiques agricoles réellement mise en place) et on a une vision de leur impact économique à travers le rendement. Cependant il ne prend pas en compte d'aspects sociaux et ne permettrait donc pas en l'état d'évaluer complètement la durabilité des systèmes.

6. Conclusion

La mise en place de systèmes innovants pour répondre aux enjeux économiques et environnementaux de l'agriculture doit passer par la compréhension des systèmes de culture actuels. L'étude des relations entre les pratiques agricoles, la flore adventice et la production agricole a permis de mettre en évidence la complexité des interactions entre ces trois composantes et la nécessité de l'utilisation d'une méthode d'analyse globale. La modélisation par la méthode PLS-PM peut-être un outil très utile pour démêler les nombreuses interactions qui interviennent dans les systèmes de culture et doit être davantage développée en agronomie.

7. Bibliographie

- ANDERSON, R. L., 2007. Managing weeds with a dualistic approach of prevention and control. A review. In : *Agronomy for Sustainable Development*. 1 mars 2007. Vol. 27, n° 1, p. 13-18. DOI 10.1051/agro:2006027.
- ARVALIS, 2012. Gérer le désherbage dans la rotation des cultures. In : [en ligne]. octobre 2012. [Consulté le 12 juin 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.arvalis-infos.fr/le-desherbage-la-gestion-des-adventices-dans-la-rotation-@/view-9094-arvarticle.html>.
- ATTARD, E., LE ROUX, X., LAURENT, F., CHABBI, A., NICOLARDOT, B. et RECOUS, S., 2011. Impacts de changements d'occupation et de gestion des sols sur la dynamique des matières organiques, les communautés microbiennes et les flux de carbone et d'azote. In : *Etude et Gestion des Sols*. 2011. Vol. 18, n° 3, p. 147-159.
- AUBERTOT, J. N., BARBIER, J. M., CARPENTIER, A., GRIL, J. J., GUICHARD, L., LUCAS, P., SAVARY, S., SAVINI, I. et VOLTZ, M., 2005. *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux*. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport. France. INRA et Cemagref.
- BENJAMIN, L. R., MILNE, A. E., PARSONS, D. J. et LUTMAN, P. J. W., 2010. A model to simulate yield losses in winter wheat caused by weeds, for use in a weed management decision support system. In : *Crop Protection*. novembre 2010. Vol. 29, n° 11, p. 1264-1273. DOI 10.1016/j.cropro.2010.07.015.
- BERTHET, E., 2013. *Contribution à une théorie de la conception des agro-écosystèmes : Fonds écologique et inconnu commun* [en ligne]. phdthesis. S.I. : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. [Consulté le 11 juin 2015]. Disponible à l'adresse : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00874630/document>.
- BERTI, A. et ZANIN, G., 1994. Density Equivalent - a Method for Forecasting Yield Loss Caused by Mixed Weed Populations. In : *Weed Research*. octobre 1994. Vol. 34, n° 5, p. 327-332. DOI 10.1111/j.1365-3180.1994.tb02001.x.
- BLACKSHAW, R. E., LARNEY, F. J., LINDWALL, C. W., WATSON, P. R. et DERKSEN, D. A., 2001. Tillage intensity and crop rotation affect weed community dynamics in a winter wheat cropping system. In : *Canadian Journal of Plant Science*. 1 octobre 2001. Vol. 81, n° 4, p. 805-813. DOI 10.4141/P01-023.
- BOHAN, D. A., POWERS, S. J., CHAMPION, G., HAUGHTON, A. J., HAWES, C., SQUIRE, G., CUSSANS, J. et MERTENS, S. K., 2011. Modelling rotations: can crop sequences explain arable weed seedbank abundance? In : *Weed Research*. 1 août 2011. Vol. 51, n° 4, p. 422-432. DOI 10.1111/j.1365-3180.2011.00860.x.
- BOIFFIN, J., MALEZIEUX, E. et PICARD, D., 2001. *Cropping systems for the future*. Wallingford, UK : CABI Publishing. ISBN 0-85199-530-6.
- CHIKOWO, R., FALOYA, V., PETIT, S. et MUNIER-JOLAIN, N. M., 2009. Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment*. août 2009. Vol. 132, n° 3-4, p. 237-242. DOI 10.1016/j.agee.2009.04.009.
- COLBACH, N., BIJU-DUVAL, L., GARDARIN, A., GRANGER, S., GUYOT, S. H. M., MÉZIÈRE, D., MUNIER-JOLAIN, N. M. et PETIT, S., 2014. The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. In : *Weed Research*. 1 décembre 2014. Vol. 54, n° 6, p. 541-555. DOI 10.1111/wre.12112.
- DE LA FUENTE, E. B., SUAREZ, S. A., GHERSA, C. M. et LEON, R. J., 1999. Soybean weed communities: Relationships with cultural history and crop yield. In : *Agronomy Journal*. avril 1999. Vol. 91, n° 2, p. 234-241.
- DEROULERS, P., 2014. *Influence des itinéraires culturaux sur l'assemblage des communautés d'adventices en céréale d'hiver* [en ligne]. Mémoire. Lille. ISA Lille. [Consulté le 15 juin 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.cebc.cnrs.fr/Fidentite/deroulers/PDF/DEROULERS_Paul_M2.pdf.
- DESSAINT, F., BIJU-DUVAL, L., BUTHIOT, M. et GUILLEMIN, J.P., 2014. Évaluer l'intensité de l'utilisation des pesticides dans les colzas d'hiver : cas de la zone d'étude de Fénay. In : *OCL*. janvier 2014. Vol. 21, n° 1, p. A101. DOI 10.1051/ocl/2013033.
- DOS SANTOS, H. P., FONTANELI, R. S., PIRES, J., LAMPERT, E. A., VARGAS, A. M. et VERDI, A. C., 2014. Grain yield and agronomic traits in soybean according to crop rotation systems. In : *Bragantia*. septembre 2014. Vol. 73, n° 3, p. 263-273. DOI 10.1590/1678-4499.0136.
- DOUCET, C., WEAVER, S. E., HAMILL, A. S. et ZHANG, J. H., 1999. Separating the effects of crop rotation from weed management on weed density and diversity. In : *Weed Science*. décembre 1999. Vol. 47, n° 6, p. 729-735.
- FRIED, G., NORTON, L. R. et REBOUD, X., 2008. Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment*. octobre 2008. Vol. 128, n° 1-2, p. 68-76. DOI 10.1016/j.agee.2008.05.003.
- GUILLEMIN, J.P., BIJU-DUVAL, L., BUTHIOT, M. et DESSAINT, F., 2013. Pesticides sur blé tendre d'hiver, diversité dans le détail. In : . octobre 2013. n° 667, p. 43-46.
- GUNTON, R. M., PETIT, S. et GABA, S., 2011. Functional traits relating arable weed communities to crop characteristics. In : *Journal of Vegetation Science*. 1 juin 2011. Vol. 22, n° 3, p. 541-550. DOI 10.1111/j.1654-1103.2011.01273.x.

- HERNÁNDEZ PLAZA, E., NAVARRETE, L. et GONZÁLEZ-ANDÚJAR, J. L., 2015. Intensity of soil disturbance shapes response trait diversity of weed communities: The long-term effects of different tillage systems. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 1 septembre 2015. Vol. 207, p. 101-108. DOI 10.1016/j.agee.2015.03.031.
- HOUDARD, Y. et BARLIER, J., 1978. Influence de la date de semis sur le développement et le rendement du ble d'hiver dans l'est de la France. In : *Influence de la date de semis sur le développement et le rendement du ble d'hiver dans l'est de la France*. 1978. p. 38pp.
- JUSKIW, P. E. et HELM, J. H., 2003. Barley response to seeding date in central Alberta. In : *Canadian Journal of Plant Science*. avril 2003. Vol. 83, n° 2, p. 275-281.
- KOOCHEKI, A., NASSIRI, M., ALIMORADI, L. et GHORBANI, R., 2009. Effect of cropping systems and crop rotations on weeds. In : *Agronomy for Sustainable Development*. juin 2009. Vol. 29, n° 2, p. 401-408. DOI 10.1051/agro/2008061.
- KROPFF, M. J. et SPITTERS, C. J. T., 1991. A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of the weeds. In : *Weed Research*. 1 avril 1991. Vol. 31, n° 2, p. 97-105. DOI 10.1111/j.1365-3180.1991.tb01748.x.
- LECHENET, M., BRETAGNOLLE, V., BOCKSTALLER, C., BOISSINOT, F., PETIT, M., PETIT, S. et MUNIER-JOLAIN, N. M., 2014. Reconciling Pesticide Reduction with Economic and Environmental Sustainability in Arable Farming. In : GUEDES, Raul Narciso Carvalho (éd.), *PLoS ONE*. 2 juin 2014. Vol. 9, n° 6, p. e97922. DOI 10.1371/journal.pone.0097922.
- MARTI, J. et SLAFER, G. A., 2014. Bread and durum wheat yields under a wide range of environmental conditions. In : *Field Crops Research*. 1 février 2014. Vol. 156, p. 258-271. DOI 10.1016/j.fcr.2013.10.008.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT, 2015. Agreste. In : *Agreste - Enquêtes* [en ligne]. 9 juin 2015. [Consulté le 9 juin 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/>.
- NEVE, P., VILA-AIUB, M. et ROUX, F., 2009. Evolutionary-thinking in agricultural weed management. In : *New Phytologist*. 1 décembre 2009. Vol. 184, n° 4, p. 783-793. DOI 10.1111/j.1469-8137.2009.03034.x.
- OERKE, E.-C., 2006. Crop losses to pests. In : *The Journal of Agricultural Science*. février 2006. Vol. 144, n° 01, p. 31-43. DOI 10.1017/S0021859605005708.
- PANNACCI, E. et TEI, F., 2014. Effects of mechanical and chemical methods on weed control, weed seed rain and crop yield in maize, sunflower and soyabean. In : *Crop Protection*. octobre 2014. Vol. 64, p. 51-59. DOI 10.1016/j.cropro.2014.06.001.
- POPP, J., PETŐ, K. et NAGY, J., 2012. Pesticide productivity and food security. A review. In : *Agronomy for Sustainable Development*. 17 octobre 2012. Vol. 33, n° 1, p. 243-255. DOI 10.1007/s13593-012-0105-x.
- PUECH, C., POGGI, S., BAUDRY, J. et AVIRON, S., 2014. Do farming practices affect natural enemies at the landscape scale? In : *Landscape Ecology*. 17 octobre 2014. Vol. 30, n° 1, p. 125-140. DOI 10.1007/s10980-014-0103-2.
- ROUX, X. Le, BARBAULT, R., BAUDRY, J., BUREL, F., DOUSSAN, I., GARNIER, E., HERZOG, F., LAVOREL, S., LIFRAN, R., ROGER-ESTRADE, J., SARTHOU, J. P. et TROMMETTER, M., 2009. *Agriculture et biodiversité: valoriser les synergies. Expertise Scientifique Collective INRA (FRA)*. Versailles, France : Editions Quae, c/o INRA. ISBN 978-2-7592-0309-3.
- SALONEN, J., HYVÖNEN, T., KASEVA, J. et JALLI, H., 2013. Impact of changed cropping practices on weed occurrence in spring cereals in Finland – a comparison of surveys in 1997–1999 and 2007–2009. In : *Weed Research*. 1 avril 2013. Vol. 53, n° 2, p. 110-120. DOI 10.1111/wre.12004.
- SANCHEZ, G., 2013. *PLS Path Modeling with R* [en ligne]. Trowchez Editions. Berkeley : s.n. Disponible à l'adresse : http://www.gastonsanchez.com/PLS_Path_Modeling_with_R.pdf.
- SANTÍN-MONTANYÁ, M. I., MARTÍN-LAMMERDING, D., WALTER, I., ZAMBRANA, E. et TENORIO, J. L., 2013. Effects of tillage, crop systems and fertilization on weed abundance and diversity in 4-year dry land winter wheat. In : *European Journal of Agronomy*. juillet 2013. Vol. 48, p. 43-49. DOI 10.1016/j.eja.2013.02.006.
- SHIPLEY, B., 2000. *Cause and Correlation in Biology: A User's Guide to Path Analysis, Structural Equations and Causal Inference* [en ligne]. Cambridge : Cambridge University Press. [Consulté le 5 mai 2015]. ISBN 978-0-511-60594-9. Disponible à l'adresse : <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9780511605949>.
- STOATE, C., BÁLDI, A., BEJA, P., BOATMAN, N. D., HERZON, I., VAN DOORN, A., DE SNOO, G. R., RAKOSY, L. et RAMWELL, C., 2009. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe – A review. In : *Journal of Environmental Management*. octobre 2009. Vol. 91, n° 1, p. 22-46. DOI 10.1016/j.jenvman.2009.07.005.
- WILSON, B. J. et WRIGHT, K. J., 1990. Predicting the growth and competitive effects of annual weeds in wheat. In : *Weed Research*. 1 juin 1990. Vol. 30, n° 3, p. 201-211. DOI 10.1111/j.1365-3180.1990.tb01704.x.
- ZEGADA-LIZARAZU, W. et MONTI, A., 2011. Energy crops in rotation. A review. In : *Biomass and Bioenergy*. janvier 2011. Vol. 35, n° 1, p. 12-25. DOI 10.1016/j.biombioe.2010.08.001.

Annexes

	Blé hiver	Orge hiver	Colza hiver	Orge printemps	Moutarde	Tournesol	Soja	Betterave sucrière	Triticale	Pois printemps	Mais	Oignon	Luzerne	Blé tendre printemps	Avoine hiver	TOTAL
Parcelle	188	94	92	53	46	24	19	14	8	5	4	3	2	2	1	563
Relevé	220	110	103	63	56	26	21	17	9	5	4	3	2	2	1	650

Annexe 1 : Distribution du nombre de parcelles et de relevé par type de culture. N.B.: Certaines parcelles ont eu plusieurs relevés de réalisés la même année.

Nombre de relevé par parcelle	1	2	3	4	Total
Nombre de parcelle concernée	488	65	8	2	563
Nombre de relevé par parcelle (culture blé hiver)	1	2	3	4	Total
Nombre de parcelle concernée (culture blé hiver)	161	23	3	1	188

Annexe 2 : Distribution du nombre de parcelle selon le nombre de relevé de flore réalisés.

Période d'application des herbicides	Aucun	Avant & après relevé	Après relevé	Avant relevé	Total
Nombre de parcelle	1	31	36	152	220
Nombre de parcelle (%)	0,5	14,1	16,4	69,1	100

Annexe 3 : Distribution des parcelles selon la période d'application des herbicides par rapport au relevé de flore.

Variable manifeste	Variable latente	Weight	R ²
-(Intensité de décompactage)	Gestion de l'interculture	0.4869	0.5045
Labour	Gestion de l'interculture	0.4124	0.2009
TSS	Gestion de l'interculture	0.6581	0.5086
Date de semis	Installation de la culture	-0.8293	0.8359
Densité sur le rang	Installation de la culture	-0.4139	0.3413
IFT herbicide	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1039	0.3011
IFT herbicide avant relevé	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1732	0.4016
IFT fongicide	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1654	0.3438
IFT insecticide	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1962	0.2965
IFT molluscicide	Gestion chimique des bioagresseurs	0.0998	0.0731
IFT régulateur	Gestion chimique des bioagresseurs	0.0850	0.0669
IFT total	Gestion chimique des bioagresseurs	0.2689	0.9097
HRAC	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1718	0.3967
FRAC	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1519	0.2565
IRAC	Gestion chimique des bioagresseurs	0.2185	0.4037
Quantité N	Fertilité chimique	0.5616	0.7189
Fractionnement N	Fertilité chimique	0.6025	0.7558
PCA(Gestion de l'interculture)	Optimisation de la surface cultivée	0.3684	0.1900
PCA(Installation de la culture)	Optimisation de la surface cultivée	-0.5079	0.4044
PCA(Gestion chimique des bioagresseurs)	Optimisation de la surface cultivée	0.5348	0.4072
PCA(Fertilité azotée)	Optimisation de la surface cultivée	0.4286	0.1670
√ Abondance	Pression biotique	0.3394	0.4980
Richesse	Pression biotique	0.4988	0.8995
Shannon	Pression biotique	0.3948	0.5300
Rendement	Production agricole	1.0000	1.0000

Annexe 4: Coefficients obtenus pour chaque variable manifeste du modèle PLS-PM qui explore les relations entre les pratiques agricoles (« Optimisation de la surface cultivée ») décomposées en quatre types de pratiques (« Gestion de l'interculture », « Installation de la culture », « Gestion chimique des bioagresseurs », « Fertilité chimique »), la flore adventice (« Pression biotique ») et la production agricole. Les valeurs de « weight » et R² proviennent de régressions. La variable avec une transformation négative est indiquée par « -(Variable) » et la variable avec une transformation racine carré est indiquée par « √Variable ». La mention « PCA(-) » (valable pour une VL sans VM qui lui sont propres) indique que c'est le résultat de l'ACP qui représente la VM.

Variable manifeste	Variable latente	Gestion de l'interculture	Installation de la culture	Gestion chimique des bioagresseurs	Fertilité chimique	Optimisation de la surface cultivée	Pression biologique	Production agricole
-(Intensité de décompactage)	Gestion de l'interculture	0.7103	-0.04393	0.07201	-0.10440	0.2791	0.21670	0.04750
Labour	Gestion de l'interculture	0.4482	0.06731	0.02357	0.17651	0.2364	-0.03884	0.02173
TSS	Gestion de l'interculture	0.7131	-0.32362	0.27189	-0.14628	0.3775	-0.10487	0.06856
Date de semis	Installation de la culture	-0.2667	0.91428	-0.31882	-0.07002	-0.6582	0.13002	-0.05507
Densité sur le rang	Installation de la culture	0.0351	0.58423	0.03511	0.00648	-0.3286	0.13983	-0.07738
IFT herbicide	Gestion chimique des bioagresseurs	-0.0412	-0.03020	0.54872	-0.23650	0.2384	0.03862	-0.07852
IFT herbicide avant relevé	Gestion chimique des bioagresseurs	0.0271	-0.21104	0.63372	-0.15756	0.3974	-0.16738	-0.00783
IFT fongicide	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1076	-0.12867	0.58637	0.01925	0.3793	-0.11874	0.14687
IFT insecticide	Gestion chimique des bioagresseurs	0.3147	-0.17159	0.54451	0.14145	0.4500	-0.15608	0.24476
IFT molluscicide	Gestion chimique des bioagresseurs	-0.0287	-0.08689	0.27034	0.08815	0.2290	-0.07628	0.18550
IFT régulateur	Gestion chimique des bioagresseurs	0.0696	-0.16502	0.25862	-0.00274	0.1951	-0.15779	0.25701
IFT total	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1938	-0.21906	0.95378	-0.03743	0.6167	-0.16620	0.24474
HRAC	Gestion chimique des bioagresseurs	0.0280	-0.11116	0.62982	-0.05111	0.3941	-0.07037	0.03266
FRAC	Gestion chimique des bioagresseurs	0.0890	-0.12739	0.50643	0.07507	0.3484	-0.13465	0.08441
IRAC	Gestion chimique des bioagresseurs	0.3217	-0.16090	0.63541	0.14062	0.5012	-0.10133	0.30044
Quantité N	Fertilité chimique	-0.1866	-0.09367	-0.02383	0.84787	0.3386	-0.17352	0.37669
Fractionnement N	Fertilité chimique	0.0506	-0.00461	0.04035	0.86934	0.3632	-0.00593	0.06442
PCA(Gestion de l'interculture)	Optimisation de la surface cultivée	0.9497	-0.12223	0.16165	-0.04961	0.4359	0.09231	0.06775
PCA(Installation de la culture)	Optimisation de la surface cultivée	-0.1495	0.96553	-0.18316	-0.04102	-0.6359	0.17378	-0.08528
PCA(Gestion chimique des bioagresseurs)	Optimisation de la surface cultivée	0.1682	-0.22791	0.97853	-0.04116	0.6381	-0.15842	0.19113
PCA(Fertilité azotée)	Optimisation de la surface cultivée	-0.0792	-0.05723	0.00961	0.99978	0.4086	-0.10450	0.25686
√ Abondance	Pression biotique	0.0094	-0.01890	-0.12342	-0.03736	-0.0617	0.70567	-0.21070
Richesse	Pression biotique	0.0248	0.14199	-0.14258	-0.12775	-0.1683	0.94842	-0.23210
Shannon	Pression biotique	0.0125	0.25654	-0.16281	-0.06237	-0.1999	0.72800	-0.11704
Rendement	Production agricole	0.0772	-0.07770	0.25306	0.25037	0.2806	-0.23349	1.00000

Annexe 5 : Cross-loadings observés pour le modèle PLS-PM qui explore les relations entre les pratiques agricoles (« Optimisation de la surface cultivée ») décomposées en quatre types de pratiques (« Gestion de l'interculture », « Installation de la culture », « Gestion chimique des bioagresseurs », « Fertilité chimique »), la flore adventice (« Pression biotique ») et la production agricole. La variable avec une transformation négative est indiquée par « -(Variable) » et la variable avec une transformation racine carré est indiquée par « √Variable ». La mention « PCA(-) » (valable pour une VL sans VM qui lui sont propres) indique que c'est le résultat de l'ACP qui représente la VM.

Variable manifeste	Variable latente	weights					loadings				
		Original	Mean.Boot	Std.Error	perc.025	perc.975	Original	Mean.Boot	Std.Error	perc.025	perc.975
-(Intensité de décompactage)	Gestion de l'interculture	0.4869	0.3848	3.56e-01	-0.7855	0.678	0.710	0.717	1.10e-01	0.4676	0.901
Labour	Gestion de l'interculture	0.4124	0.3774	2.41e-01	-0.3697	0.658	0.448	0.470	2.06e-01	-0.0701	0.741
TSS	Gestion de l'interculture	0.6581	0.4942	3.35e-01	-0.6248	0.870	0.713	0.617	2.52e-01	-0.1545	0.908
Date de semis	Installation de la culture	-0.8293	-0.5482	5.72e-01	-0.9722	0.796	0.914	0.861	1.55e-01	0.3688	0.986
Densité sur le rang	Installation de la culture	-0.4139	-0.1612	4.71e-01	-0.5686	0.950	0.584	0.611	1.62e-01	0.2981	0.985
IFT herbicide	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1039	0.0926	6.26e-02	-0.1762	0.168	0.549	0.550	1.12e-01	0.2886	0.746
IFT herbicide avant relevé	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1732	0.1533	7.36e-02	-0.2044	0.213	0.634	0.637	6.46e-02	0.5030	0.745
IFT fongicide	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1654	0.1513	5.84e-02	-0.1206	0.204	0.586	0.574	6.61e-02	0.4313	0.678
IFT insecticide	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1962	0.1871	6.30e-02	-0.0328	0.261	0.545	0.538	9.57e-02	0.3347	0.695
IFT molluscicide	Gestion chimique des bioagresseurs	0.0998	0.0959	4.41e-02	-0.0723	0.163	0.270	0.274	1.04e-01	0.0786	0.508
IFT régulateur	Gestion chimique des bioagresseurs	0.0850	0.0715	5.34e-02	-0.0774	0.150	0.259	0.249	1.13e-01	-0.0159	0.441
IFT total	Gestion chimique des bioagresseurs	0.2689	0.2475	9.28e-02	-0.2349	0.292	0.954	0.943	1.86e-02	0.9039	0.969
HRAC	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1718	0.1598	6.76e-02	-0.1724	0.215	0.630	0.629	8.68e-02	0.4330	0.765
FRAC	Gestion chimique des bioagresseurs	0.1519	0.1412	5.62e-02	-0.1132	0.197	0.506	0.502	6.99e-02	0.3487	0.625
IRAC	Gestion chimique des bioagresseurs	0.2185	0.2131	7.02e-02	-0.0454	0.310	0.635	0.637	7.67e-02	0.4640	0.752
Quantité N	Fertilité chimique	0.5616	0.5537	8.79e-02	0.3513	0.705	0.848	0.839	5.87e-02	0.6959	0.918
Fractionnement N	Fertilité chimique	0.6025	0.6073	8.62e-02	0.4538	0.803	0.869	0.869	4.48e-02	0.7787	0.948
PCA(Gestion de l'interculture)	Optimisation de la surface cultivée	0.3684	0.3303	2.35e-01	-0.3656	0.636	0.436	0.433	2.26e-01	-0.4952	0.657
PCA(Installation de la culture)	Optimisation de la surface cultivée	-0.5079	-0.3539	3.37e-01	-0.5794	0.535	-0.636	-0.432	4.27e-01	-0.7442	0.644
PCA(Gestion chimique des bioagresseurs)	Optimisation de la surface cultivée	0.5348	0.4801	1.89e-01	-0.4601	0.601	0.638	0.531	3.11e-01	-0.6526	0.756
PCA(Fertilité azotée)	Optimisation de la surface cultivée	0.4286	0.4345	1.01e-01	0.3117	0.613	0.409	0.360	2.58e-01	-0.5700	0.624
√ Abondance	Pression biotique	0.3394	0.3521	1.01e-01	0.1892	0.538	0.706	0.709	9.53e-02	0.5305	0.889
Richesse	Pression biotique	0.4988	0.4921	5.34e-02	0.3791	0.576	0.948	0.938	4.87e-02	0.8925	0.966
Shannon	Pression biotique	0.3948	0.3704	1.34e-01	0.0993	0.541	0.728	0.707	1.33e-01	0.4313	0.861
Rendement	Production agricole	1.0000	1.0000	1.15e-16	1.0000	1.000	1.000	1.000	1.11e-16	1.0000	1.000

Annexe 6 : Résultats de la procédure de bootstrap obtenu après 200 itérations sur le modèle PLS-PM qui explore les relations entre les pratiques agricoles (« Optimisation de la surface cultivée ») décomposées en quatre types de pratiques (« Gestion de l'interculture », « Installation de la culture », « Gestion chimique des bioagresseurs », « Fertilité chimique »), la flore adventice (« Pression biotique ») et la production agricole. La variable avec une transformation négative est indiquée par « -(Variable) » et la variable avec une transformation racine carré est indiquée par « √Variable ». La mention « PCA(-) » (valable pour une VL sans VM qui lui sont propres) indique que c'est le résultat de l'ACP qui représente la VM.

Résumé

Dans le contexte actuel, on attend des systèmes agricoles qu'ils soient doublement performants, à la fois plus productifs et moins polluants. Il est aujourd'hui difficile de dire s'il est possible de concevoir ce type de système face au compromis établi entre ces deux performances, notamment pour la gestion de la flore adventice. Il s'agit alors de comprendre les relations qui existent entre pratiques agricoles, flore adventice et production agricole. Les effets directs des pratiques agricoles et de la flore adventice sur la production agricole et des pratiques agricoles sur la flore adventice sont connus. En revanche, les effets indirects des pratiques agricoles sur la production agricole *via* une modification de la flore adventice n'ont pas été étudiés. C'est alors l'objectif de ce rapport. Les données sont issues d'enquêtes réalisées auprès des agriculteurs (pratiques agricoles et rendement) et de relevés floristiques effectués sur les parcelles de la zone d'étude de Féney. Dans un premier temps, les relations entre les variables sont étudiées par des analyses exploratoires. La complexité des interactions du système amène dans un deuxième temps à utiliser une méthode d'analyse plus complexe et plus globale de modélisation de type PLS-PM (Partial Least Square Path Modeling). Les résultats montrent un effet indirect positif des pratiques agricoles sur la production agricole équivalent à 1/7^e de l'effet direct positif.

Mots-clés : production agricole, pratiques agricoles, flore adventice, PLS-PM

Abstract

In the current context, cropping systems are expected to be doubly efficient. They must be more productive and less polluting. Today it is difficult to say whether it is possible to design such a system because of the trade-off between the two performances, especially for weed management. Then it is to understand the relationship between farming practices, weed flora and crop production. Direct effects of farming practices and weed flora on crop production and of farming practices on weed flora are well known but indirect effects of farming practices on crop production *via* weed flora modifications are not. It is the objective of this report. The data are from farmers' interviews (farming practices and yield) and weed surveys on the fields of Féney study area. Initially relationships between different variables are studied by explanatory analyses. Secondly the complexity of the interactions of the system leads to use a Partial Least Square Path Modeling method more complex and global. Results show a positive indirect effect of farming practices on crop production equivalent to 1/7th of the positive direct effect.

Keywords: crop production, farming practices, weed flora, PLS-PM