HAL
open science

Augmentation de la biodiversité cultivée et interactions avec la production agricole, la régulation biologique des bioagresseurs et la biodiversité associée

Séverin Yvoz

To cite this version:

Séverin Yvoz. Augmentation de la biodiversité cultivée et interactions avec la production agricole, la régulation biologique des bioagresseurs et la biodiversité associée. Sciences du Vivant [q-bio]. 2017. dumas-01699345

HAL Id: dumas-01699345

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01699345

Submitted on 2 Feb 2018

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

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

AGROCAMPUS OUEST

☐ **CFR Angers**

☑ **CFR Rennes**

Année universitaire : 2016 - 2017

Spécialité :

Ingénieur Agronome

Spécialisation / option :

Sciences des Productions Végétales / Ingénierie des Agrosystèmes

Mémoire de Fin d'Études

☑ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Augmentation de la biodiversité cultivée et interactions avec la production agricole, la régulation biologique des bioagresseurs et la biodiversité associée

Par : Séverin YVOZ

Mémoire non confidentiel

Soutenu à RENNES le 13 Septembre 2017

Devant le jury composé de :

Président : M.Carof

Maître de stage : M.Valantin-Morison

Enseignant référent : S.Menasseri

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

A.Le Ralec, Rapporteur

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Remerciements :

Je voudrais tout d'abord remercier mes maîtres de stage, Muriel Valantin-Morison, Safia Mediène et Olivier Thérond pour le soutien qu'ils m'ont fourni et le temps qu'ils m'ont consacré. On a réussi à organiser des réunions régulières malgré le fait que ce soit difficile de trouver des créneaux où tout le monde est disponible. Ainsi ce stage m'a permis d'acquérir de nouvelles connaissances et de découvrir d'autres aspects de la recherche scientifique. Je tiens également à remercier Mao Zhun pour l'appui qu'il m'a fourni dans la mise en place de l'analyse des compromis entre services grâce aux fronts de Pareto. Je tiens également à remercier les chercheurs et techniciens de l'UMR Agronomie ainsi que des autres centres INRA qui m'ont aidé lors de la mise en place des indicateurs et qui ont pris le temps de me faire des retours sur mon travail.

Je voudrais remercier également tous les stagiaires présents sur le site de Grignon et que j'ai rencontrés pendant mon stage. Cela a été pour moi une expérience personnelle très enrichissante car ça nous a permis de partager des points de vue ainsi que des cultures différentes. Toutes ces personnes ont rendu mon séjour plus agréable. Je pense notamment aux bons moments que l'on a passé à la cantine ou dans la cuisine du pavillon avec Ryo, Victoire, Amaury, Anthony, Brice, Nejma, Thomas, Claire, Justine, Walid, Hugo, Jaqueline et sans oublier Laurie, ma collègue de bureau et ma camarade d'exile au sein du SAD APT pendant près de 5 mois. Enfin, je remercie Virginia et Maroua mes compagnons d'infortune pendant le week-end. Il y a d'autres personnes que je n'ai pas citées, je tiens à les remercier même si je ne les ai pas beaucoup côtoyés.

Table des matières :

INTRODUCTION : 1

I) LA DIVERSITE CULTIVEE ET SON IMPACT SUR LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES AU SEIN DES AGROECOSYSTEMES 2

A) PRESENTATION DU SYSTEME D'ETUDE ET DEFINITIONS 2
i) Définition de l'agroécosystème. 2
ii) Qu'est-ce que la biodiversité. 2
iii) La notion de services et de biens écosystémiques 2
B) RELATION ENTRE BIODIVERSITE CULTIVEE ET SERVICES ECOSYSTEMIQUES. 3
i) Impact de l'augmentation de la diversité cultivée sur les biens et services écosystémiques. 3
ii) Mécanismes génériques mis en place par l'augmentation de la diversité cultivée 4
iii) Le cas particulier de la biorégulation des adventices 5

II) CONTEXTE DU STAGE ET PRESENTATION DES DONNEES : 5

A) PRESENTATION DU PROJET MACSI 5
B) HYPOTHESES ET OBJECTIFS DU STAGE 6
C) DEMARCHE DU STAGE 6

III) METHODOLOGIE 7

A) CHOIX ET DESCRIPTION DES JEUX DE DONNEES 7
B) CARACTERISATION DES ITINERAIRES TECHNIQUES 7
i) Les perturbations physiques 8
ii) Les perturbations chimiques 8
iii) Les ressources en azote 9
C) CONSTRUCTION D'INDICATEURS DE LA BIODIVERSITE CULTIVEE 9
i) Objectifs et logiques des indicateurs calculés 9
ii) Modes de calcul des indicateurs 9
iii) Indicateurs de biens et de services écosystémiques 10
D) ANALYSES STATISTIQUES 11
i) Une démarche de Méta-analyse 11
ii) Démarche d'analyse 11

IV) RESULTATS DES ANALYSES 13

A) DESCRIPTION DES VARIABLES : GAMMES OBSERVEES ET CORRELATIONS ENTRE VARIABLES 13
i) Description des variables « leviers » 13
ii) Description des services écosystémiques 14
iii) Analyse des corrélations entre leviers et services 15
iv) Quelles variables de leviers et de services retenir pour la suite ? 15
B) PROFILS DE PERFORMANCES DES SYSTEMES ETUDIES 15
i) Données en valeurs absolues 15
ii) Données relatives 16
C) FRONTS DE PARETO 16

i) Sur les données en valeurs absolues *16*
ii) Sur les données en valeurs relatives *17*
D) CONFRONTATION DES RESULTATS DES PROFILS DE PERFORMANCES ET DES FRONTS DE PARETO 17
i) Clusters obtenus sur les données absolues : *17*
ii) Clusters obtenus sur les données relatives : *18*
V) DISCUSSION DES RESULTATS 18
A) LES PROFILS DE PERFORMANCES 18
i) Sur les données en valeurs absolues *18*
ii) Sur les données en valeurs relatives *19*
B) LES FRONTS DE PARETO 19
i) Sur les données en valeurs absolues *19*
ii) Sur les données relatives *20*
C) CONFRONTATIONS DES DEUX ANALYSES. 20
VI) LIMITES ET PERSPECTIVES D'ANALYSES 21
A) LES LIMITES DES ANALYSES 21
i) Les limites des indicateurs *21*
ii) Les limites des méthodes *22*
B) PERSPECTIVES D'ANALYSES 22
CONCLUSION : 23
BIBLIOGRAPHIE : 24
SITOGRAPHIE : 26
ANNEXES : 27

Table des illustrations :

Figure 1 : Schéma simplifié de la biodiversité au sein des agroécosystèmes et de son lien avec la fourniture de services écosystémiques (d'après Duru et al., 2015)..... 2
Figure 2 : Représentation de mécanismes réduisant la compétition pour les ressources (d'après Gaba et al., 2014) 4
Figure 3 : Schéma simplifié représentant deux formes d'agriculture ayant le même niveau de production (d'après Duru et al, 2015) 6
Figure 4 : Schéma de la démarche mise en place au cours du stage 6
Figure 5 : Schéma de la démarche d'analyse mise en place, en lien avec les objectifs du stage . 11
Figure 6 : Représentation simplifiée de la construction d'un front de Pareto sur deux variables de services (d'après Mao et Allinne, 2016) 12
Figure 7 : Nombre d'espèces cultivées (a) et IFT total (b) en fonction des modalités de systèmes de culture..... 13
Figure 8 : Tableaux des corrélations entre les leviers sur les données absolues (a) et sur les données relatives (b)..... 13
Figure 9 : Cercles des corrélations sur les deux premiers axes de l'ACP réalisée sur les services avec les données en valeurs absolues (a) et relatives (b)..... 14
Figure 10 : Tableaux de corrélations entre les services pour les données absolues (a) et les données relatives (b)..... 14
Figure 11 : Tableau des corrélations entre les variables de leviers et de services selon la méthode de Spearman avec un alpha de 0.05, sur les valeurs absolues (a) et relatives (b) 15
Figure 12 : Résultats des classifications obtenues sur les données en valeurs absolues (a) et en valeurs relatives (b) 15
Figure 13 : Front de Pareto entre la marge minimale et la richesse spécifique en adventices sur les données en valeurs absolues 18
Figure 14 : Front de Pareto entre la marge minimale et la richesse spécifique en adventices sur les données en valeurs relatives..... 18

Tableau 1 : Principaux mécanismes liés à la diversité cultivée participant à la régulation des ravageurs (d'après Ratnadass et al. 2012) 4
Tableau 2 : Description simplifiée des 33 successions étudiées lors du stage..... 7
Tableau 3 : Liste des indicateurs décrivant le travail du sol 8
Tableau 4 : Liste des indicateurs décrivant l'utilisation de produits phytosanitaires 8
Tableau 5 : Liste des indicateurs décrivant la fertilisation réalisée 9
Tableau 6 : Liste des indicateurs décrivant la diversité cultivée 9
Tableau 7 : Liste des indicateurs décrivant les services écosystémiques 10
Tableau 8 : Résultats significatifs de l'analyse descriptive sur les clusters obtenus sur les données absolues, à partir des variables de services et des leviers 15
Tableau 9 : Résultats significatifs des tests de Kruskal-Wallis sur la classification en valeurs absolues et regroupement en fonction des oppositions entre clusters 16
Tableau 10 : Résultats significatifs de l'analyse descriptive, à partir des variables de services, des clusters obtenus avec les données relatives 16
Tableau 11: Description des résultats des fronts de Pareto réalisés sur les données absolues 17
Tableau 12: Description des résultats des fronts de Pareto réalisés sur les données relatives 17

Table des annexes :

Annexe I : Schéma conceptuel de l'organisation des services des agroécosystèmes modifié d'après Zhang et al. 2007 (Le Roux et al. 2008) 27
Annexe II : Le modèle en cascade de Haines-Young and Potschin (2012) 28
Annexe III : Description plus détaillée des 4 essais utilisés pour cette analyse 29
Annexe IV : Diversité des niveaux de leviers développés et des biens et services écosystémiques produits entre les 16 modalités de systèmes de culture 32
Annexe V : Cercle des corrélations de l'ACP réalisée sur l'ensemble des leviers de pratiques et de diversité cultivée en valeurs absolues 34
Annexe VI : Représentation des rendements (a) et de la marge minimum (b) par culture en fonction des modalités de système pour l'essai LACAGE. 35
Annexe VII : Arbres de régression réalisés sur les profils de performances obtenus avec les 5 variables de services en valeurs absolues (a) et en valeurs relatives (b) 36
Annexe VIII : Résultats significatifs des tests de Kruskal-Wallis sur la classification en valeurs relatives et regroupement en fonction des oppositions entre clusters 37

Introduction :

L'augmentation de la population mondiale, qui devrait atteindre 9 milliards d'habitants en 2050 et l'évolution des exigences de la société font que l'agriculture fait actuellement face à deux défis majeurs. Elle devra en effet assurer une production équivalente, voire supérieure, tout en réduisant son impact sur l'environnement (Tscharntke et al., 2012). Les attentes en termes de préservation de la biodiversité et de production de services écosystémiques deviennent de plus en plus fortes. Depuis les années 1950, l'Europe a connu une intensification de son agriculture, soutenue notamment par la Politique Agricole Commune. Cette intensification a promu une simplification et une spécialisation des agroécosystèmes entraînant un déclin de l'hétérogénéité des paysages et une augmentation de l'utilisation d'intrants chimiques. On a ainsi fait face à une perte d'habitats entraînant une diminution de la biodiversité et de l'abondance de nombreuses espèces (Emmerson et al., 2016). Face à ce constat, il semble donc nécessaire de mettre en place des pratiques de gestion des systèmes agricoles permettant d'augmenter le niveau de fourniture de services écosystémiques, tel que la pollinisation, la fertilité des sols ou les régulations biologiques sans altérer le niveau de production agricole. L'objectif de l'agroécologie étant de remplacer les intrants exogènes par des processus biologiques et écologiques. Cependant, il y a pour l'instant un manque de connaissances entre les principes agro-écologiques et leur mise en pratique en conditions réelles. Cela est dû au fait que les relations entre pratiques, processus écologiques et services écosystémiques sont pour certains encore mal connues et que l'effet de ces pratiques dépend fortement des caractéristiques du milieu environnant (Duru et al., 2015). Plusieurs études ont mis en évidence un lien entre la biodiversité cultivée, la simplification du paysage et les services écosystémiques rendus (Malézieux et al., 2009; Duru et al., 2015; Ratnadass et al., 2012; Gaba et al., 2015; Rusch et al., 2016). Néanmoins, d'autres études montrent une corrélation négative entre la biodiversité associée et le niveau de production des agro-écosystèmes (German, Thompson, et Benton, 2016). Dans ce contexte apparent d'incompatibilité entre service de production et biodiversité associée, nous allons essayer de voir si on observe une relation positive entre biodiversité et services écosystémiques et si ces services sont compatibles avec un haut niveau de production. Nous allons considérer ici deux types de biodiversité : la biodiversité cultivée ou planifiée (celle contrôlée par l'homme) et la biodiversité associée (l'ensemble des organismes vivants sur la parcelle, autres que ceux choisis par l'homme). Nous allons étudier ces interactions dans le système de grandes cultures, à partir d'expérimentations testant plusieurs leviers agro-écologiques afin d'assurer une plus grande durabilité des systèmes de cultures. Pour cela, j'ai dans un premier temps caractérisé les itinéraires techniques mis en place dans les différentes expérimentations afin de pouvoir séparer les effets des pratiques de ceux de la biodiversité cultivée. J'ai également construit des indicateurs permettant de comparer au sein des essais les niveaux de biodiversité cultivée en cohérence avec des indicateurs d'autres pratiques mises en place. Enfin, l'effet du niveau de biodiversité cultivée a été testé sur le niveau de production et la régulation biologique des adventices à partir de variables d'abondance et de richesse spécifique. A partir d'analyses des profils de performances et des compromis entre services, on essaiera de mettre en évidence des combinaisons de pratiques permettant de répondre à nos objectifs, c'est-à-dire substituer une partie des effets des intrants par la diversité cultivée.

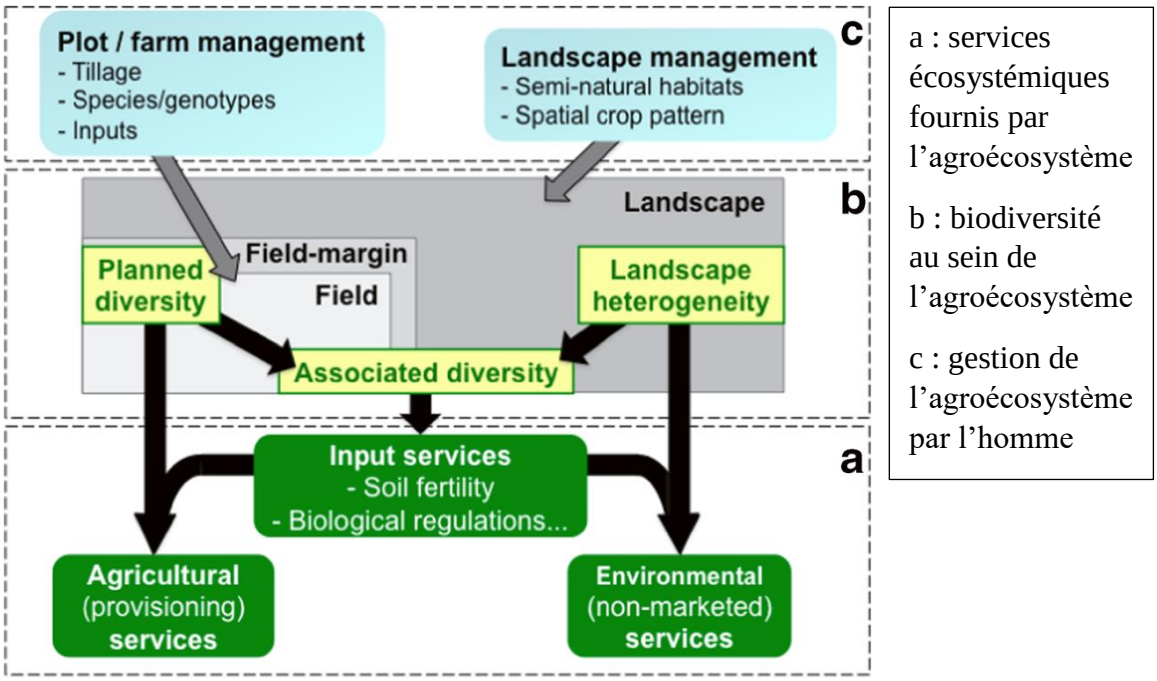


Figure 1 : Schéma simplifié de la biodiversité au sein des agroécosystèmes et de son lien avec la fourniture de services écosystémiques (d'après Duru et al. 2015)

I) La diversité cultivée et son impact sur les services écosystémiques au sein des agroécosystèmes

A) Présentation du système d'étude et définitions

Avant de détailler les effets potentiels de l'augmentation de la diversité cultivée sur les services écosystémiques rendus, nous allons définir les notions d'agroécosystèmes, de services écosystémiques et de biodiversité.

i) Définition de l'agroécosystème.

L'agroécosystème peut être défini comme l'écosystème modifié par l'homme dans un but productif. Il est donc à l'interface entre l'homme, ses pratiques et les ressources naturelles. Comme tout écosystème, il est le siège de flux de matière et d'énergie, d'interactions biologiques, qui sont à la base des habitats et des services qu'il fournit. Les agroécosystèmes sont cependant caractérisés par un impact de l'homme important sur leurs paramètres biotiques et abiotiques ainsi que par un niveau de perturbation élevé (en intensité et fréquence) dans le but de lever les facteurs limitant une production importante en quantité (Chabert, 2017).

ii) Qu'est-ce que la biodiversité.

La biodiversité a été définie lors de la convention de Rio (1992) comme *la variabilité des organismes vivants de toute origine […] et les complexes écologiques dont ils font partie, ce qui inclut la diversité au sein des espèces et entre les espèces ainsi que celle des écosystèmes*. Elle correspond donc à la somme des espèces présentes dans un paysage défini ainsi qu'à la variabilité au sein de ces espèces que l'on pourrait caractériser comme la variabilité phénotypique ou génétique. La biodiversité peut également être vue comme la diversité des compositions et des structures des communautés et des fonctions écologiques qu'elles assurent (Noss, 1990).

Au sein des agroécosystèmes, la biodiversité peut être caractérisée en fonction de sa relation avec l'homme (Figure 1). On a tout d'abord la biodiversité **planifiée**, qui est celle directement contrôlée par l'homme. Elle correspond donc aux espèces cultivées, les couverts non récoltées et aux animaux d'élevage présents sur la parcelle. On a ensuite la biodiversité **associée** qui correspond à l'ensemble des autres espèces présentes sur la parcelle comme les adventices, les ravageurs et leurs prédateurs, les pollinisateurs, les organismes du sol…. Enfin, on peut tenir compte de la diversité **du paysage**, c'est-à-dire la composition et la configuration des différentes parcelles cultivées et milieux semi-naturels. (Duru et al., 2015)

iii) La notion de services et de biens écosystémiques

La notion de services écosystémiques s'est surtout développée à partir des années 1990 avec la prise de conscience de l'importance de la biodiversité sur le fonctionnement des écosystèmes, aussi bien naturels que modifiés par l'homme. Ainsi, l'une des premières définitions de ces services fût celle de Daily (1997) : "*Ecosystem services are the conditions and processes through which natural ecosystems, and the species that make them up, sustain and fulfill human life. They maintain biodiversity and the production of ecosystem goods* ". Ces services sont alors décris comme étant les processus et conditions de l'environnement permettant de répondre durablement aux besoins de l'homme. Ils permettent entre autres le maintien de la biodiversité et la production de biens. En 2010, Nelson et Daily ont remodifié leur définition des services écosystémiques en y intégrant l'importance de l'environnement et de sa biodiversité dans la mise en place de ces services. Ils font également la distinction entre les services écosystémiques et la production de biens en présentant les services écosystémiques comme étant des processus

participant à la production de biens (tels que la production agricole) et supportant et régulant la vie (Nelson, Daily et al., 2010).

Lors du Millenium Ecosystem Assessment, 1300 scientifiques ont formulé la notion de « services écosystémiques » en simplifiant la définition de Daily : « *Ecosystem services are benefits people obtain from ecosystems* ». Ces services ont ainsi été classés en 4 classes : les services de support, de régulation, de production et les services culturels (Daily 1997). Mais d'autres classifications ont été proposées, dont certaines ont été détaillées en annexe I. On peut notamment citer la classification du Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) qui différencie : les services d'approvisionnement, de régulation et de maintenance et les services culturels. Cette division fut décidée dans le but de ne s'intéresser qu'à l'interface écosystème/société, les services de support n'étant que des services intermédiaires permettant la mise en place des autres services (dit finaux) (Haines-Young et Potschin, 2012). Ces derniers définissent la biodiversité comme étant un facteur central de la mise en place des services écosystémiques. Le lien qu'ils font entre le fonctionnement des agroécosystèmes et les services fournis est présenté en annexe II.

B) Relation entre biodiversité cultivée et services écosystémiques.

On peut observer des synergies ou des antagonismes entre les services. Par exemple, les services de régulation des cycles biochimiques comme l'azote, vont impacter le service de production en modifiant l'azote disponible et donc la capacité photosynthétique des plantes. Il est donc important de tenir compte de ces relations si l'on veut maximiser les services écosystémiques rendus (Chabert, 2017). L'antagonisme qu'il semble y avoir entre production agricole et préservation de la biodiversité est un exemple de relation dont il faut tenir compte pour le développement de l'agroécologie (Kremen et Miles, 2012).

i) Impact de l'augmentation de la diversité cultivée sur les biens et services écosystémiques.

Une diversité d'espèces plus importante peut fournir plus de services écosystémiques, mais également les rendre plus résilients. Ce phénomène peut s'expliquer par l'hypothèse de redondance de la biodiversité qui suppose que le nombre de services écosystémiques n'augmente pas proportionnellement avec la diversité, mais que plusieurs espèces peuvent avoir la même fonction. En cas de perturbation, une biodiversité plus importante pourrait augmenter les chances qu'une espèce puisse se substituer à une autre (Tscharntke et al., 2007). La diversification des systèmes de culture pourrait ainsi les rendre moins sensibles aux aléas biotiques et abiotiques (Tscharntke et al., 2012).

L'intensification de l'agriculture avec l'utilisation massive d'intrants chimiques a un impact négatif sur la biodiversité. Rusch et al. (2016) ont montré qu'il y avait un impact négatif de la simplification des paysages sur l'abondance et la diversité des ennemis naturels, ce qui entraîne une réduction du biocontrôle des ravageurs. Mais ils mettent cependant en avant qu'une augmentation de l'abondance et de la richesse des ennemis naturels n'améliore pas forcément le biocontrôle, mais elle peut améliorer la stabilité du contrôle biologique dans le temps et l'espace. De plus, il a été montré qu'il y a un lien entre la diversité des plantes et les communautés d'arthropodes au sein des agroécosystèmes. Une augmentation de la diversité cultivée a un impact positif sur le nombre de prédateurs généralistes et négatif sur le nombre de ravageurs. De même, les prédateurs généralistes auront un impact plus important dans les milieux diversifiés. L'augmentation de la diversité cultivée est donc positivement reliée à la richesse spécifique et à l'abondance des prédateurs, et donc aux services de régulation biologique (Dassou et Tixier, 2016). Il a également été montré que le rendement est positivement corrélé avec le stockage de carbone, de nutriments et de phosphore dans le sol et

Tableau 1: Principaux mécanismes liés à la diversité cultivée participant à la régulation des ravageurs (d'après Ratnadass et al., 2012)

Principe	Mécanisme	Effets
Allongement des rotations	Rotation avec des plantes non-hôtes	Allongement des rotations : les bio-agresseurs peu mobiles ne trouvent pas de plantes cibles ou de conditions favorables pendant plusieurs années, ce qui entraîne une décroissance de la population.
Bottom up effect	Effet dilution	Association de cultures qui rend la plante plus difficile à trouver pour les ravageurs. Pour un ravageur transporté par le vent, on augmente la probabilité qu'il soit intercepté par une plante non-hôte.
	Effet de barrière physique	Mise en place de plantations hautes et denses qui impactent le déplacement horizontal et vertical des ravageurs.
	Modification du microclimat	Mise en place d'un environnement défavorable au développement des ravageurs.
Top down effect	Protection des auxiliaires	Protection des prédateurs et parasitoïdes par les caractéristiques architecturales de la végétation.
	Fourniture de ressources complémentaires	Fourniture de proies alternatives pour les parasitoïdes et les prédateurs des ravageurs, leur permettant de survivre lorsque les ravageurs ne sont pas présents.
Association de plantes complémentaires	Plante Push	Certaines plantes de l'association ont un effet répulsif envers des ravageurs des autres cultures.
	Plante Pull	Certaines plantes peuvent être plus attractives que la culture d'intérêt et vont concentrer les ravageurs. Ceci peut permettre d'augmenter la prédation ou le parasitisme.
	Effets allélopathiques	Certaines plantes émettent des substances nocives pour la survie ou le développement de certains ravageurs. Ces substances sont émises en tant qu'exsudats racinaires ou lors de la décomposition.

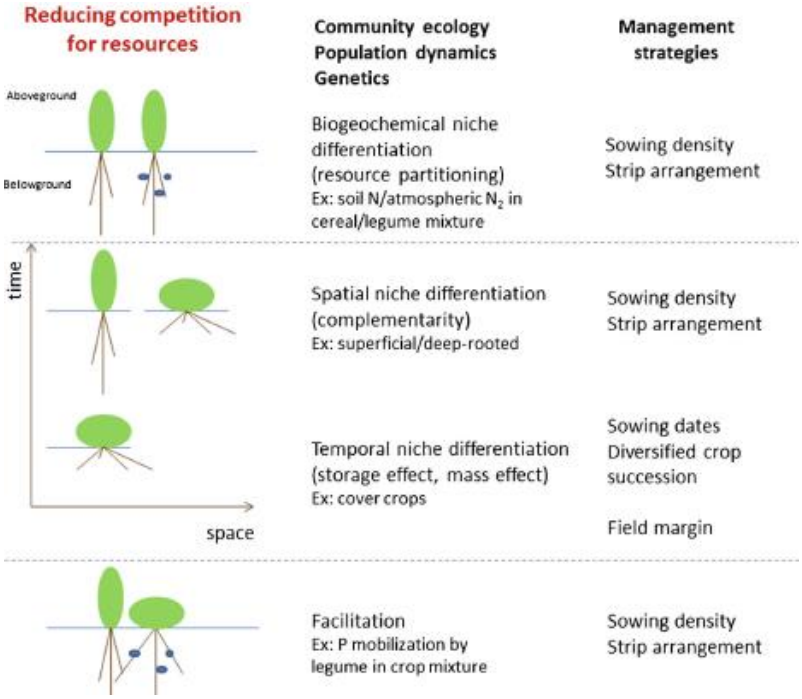


Figure 2 : Représentation de mécanismes réduisant la compétition pour les ressources (d'après Gaba et al., 2014)

le contrôle des adventices. Cependant, un effet négatif a été mis en évidence entre le rendement et la richesse spécifique et l'abondance des plantes, des invertébrés et des vertébrés associés aux cultures (German, Thompson et Benton, 2016).

L'intensification de l'agriculture affecte les services écosystémiques et impacte négativement l'abondance et la richesse des plantes sauvages, des carabes et des oiseaux. La diversité cultivée et les pratiques mises en place sur la parcelle impacte la richesse en adventices, fournissant moins de protection et de proies secondaires pour les prédateurs ce qui entraîne une diminution du contrôle des ravageurs. La diversité cultivée semble donc avoir un rôle important dans le fonctionnement de l'agroécosystème (Emmerson et al., 2016). De plus, il a été montré que la biodiversité totale est positivement corrélée à la biodiversité planifiée (Gaba et al., 2014). La diversification des plantes cultivées, à la fois au niveau spatial et temporel, semble donc être un levier important pour remplacer l'utilisation d'intrants phytosanitaires par la valorisation des services écosystémiques. Cependant, plusieurs auteurs nous mettent en garde sur l'existence d'un temps de transition au cours duquel on peut observer une baisse de rendement sans réelle augmentation des services écosystémiques (German, Thompson et Benton, 2016).

ii) Mécanismes génériques mis en place par l'augmentation de la diversité cultivée

Ratnadass et al. (2012) ont mis en évidence plusieurs mécanismes de régulation des ravageurs pouvant découler de l'augmentation de la biodiversité cultivée ; ils dépendent de l'interaction entre la plante, les ravageurs et les ennemis naturel. Le tableau 1 présente les principaux mécanismes qui peuvent être regroupés en 4 grands principes. On peut ainsi allonger les rotations afin de diminuer la fréquence de retour de conditions favorables aux ravageurs. On peut également jouer sur l'architecture du peuplement afin de limiter le développement des ravageurs (Bottom up effect), ou favoriser la présence d'auxiliaires des cultures (Top down effect). Enfin on peut mettre en place des associations de plantes présentant des complémentarités vis-à-vis de la régulation des ravageurs

Si on s'intéresse au niveau de production des agroécosystèmes, plusieurs processus liés à la biodiversité peuvent se mettre en place. Tout d'abord, si on ne se focalise que sur une ressource particulière, on peut supposer que dans les conditions du milieu, chaque espèce possède une efficience d'absorption et d'utilisation de cette ressource qui lui est propre. Ainsi plus la diversité initiale est importante, plus on a de chances d'avoir parmi celle-ci, une plante très efficiente qui sera alors plus compétitive et prendra le dessus sur les autres (Tilman, Lehman et Thomson, 1997). Si on s'intéresse maintenant à plusieurs types de ressources, chaque plante possède une combinaison d'efficience qui lui est propre. De même, l'agroécosystème possède une quantité variable de ces ressources, à la fois dans le temps et dans l'espace. Ainsi, aucune plante ne peut pleinement exploiter les ressources offertes par le milieu, c'est la complémentarité entre les espèces végétales qui permet d'utiliser au mieux les ressources dans le temps et l'espace. C'est pourquoi une diversité initiale plus importante aura une probabilité plus élevée de mieux valoriser les ressources du milieu, qu'une monoculture (Tilman, Lehman et Thomson, 1997). La figure 2 présente les mécanismes de complémentarité pouvant se mettre en place. En plus de ressources différentes, les espèces peuvent également prélever les ressources dans des niches différentes ou à des moments différents. Ce niveau de complémentarité entre espèces est à l'origine des relations de compétition ou de facilitation. La compétition correspond au fait que les différentes espèces sont dépendantes des mêmes ressources qui sont en général limitées. La facilitation peut quant à elle être définie comme le fait qu'une espèce améliore la disponibilité d'une ressource pour une autre, ou va limiter la pression de ravageurs ou pathogènes sur celle-ci. On peut considérer qu'il y a facilitation lorsque la compétition interspécifique est inférieure à la compétition intraspécifique, indiquant

une meilleure utilisation des ressources du milieu lorsqu'on mélange les espèces (Malézieux et al., 2009).

iii) Le cas particulier de la biorégulation des adventices

Les adventices ont tendance à se développer dans les cultures qui ont les mêmes besoins et les mêmes caractéristiques qu'elles. Chaque culture de la rotation va donc sélectionner un cortège d'adventices qui lui est propre. Ainsi, le fait de cultiver peu de cultures dans une succession entraîne une domination de la flore par quelques espèces fortement adaptées aux conditions de ces cultures. L'allongement des rotations en mettant en place une succession de cultures ayant des besoins, des dates de semis, des capacités de compétition et des pratiques culturales associées différentes des précédentes peut permettre d'éviter la dominance de quelques espèces spécialisées et donc limiter l'impact négatif des adventices. La diversification des cultures de la rotation va augmenter le nombre de périodes de semis, ces dernières étant un facteur clé de la composition en adventices. Diversifier les dates de semis va donc également permettre de ne pas sélectionner qu'un nombre très faible d'adventices très spécialisées, facilitant ainsi leur contrôle (Melander, Rasmussen et Bàrberi, 2005). La mise en place d'associations de cultures peut permettre un meilleur contrôle des adventices, par une meilleure valorisation des ressources (nutriments, eau et lumière) que les cultures pures, ce qui entraîne une compétition plus grande envers les adventices (Liebman et Dyck, 1993). L'intégration de prairies dans la rotation ou de cultures pérennes comme la luzerne permet également de limiter l'abondance en adventices par la mise en place d'un peuplement dense et par le fait que le sol n'est pas travaillé pendant plusieurs saisons empêchant la levée des adventices et donc le renouvellement du stock semencier (Meiss et al., 2010). Le même phénomène peut s'observer avec la mise en place de couverts permanents dans lesquels les cultures sont semées (Liebman et Dyck, 1993). Ces mécanismes dépendent cependant des conditions locales de la parcelle, des ressources disponibles pour les adventices et du niveau de perturbations dû aux pratiques culturales. Ces dernières peuvent avoir une influence de par le précédent cultural, le travail du sol (profondeur, inversion) ou l'utilisation d'herbicides. Les caractéristiques des adventices comme la taille des graines ou le taux annuel de décroissance du stock semencier ont également une influence sur la régulation des populations d'adventices (Gaba et al,. 2014).

II) Contexte du stage et présentation des données :

A) Présentation du projet MACSI

Mon stage sur l'étude de l'impact de la biodiversité cultivée sur les services écosystémiques s'inscrit au sein du projet MACSI (Mobilisons l'Analyse des Compromis entre Services écosystémiques pour l'Ingénierie agroécologique des systèmes agricoles et forestiers) regroupant un consortium d'équipes de recherche de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) et du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD). Ce projet a pour but d'étudier les relations se mettant en place entre les différents services écosystémiques afin d'améliorer leur préservation et leur optimisation par une meilleure gestion des systèmes de culture. Il se divise en 4 chantiers dont l'un s'intéresse à l'évolution de l'antagonisme entre production agricole et fourniture de services écosystémiques selon que les systèmes soient basés sur l'utilisation d'intrants exogènes ou sur le niveau de diversité cultivée. C'est au sein de ce volet que s'inscrit mon sujet de stage, dans le but notamment d'étudier les interactions entre production agricole, régulation des adventices et biodiversité cultivée. J'ai réalisé mon stage au sein de l'UMR Agronomie sous la direction de Muriel Valantin-Morison, Olivier Thérond et Safia Médiène.

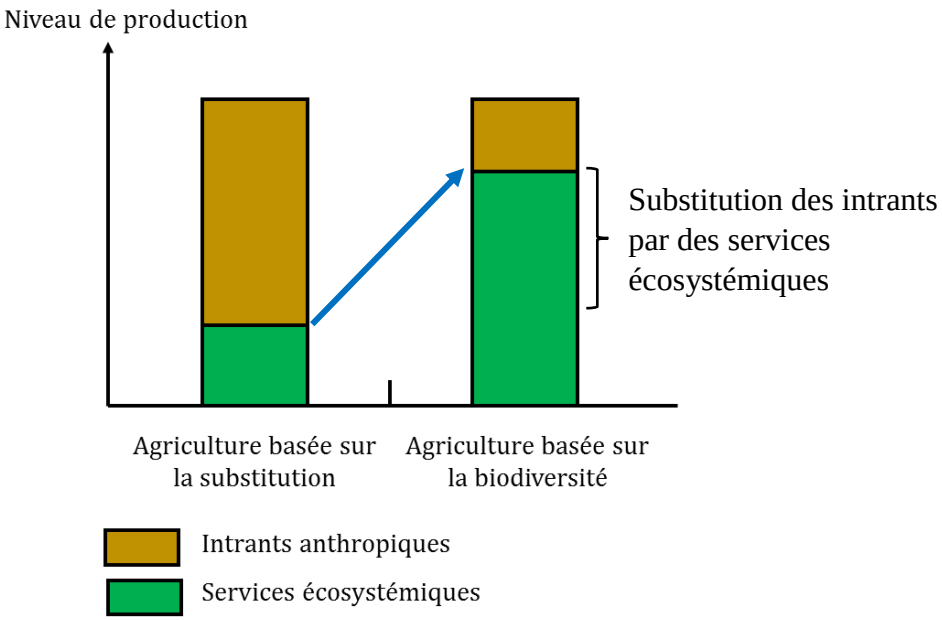


Figure 3 : Schéma simplifié représentant deux formes d'agriculture ayant le même niveau de production (d'après Duru et al., 2015)

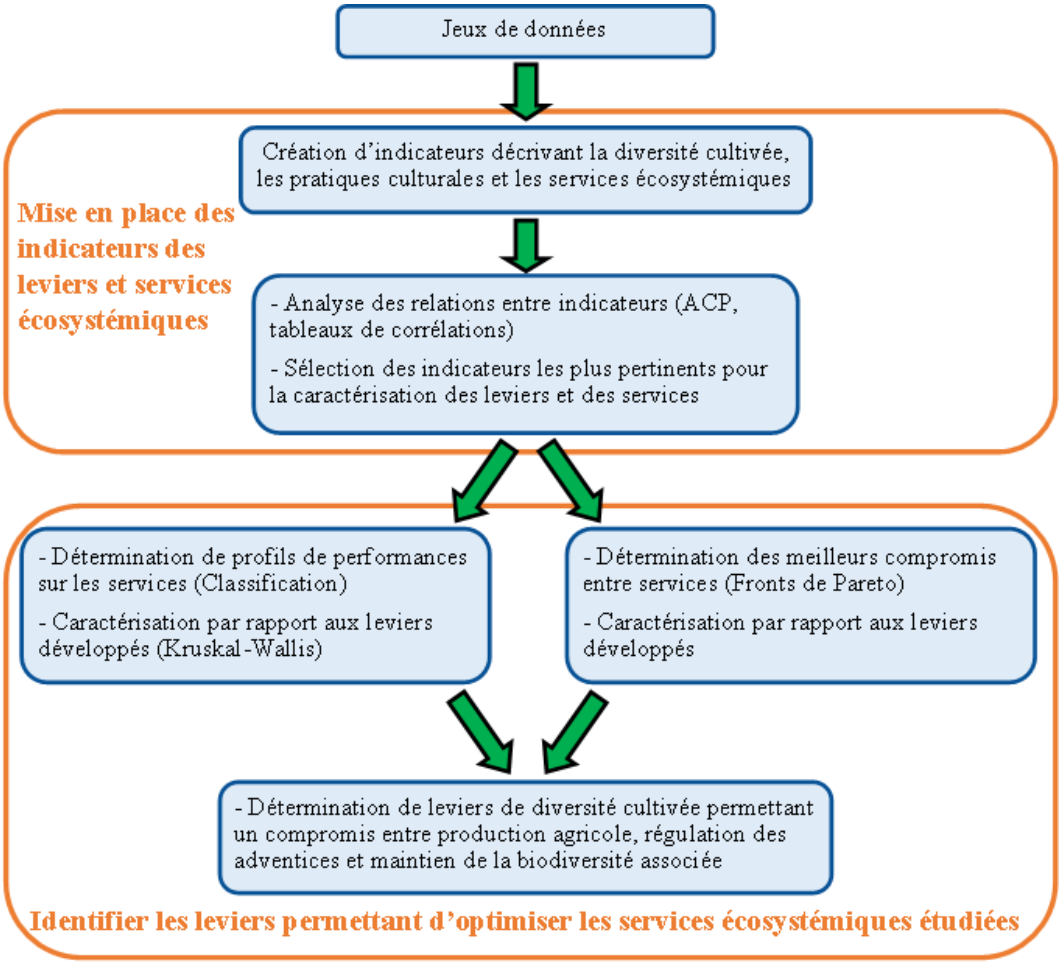


Figure 4 : Schéma de la démarche mise en place au cours du stage

B) Hypothèses et objectifs du stage

La problématique du stage se base sur plusieurs hypothèses fournies par la littérature concernant l'effet de la diversité cultivée sur le niveau de production agricole et la fourniture de services écosystémiques et décrites dans la première partie. Ces hypothèses peuvent être regroupées en 3 grandes catégories :

- La diversité cultivée permet une meilleure utilisation des ressources disponibles dans le milieu, permettant une production plus importante, notamment dans des systèmes avec peu de fertilisants (Smith, Gross et Robertson, 2008).
- On suppose que la diversité des systèmes de culture permet également un meilleur contrôle des adventices par la diversification des rotations et en augmentant la diversité des facteurs agissants sur la sélection des populations d'adventices. Ces facteurs peuvent modifier la compétition vis-à-vis des ressources (lumière, eau, nutriments), ou induire des perturbations physiques ou chimiques, comme les pratiques de travail du sol ou l'utilisation d'intrants (Liebman, Mohler et Staver, 2001; Gaba et al., 2014).
- On fait l'hypothèse qu'il est possible de substituer une grande partie de l'effet des intrants anthropiques par l'augmentation de la biodiversité cultivée. Cette hypothèse, représentée par le schéma simplifié de Duru (2015) (Figure 3), suggère qu'un niveau de biodiversité cultivée plus important pourrait permettre la fourniture de davantage de services écosystémiques, comme la régulation des cycles des nutriments et la régulation des bioagresseurs.

Les objectifs de ce stage sont donc de :

- décrire les liens et les interactions (antagonismes, synergies ou neutralité) entre les biens et les services écosystémiques (production agricole, régulation des mauvaises herbes et maintien d'une biodiversité associée).
- identifier des systèmes de culture, ou des innovations techniques qui assurent des compromis ou synergies entre ces biens et services.
- décrire ces systèmes et qualifier le rôle de la biodiversité cultivée par rapport à des leviers plus conventionnels, comme le travail du sol ou l'utilisation de pesticides.

C) Démarche du stage

Lorsqu'on modifie la diversité cultivée (rotations, mélanges d'espèces), les autres pratiques agronomiques le sont également, il faut donc mettre en place une démarche permettant de tester l'effet de la diversité cultivée sur les services écosystémiques en tenant compte des autres pratiques agricoles. J'ai donc représenté la démarche suivie lors de ce stage par le schéma de la figure 4. Dans un premier temps, j'ai sélectionné un ensemble d'indicateurs permettant de comparer les successions vis-à-vis des pratiques mises en place (diversité cultivée et utilisation d'intrants) et des biens et services écosystémiques fournis (production agricole, régulation de l'abondance en adventices et maintien de la diversité des adventices). J'ai ensuite étudié les relations entre les différents indicateurs dans le but de ne conserver que ceux qui ne sont pas redondants. Ces indicateurs nous permettrons de mettre en évidence les successions présentant des niveaux et des compromis de services intéressant puis de les caractériser par les leviers spécifiquement développés dans ces successions. Pour cela, j'ai réalisé en parallèle une analyse de profils de performances ainsi qu'une analyse des fronts de Pareto sur les variables de services. En comparant les résultats de ces deux analyses, j'ai essayé de faire ressortir les leviers (en termes de diversité cultivée et de pratiques culturales) permettant d'atteindre des niveaux de production de biens et services répondant à nos objectifs.

Tableau 2 : Description simplifiée des 33 successions étudiées lors du stage

Essai	Modalité	Successions	Description
LACAGE	PRODUCTIF	LAC-1 et LAC-2	Obtenir des rendements élevés sur une succession simple de Pois-Blé-Colza-Blé.
	INTEGRE	LAC-3 et LAC-4	Même successions que la modalité "INTEGRE" mais avec des objectifs de rendement revus à la baisse et l'utilisation de variétés plus rustiques.
	SCV	LAC-5 et LAC-6	Successions proche de l'essai "PRODUCTIF" qui s'appuie principalement sur le non travail du sol et la mise en place d'un couvert permanent de luzerne.
	BIOLOGIQUE	LAC-7 et LAC-8	Succession de deux années de culture de luzerne puis deux cultures de blé sur lesquels aucun pesticide n'est appliqué.
SIC	PHPE	SIC-1, SIC-7 et SIC-10	Objectif de rendement élevé tout en essayant de limiter son impact environnemental.
	0Pest	SIC-2, SIC-8 et SIC-11	Successions sans application de pesticides et se basant sur la diversification des cultures et l'utilisation de variétés rustiques.
	EN-	SIC-3, SIC-5 et SIC-12	Successions visant une consommation d'énergie réduite de 50% par rapport à la modalité « PHPE ».
	GES-	SIC-4, SIC-6 et SIC-9	Successions visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 50% par rapport à la modalité « PHPE ».
SOERE ACBB	T1	SOERE-1	Rotation assez typique de la région, maïs-blé-orge.
	T2	SOERE-2	Rotation incluant 3 années de prairie temporaire dans la rotation témoin : maïs-blé-orge-prairie.
	T3	SOERE-3	Rotation incluant 6 années de prairie temporaire.
	T4	SOERE-4	Rotation incluant 6 années de prairie temporaire, avec une fertilisation très réduite sur la prairie.
	T5	SOERE-5	Prairie permanente (mélange de ray-grass anglais, fétuque élevée et dactyle aggloméré).
ASSO	MB	ASSO-2	Monoculture de blé.
	MA	ASSO-1	Monoculture de l'association pois/blé.
	ABB	ASSO-5, ASSO-6 et ASSO-7	Rotation de 3 ans : pois-blé-blé.
	PBB	ASSO-3, ASSO-4 et ASSO-9	Rotation de 3 ans : pois/blé-blé-blé.

Témoin

III) Méthodologie

A) Choix et description des jeux de données

Dans notre étude, nous nous intéressons à 4 jeux de données provenant de projets de recherche indépendants. Ces jeux de données ont été retenus car ils mobilisent les leviers détaillés dans la première partie. Ces études présentent également un large gradient de diversité cultivée (de 2 à 12 espèces cultivées, associations d'espèces ou non, couverts permanents, …) et elles ont chacune leurs propres témoins, ce qui permet de pouvoir comparer les résultats. Enfin, les jeux de données contiennent des mesures et des observations permettant de déterminer des niveaux de services écosystémiques (mesures de rendement et de richesse et d'abondance en adventices). Les successions des différents essais sont brièvement décrites dans le tableau 2, mais une description plus détaillée des successions est présentée dans l'annexe III.

L'expérimentation LACAGE, réalisée sur le site de l'INRA de Grignon vise à tester la viabilité économique ainsi que les performances environnementales et techniques de systèmes de cultures innovants pouvant s'intégrer dans le contexte agricole du bassin parisien. J'ai accès à 7 années de mesures sur cet essai, de 2010 à 2016, mais je n'ai pas forcément de relevés d'adventices tous les ans sur toutes les parcelles, car elles ont principalement été réalisées sur les parcelles de blé.

L'essai SIC, réalisé à l'INRA de Versailles a pour objectif d'évaluer les performances de systèmes de cultures innovants. Les différentes modalités ont toutes comme objectifs de base d'avoir de bons niveaux de production tout en étant respectueuses de l'environnement. Les successions (même le témoin PHPE) possèdent donc toutes des niveaux de diversité élevés et supérieurs à la moyenne régionale. Les 3 successions de chaque modalité sont différents, je considère donc que j'ai 12 successions différentes. J'ai accès à 8 années de mesures sur cet essai, de 2009 à 2016, mais les mesures d'adventices ne sont pas toutes réalisées à la même période de l'année et il n'y a pas de mesures sur toutes les parcelles tous les ans.

L'essai SOERE ACBB réalisé à l'INRA de Lusignan, se base sur l'effet de l'introduction de prairies temporaires au sein d'une rotation, sur les performances du système. Cet essai a ainsi été conduit pendant 9 ans, de 2005 à 2013, afin de pouvoir réaliser une rotation de 6 années de prairie puis les trois années de culture.

Enfin, l'essai ASSO, réalisé à l'INRA de Grignon, avait pour but de tester l'effet de l'introduction d'association Pois/Blé dans une rotation, sur la production et la gestion des bioagresseurs. Sur cet essai, je n'ai des mesures d'abondance que pour les années 2009 et 2011 sur les parcelles contenant du blé et je n'ai pas de mesure de richesse en adventices. Contrairement à l'essai SIC, les rotations de cet essai sont très peu diversifiées (moins que la moyenne régionale) et elles se basent beaucoup sur l'utilisation d'intrants.

B) Caractérisation des itinéraires techniques

A partir du détail des itinéraires techniques des essais, j'ai calculé des indicateurs permettant de caractériser les pratiques mises en place. Ceci me permettra de distinguer les effets de l'utilisation d'intrants chimiques ou d'autres pratiques (travail du sol, binage, …). Le but de cette caractérisation des itinéraires techniques est de pouvoir représenter les perturbations du milieu en termes de fréquence et d'intensité (Gaba et al., 2014). Les différents indicateurs présentés ci-dessous ont d'abord été calculés pour chacune des années de la succession (entre la récolte précédente et la récolte de la culture considérée), une moyenne annuelle sur l'ensemble de la succession a ensuite été calculée.

Tableau 3 : Liste des indicateurs décrivant le travail du sol

Variable	Unité	Description
NB_W_SOL	Nb/an	Nombre moyen de passages de travail du sol par an (comprend le labour, préparation du sol et semis)
NB_BINAGE	Nb/an	Nombre moyen de passages de désherbage mécanique par an
NB_LABOUR	Nb/an	Nombre moyen de labour par an
CUMUL_PROF	cm/an	Profondeur cumulée des travaux du sol moyenne par an

Tableau 4 : Liste des indicateurs décrivant l'utilisation de produits phytosanitaires

Variable	Unité	Description
IFT_TOTAL	/an	Moyenne de l'Indice de Fréquence de Traitements annuel = $\sum\left(\frac{\text{Dose appliquée}}{\text{Dose homologuée}} * \%\ \text{surface traitée}\right)$
IFT_HERBICIDE	/an	Identique mais seulement traitements herbicides
IFT_FONGICIDE	/an	Identique mais seulement traitements fongicides
IFT_INSECTICIDE	/an	Identique mais seulement traitements insecticides
IFT_REGULATEUR	/an	Identique mais seulement traitements de régulateurs de croissance
IFT_MOLLUSCICIDE	/an	Identique mais seulement traitements molluscicides
NB_MA_HERBICIDE		Nombre cumulé de matières actives herbicides différentes utilisées au cours de la succession
NB_MA_FONGICIDE		Nombre cumulé de matières actives fongicides différentes utilisées au cours de la succession
NB_MA_INSECTICIDE		Nombre cumulé de matières actives insecticides différentes utilisées au cours de la succession
NB_MA_REGULATEUR		Nombre cumulé de matières actives régulatrices différentes utilisées au cours de la succession
NB_MA_MOLLUSCICIDE		Nombre cumulé de matières actives molluscicides différentes utilisées au cours de la succession
NB_MA_TOTAL		Nombre cumulé de matières actives différentes utilisées au cours de la succession
NB_MA_HERBICIDE_moyen	/an	Nombre moyen de matières actives herbicides différentes utilisées par an
NB_MA_FONGICIDE_moyen	/an	Nombre moyen de matières actives fongicides différentes utilisées par an
NB_MA_INSECTICIDE_moyen	/an	Nombre moyen de matières actives insecticides différentes utilisées par an
NB_MA_REGULATEUR_moyen	/an	Nombre moyen de matières actives de régulateurs de croissance différentes utilisées par an
NB_MA_MOLLUSCICIDE_moyen	/an	Nombre moyen matières actives molluscicides différentes utilisées par an
NB_MA_TOTAL_moyen	/an	Nombre moyen de matières actives différentes utilisées par an
NB_HERBICIDE	/an	Nombre moyen d'applications d'herbicides par an
NB_FONGICIDE	/an	Nombre moyen d'applications de fongicides par an
NB_INSECTICIDE	/an	Nombre moyen d'applications d'insecticides par an
NB_REGULATEUR	/an	Nombre moyen d'applications de régulateurs de croissance par an
NB_MOLLUSCICIDE	/an	Nombre moyen d'applications de molluscicides par an
NB_PESTICIDE_TOTAL	/an	Nombre moyen d'applications de produits phytosanitaires par an

i) Les perturbations physiques

Le travail du sol est une technique ayant un impact important sur le contrôle des bioagresseurs, notamment les maladies telluriques et les adventices (Shrestha et al., 2002), c'est d'ailleurs un levier qui est souvent développé en agriculture biologique. Le travail du sol peut agir tout d'abord en détruisant les plantules présentes dans la culture, en diminuant la compétition avec les cultures et la production de graines, limitant ainsi la fourniture du stock semencier. Le labour participe également au contrôle des adventices en les détruisant et en enfouissant les graines en profondeur empêchant ainsi leur levée (Valantin-Morison, Guichard, et Jeuffroy, 2008). J'ai donc mis en place plusieurs indicateurs présentés dans le tableau 3.

Pour caractériser le travail du sol, j'ai tout d'abord compté le nombre de passages de travail du sol (déchaumage, labour, …) et de binage au cours de chaque saison culturale pour traduire la fréquence de perturbations, et donc de destruction possible des adventices. Je donne ici la même importance à l'ensemble des pratiques sans tenir compte de leur niveau de perturbation. Je fais juste une distinction pour le binage que je considère comme ayant un impact différent car il est fait en réponse à la présence d'adventices lorsque la culture est déjà en place. J'ai également fait une distinction par rapport au labour en comptant le nombre de labour annuel, car il entraîne une inversion des couches du sol et donc une modification des communautés d'adventices pouvant émerger.

Cependant, le seul comptage du nombre de passages de travail du sol n'est pas suffisant pour différencier les systèmes de culture. Pour pouvoir comparer des techniques de travail du sol variées (labour, TCS, semis-direct) de manière quantitative, je me suis donc basée sur le calcul d'un indicateur de cumul des profondeurs de travail du sol censé traduire l'intensité de la perturbation (Chabert, 2017). Cet indicateur se calcul en additionnant des profondeurs de référence pour les différents travaux réalisés. De plus, des coefficients ont été ajoutés pour certaines pratiques très perturbatrices comme le labour ou le passage d'une herse rotative.

ii) Les perturbations chimiques

Il a été montré que la biodiversité diminue avec le nombre d'applications de produits phytosanitaires et de matières actives utilisées (Emmerson et al., 2016). J'ai donc calculé plusieurs indicateurs décrivant les perturbations liées à l'utilisation de pesticides (Tableau 4).

Tout d'abord, j'ai calculé l'indice de fréquence de traitement (IFT) qui permet de caractériser l'intensité du recours aux produits phytosanitaires. Cet indicateur est calculé de la manière suivante :

$$IFT_{parcelle} = \sum_{T} \left[\frac{DA_T}{DH_T} \times PPT_T \right]$$

- avec DA la dose du produit appliqué
- DH la dose homologuée, disponible sur le site E-phy (ANSES, 2017)
- PPT la proportion de la parcelle ayant reçu le produit

Il est calculé sur toutes les substances apportées au cours de la culture, excepté les traitements de semences (Pingault et al., 2009). L'IFT permet ainsi de tenir compte du nombre de traitements réalisés et des quantités appliquées par rapport à la valeur de référence. Afin de caractériser au mieux les pratiques, j'ai détaillé l'IFT en fonction des catégories de produits utilisés (herbicide, fongicide, insecticide, molluscicide et régulateur de croissance).

Pour caractériser la diversité des substances utilisées, je me suis également intéressé au nombre de matières actives différentes utilisées à partir des données du site E-phy (ANSES, 2017). Il a été calculé sous la forme d'une moyenne annuelle et sous la forme d'une valeur cumulée sur la succession. Ceci permet ainsi de caractériser soit le niveau moyen de diversité des substances

Tableau 5 : Liste des indicateurs décrivant la fertilisation réalisée

Variable	Unité	Description
QUANTITE_N	kg/an	Quantité moyenne d'azote appliquée par an, en Unité (kg d'azote par ha)
NB_APPORTS_N	/an	Nombre moyen de passages d'apports d'azote par an

Tableau 6 : Liste des indicateurs décrivant la diversité cultivée

Variable	Unité	Description
NB_ESPECES	Nombre entier positif	Nombre d'espèces cultivées au cours de la succession
Equi.Esp	Entre 0 et 1	Moyenne de la différence à l'équilibre de la répartition de chaque espèce cultivée
Div.Esp	Nombre positif	Multiplication des deux indicateurs précédents
NB_FAMILLES	Nombre entier positif	Nombre de familles botaniques différentes cultivées au cours de la succession
Equi.Familles	Entre 0 et 1	Moyenne de la différence à l'équilibre de la répartition de chaque famille botanique
Div.Familles	Nombre positif	Multiplication des deux indicateurs précédents
NB_SEMIS	Entier de 1 à 5	Nb de périodes de semis différentes au cours de la succession
Equi.Semis	Entre 0 et 1	Moyenne de la différence à l'équilibre de la répartition des différentes périodes de semis
Div.Semis	Nombre positif entre 1 et 5	Multiplication des deux précédents
K.Couv	Entre 0 et 1	Nombre de mois où le sol est couvert pendant la succession divisé par la durée totale de la succession
Kr	Entre 0.5 et 1.2	Coefficient de retour moyen calculé suivant la méthode INDIGO
Kd	Entre 1 et 1.6	Coefficient de diversité moyen calculé suivant la méthode INDIGO
Kp	Entre 1 et 6	Coefficient de l'effet précédent moyen calculé suivant la méthode INDIGO
Isc	Note de 0 à 10	Multiplication des trois coefficients précédents

utilisées sur une culture soit la diversité des substances utilisées sur l'ensemble de la rotation. Enfin, dans le but de retranscrire la fréquence des perturbations chimiques, je me suis donc intéressé au nombre moyen d'applications annuelles de produits phytosanitaires.

iii) Les ressources en azote

La disponibilité en nutriments du milieu a un impact sur le niveau de production des cultures et le niveau de compétition avec les adventices. Je ne m'intéresse ici qu'à la fertilisation azotée car c'est l'élément qui a l'impact le plus important et le plus direct sur la production et surtout sur la composition en adventices (Pyšek et Lepš, 1991). De plus, c'est le seul aspect de la fertilisation qui a été étudié dans l'ensemble des essais. J'ai donc simplement caractérisé la fertilisation par la dose d'azote apportée et le nombre d'apports réalisés sur la culture afin de caractériser l'intensité et la fréquence de cette perturbation (Tableau 5). Cet indicateur ne prend donc pas en compte l'azote apporté par minéralisation ou par la culture précédente, ni les besoins de la culture ou sa capacité à prélever l'azote de l'air. Cependant, je fais l'hypothèse que cet indicateur permet de retranscrire le niveau d'azote disponible pour les adventices.

C) Construction d'indicateurs de la biodiversité cultivée

i) Objectifs et logiques des indicateurs calculés

L'ensemble des indicateurs a été choisi afin de caractériser les différences que l'on peut avoir entre les successions, en se focalisant sur des mécanismes pouvant intervenir dans la régulation des adventices. Ces mécanismes concernent la diversité des niveaux de compétition vis-à-vis des adventices ou (i) une meilleure valorisation des ressources liée aux complémentarités entre les espèces cultivées, (ii) la diversité des périodes de levée liée à la gamme des périodes de semis, (iii) la compétition pour la lumière de par la couverture du sol. Les indicateurs doivent donner une information sur la diversité de ces mécanismes, mais également sur leur importance relative au sein de la succession. En effet, si une modalité d'un indicateur revient souvent, on aura tendance à sélectionner des adventices adaptées à cette modalité. Enfin, il est difficile d'agréger les différents aspects de la diversification en un seul indicateur, je décide donc de décrire la diversité cultivée par un ensemble d'indicateurs qui seront calculés à l'échelle de la succession.

ii) Modes de calcul des indicateurs

La liste des indicateurs calculés sur les quatre jeux de données ainsi que leur description sont présentées dans le tableau 6.

Un aspect permettant de caractériser simplement la diversité cultivée revient à s'intéresser au nombre d'espèces rencontrées dans la succession (Duelli et Obrist, 2003; Caporali, Mancinelli, et Campiglia, 2003). Je me suis donc intéressé au nombre d'espèces cultivées au cours de la rotation (**NB_ESPECES**). Cette variable tient compte de toutes les espèces, qu'elles soient présentes seules, en association ou en tant que couvert. Cependant, les espèces ont des caractéristiques plus ou moins proches entre elles. Afin de décrire plus précisément la diversité, nous avons décidé de prendre en compte le nombre de familles botaniques cultivées pendant la succession (**NB_FAMILLES**) (Craheix et al., 2011). Nous faisons ici l'hypothèse que les espèces appartenant à la même famille ont des caractéristiques proches et qu'elles sélectionnent des communautés d'adventices semblables. Malgré la mise en place de ces deux indicateurs, certains aspects de la diversification ne sont toujours pas pris en compte. En effet, certaines cultures possèdent des périodes de semis très large, or la période de semis de la culture a un impact sur les communautés d'adventices. Bohan et al. (2011) ont d'ailleurs utilisé le paramètre « période de semis » dans leur caractérisation des cultures afin de déterminer l'impact des rotations sur le stock semencier des adventices. J'ai donc calculé un indicateur décrivant le

Tableau 7 : Liste des indicateurs décrivant les services écosystémiques

Variable	Unité	Description
ABONDANCE_ADV	Nb/m²	Moyenne annuelle de l'abondance en adventices
RICH_SPE_ADV	Nb	Nombre d'espèces d'adventices différentes rencontrées sur l'ensemble de la rotation
INDICE_SHANNON		Indice de Shannon calculé avec la richesse spécifique cumulée et l'abondance moyenne
EQUITABILITE		Equitabilité calculée à partir de l'indice de Shannon précédent et de la richesse spécifique cumulée
RICH_SPE_ADV_moyenne	Nb/an	Moyenne annuelle du nombre d'espèces d'adventices rencontrées
INDICE_SHANNON_moyen		Moyenne des indices de Shannon annuels
EQUITABILITE_moyenne		Moyenne des équitabilités annuelles
RENDEMENT	q/ha	Moyenne annuelle des rendements des plantes d'intérêt
MARGE_MIN	€/ha/an	Chiffre d'affaire minimum moins les coûts de fertilisation, de pesticides et d'interventions
MARGE_MOYENNE	€/ha/an	Chiffre d'affaire moyen moins les coûts de fertilisation, de pesticides et d'interventions
MARGE_MAX	€/ha/an	Chiffre d'affaire maximum moins les coûts de fertilisation, de pesticides et d'interventions
NRJ_PROD	MJ/ha/an	Moyenne du rendement annuel*PCI de la culture

nombre et la diversité des périodes de semis (**NB _SEMIS**), en me basant sur la séparation des périodes de semis en 5 classes proposée dans la méthode INDIGO (Bockstaller et Girardin 2008).

Ces trois indicateurs caractérisent un niveau de diversité cultivée de manière quantitative. Mais ils ne donnent pas d'informations sur la proportion de chacune des modalités. J'ai donc calculé des **coefficients d'équitabilité** (**Equi.Esp**, **Equi.Familles** et **Equi.Semis**) en me basant sur la méthode proposée par Brown et al (2009). Ce coefficient correspond à la moyenne de la différence entre la proportion observée de la modalité i et la proportion attendue à l'équilibre (1/le nombre de modalités). La formule suivante permet d'obtenir un coefficient entre 0 et 1 avec 1 correspondant à une équitabilité de la diversité.

$$\text{Equi.Esp} = 1 - \left(\frac{\sum_i \left| \frac{1}{Nb.Esp} - \frac{Nb\ d'occurences\ de\ l'espèces\ i}{Nb\ total\ d'occurences} \right|}{Nb.Esp * 0.5} \right)$$

Enfin, pour chacun des trois niveaux précédents, j'ai calculé un indicateur de diversité (**Div.Esp**, **Div.Familles** et **Div.Semis**) correspondant à la multiplication de la quantité (**NB_...**) par l'équitabilité (Equi. …).

La présence d'un couvert sur la parcelle (culture, couvert d'inter-cultures…) peut également impacter les communautés d'adventices en limitant leur levée et leur développement par la mise en place d'une compétition vis-à-vis des ressources (Trichard et al., 2013). J'ai donc mis en place un coefficient de couverture du sol (**K.Couv**) traduisant la part de la succession pendant laquelle le sol est couvert par une culture. Pour cela, je fais le rapport entre la durée de couverture du sol (temps entre le semis et la récolte) et la durée totale de la succession.

Enfin, nous avons décidé de conserver des indicateurs provenant de la méthode INDIGO (Bockstaller et Girardin, 2008), notamment l'indicateur de succession culturale **Isc** qui est un indicateur agro-environnemental diagnostiquant la cohérence des systèmes de cultures. J'ai donc calculé pour chacune des successions les 3 indicateurs intermédiaires : effet du précédent (**Kp**), effet du temps de retour (**Kr**) et effet de la diversité (**Kd**) selon la méthode décrite et en faisant une moyenne sur l'ensemble de la succession.

iii) Indicateurs de biens et de services écosystémiques

Nous cherchons ici à rendre compte, d'une part, de l'évolution de la pression en adventices au cours des successions (abondance) : une réduction ou une stagnation de leur nombre rendrait compte d'une régulation biologique des adventices ; et d'autre part du maintien ou non d'une certaine diversité floristique dans les parcelles (richesse spécifique). A partir des relevés d'adventices, j'ai pu calculer plusieurs indicateurs décrivant les services écosystémiques (Tableau 7). J'ai tout d'abord calculé l'abondance ainsi que la richesse spécifique en adventices pour chaque année de la succession. J'ai également calculé d'autres indicateurs caractérisant les communautés d'adventices comme l'indice de Shannon et l'équitabilité (Shannon et Weaver, 1949; Pielou, 1966). J'ai ensuite calculé la valeur moyenne annuelle de ces variables afin d'avoir une seule mesure par succession. Pour la richesse spécifique en adventices, j'ai également calculé le nombre total d'espèces rencontrées au cours de la succession. Cet aspect, que j'ai appelé « richesse spécifique cumulée », nous donne une information différente de la moyenne car il nous indique si on rencontre les mêmes adventices d'une année sur l'autre. Enfin, j'ai également calculé l'indice de Shannon et l'équitabilité à partir de la richesse cumulée en adventices.

En ce qui concerne la production de biens, comme le rendement est très dépendant de la culture, j'ai essayé de calculer des indicateurs qui donneraient des valeurs proches pour des espèces

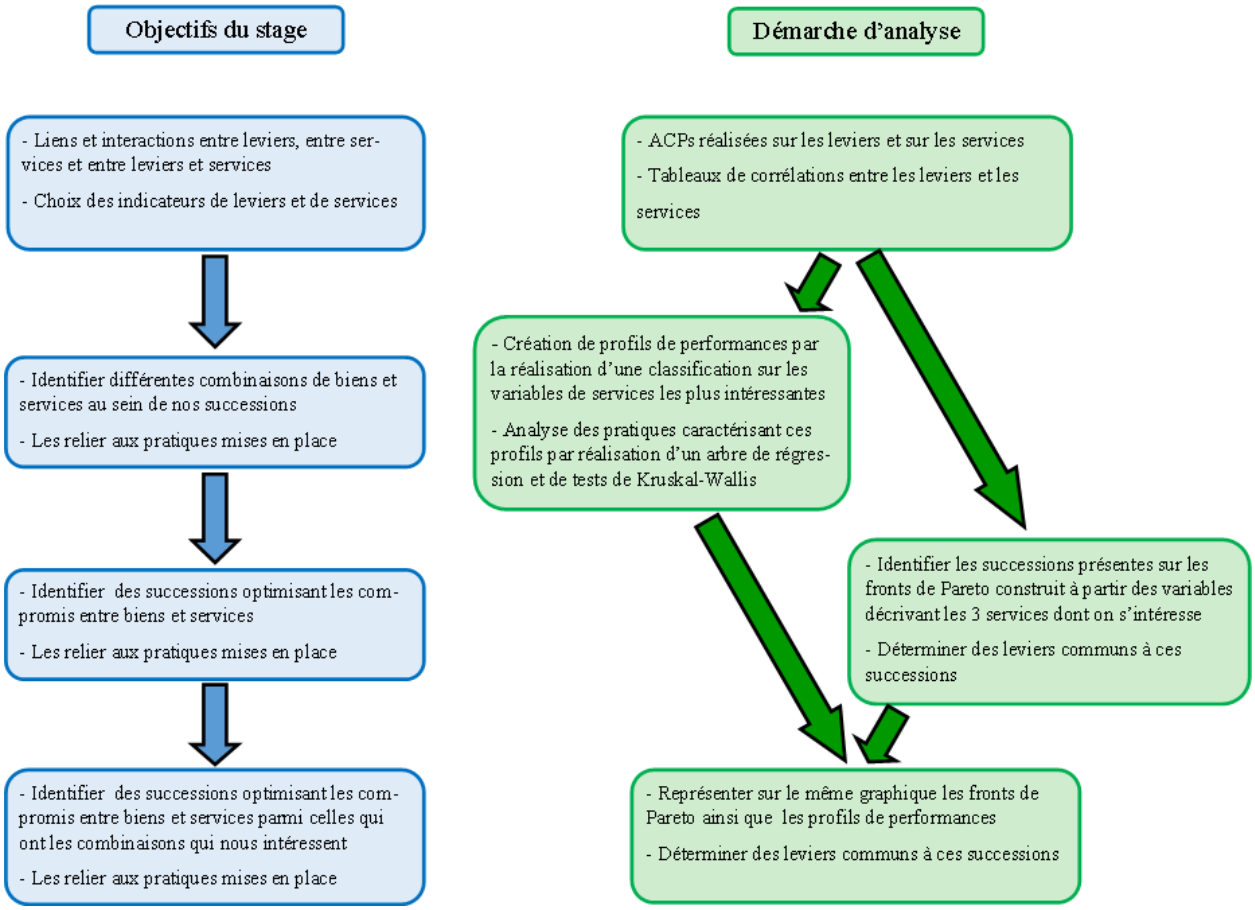


Figure 5 : Schéma de la démarche d'analyse mise en place, en lien avec les objectifs du stage

différentes cultivées dans le même système, mais des différences pour une même espèce cultivée dans des systèmes différents. J'ai tout d'abord calculé l'énergie produite par la culture en multipliant le rendement par son pouvoir calorifique inférieur (PCI). Ceci permet de compenser les faibles rendements des oléagineux qui ont un PCI élevé, mais il reste cependant des disparités entre les céréales et les protéagineux qui ont des PCI proches. Je me suis donc également intéressé à la marge semi-nette en supposant que l'aspect économique devrait réduire les différences entre cultures. J'ai tout d'abord multiplié le rendement de chaque culture par le prix des productions, en distinguant trois scénarios de prix (élevés, moyens et faibles). Les scénarios de prix ont été établis à partir des données temporelles disponibles sur le site de l'AGRESTE (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017). Pour les cultures principales (blé, orge, maïs, colza, pois), j'ai ainsi sélectionné le prix annuel minimum, moyen et maximum entre 2007 et 2016. Pour les cultures de diversification, je me suis basé sur les tableaux de prix utilisés dans le cadre de l'essai SIC (Colnenne-David et Doré, 2015). J'ai ensuite retranché les coûts de fertilisation, de produits phytosanitaires et d'interventions (travail du sol, épandage). Pour le coût de la fertilisation et des interventions, je me suis également servi des données utilisées dans le cadre du projet SIC (Colnenne-David et Doré, 2015), tandis que pour les produits phytosanitaires j'ai utilisé des références fournis par les instituts techniques (Terres Inovia, 2017) ou des sites de vente en ligne (Agrileader, 2017).

D) Analyses statistiques

i) Une démarche de Méta-analyse

L'analyse des 33 successions se fait dans une démarche de méta-analyse, c'est-à-dire qu'on analyse les 4 jeux de données ensemble afin de tester une gamme variée de pratiques et de niveaux de diversité cultivée. La mise en place d'indicateurs des pratiques et de la diversité cultivée permet d'avoir les mêmes variables pour les 4 essais. Cependant un effet « essai » peut être présent au sein des données absolues, car l'effet des pratiques et de la diversité cultivée et les niveaux de services maximums que l'on peut atteindre dépendent des conditions du milieu (du site, de l'année, ...). Par exemple, l'abondance en adventices dépend fortement de l'historique de la parcelle et de son stock semencier. Pour s'affranchir de cet effet, les méta-analyses calculent toujours un effet relatif par rapport à un témoin. Les témoins correspondent aux systèmes les plus courant ou les moins exigeant en termes de réduction d'intrant (tableau 2). Pour cela, dans chaque bloc de chaque essai, j'ai calculé une valeur relative par rapport au témoin, pour l'ensemble des indicateurs de pratiques et de diversité cultivée ainsi que les variables décrivant les services écosystémiques. Elle est calculée de la manière suivante : $x_{ratio} = \frac{(x_{observé} - x_{témoin})}{x_{témoin}}$

Les analyses suivantes seront donc réalisées à la fois sur les données en valeurs absolues et en valeurs relatives. Le premier aspect permet de tester l'effet général des pratiques et des intrants sur les services, le second met en évidence la relation entre la modification des pratiques et la modification des services. La figure 5 présente la démarche d'analyse mise en place en lien avec les objectifs, qui sera détaillée dans les paragraphes suivants. L'ensemble de ces analyses, ont été réalisées à l'aide du logiciel R version 3.3.2 (R Core Team, 2016).

ii) Démarche d'analyse

Relations au sein des variables explicatives et de services et entre les deux types de variables.

La description des pratiques et de la diversité cultivée m'a amené à créer de nombreux indicateurs qui peuvent parfois être assez proches. Pour éviter d'avoir trop de variables redondantes, j'ai déterminé les relations qu'il y a entre elles, afin de ne conserver que celles qui

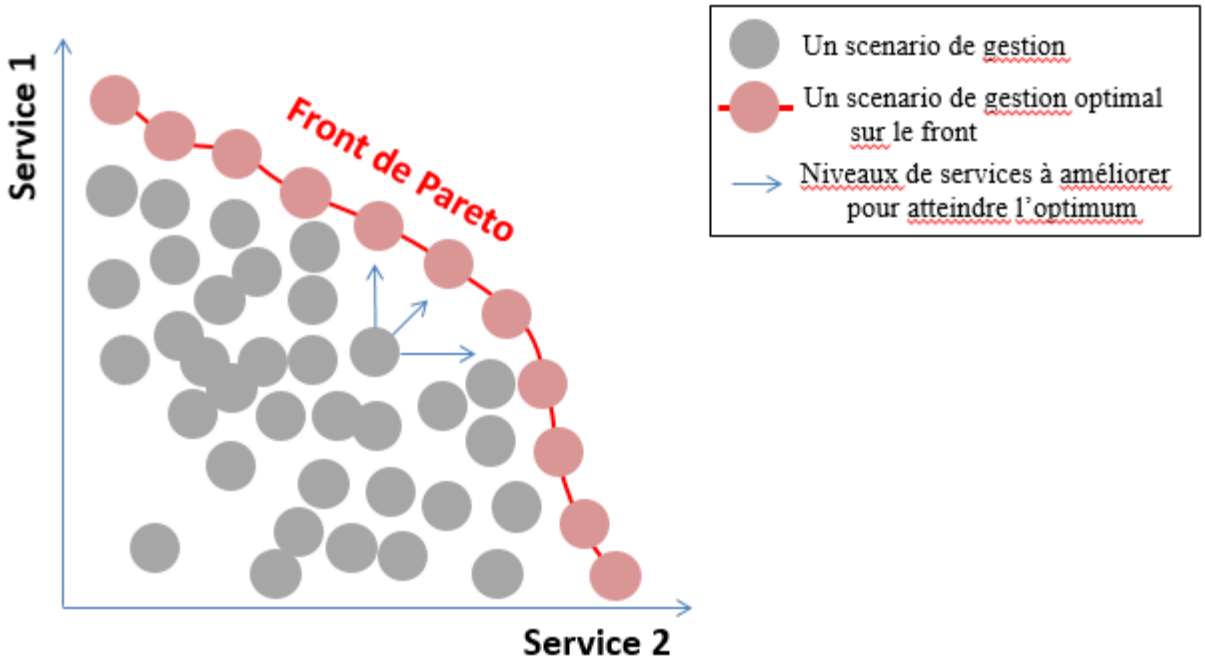


Figure 6 : Représentation simplifiée de la construction d'un front de Pareto sur deux variables de services (d'après Mao et Allinne, 2016)

sont intéressantes. J'ai tout d'abord réalisé des Analyses en Composantes Principales (ACP) sur les leviers (indicateurs de diversité et de pratiques) et sur les variables de services. Cette analyse a deux objectifs : premièrement, elle permet de voir si des variables donnent des informations proches. De même, plusieurs variables peuvent être utilisées pour décrire un même service, l'ACP peut alors permettre de voir les relations entre ces variables et donc confirmer si l'on peut n'en conserver qu'une. Ensuite, elle nous permet d'avoir une première vision des antagonismes entre variables, qui peuvent être dus à des aspects agronomiques ou à des biais liés à la construction des essais. En effet certaines pratiques peuvent n'être présentes que dans un essai, on a alors une confusion entre l'effet de la pratique et de l'essai.

Les relations entre les leviers et les services peuvent également être complétées au travers de la réalisation de tableaux de corrélations. Pour cela, j'ai utilisé la fonction « cor » qui permet de déterminer la corrélation entre les variables deux à deux. Pour déterminer si cette corrélation est significative j'ai utilisé la fonction « corr.test » du package « psych » (Revelle, 2017) avec la méthode de Spearman. Le tableau de corrélations a ensuite été représenté grâce à la fonction « corrplot » du package du même nom (Wei, 2016). Seules les corrélations significatives sont représentées et leurs valeurs sont représentées par un dégradé de couleur allant du rouge (négatives) au bleu (positives).

Analyse des profils de performances

Une méthode permettant d'analyser plus précisément les relations entre les leviers et les services fournis consiste à réaliser une analyse de profils de performances. C'est-à-dire regrouper les successions en fonction de leurs performances en termes de services fournis, puis regarder quels leviers sont spécifiques de chaque profil (Deytieux, 2017). Pour cela on réalise tout d'abord une ACP sur les données des services puis une classification ascendante hiérarchique (CAH) afin de créer des groupes de successions aux services proches. On peut ensuite réaliser un arbre de régression sur les leviers de ces groupes afin de mettre en évidence des sous-groupes en termes de leviers mis en place. On peut ensuite caractériser les profils de performances par des analyses statistiques permettant de mettre en évidence un effet significatif des profils sur la valeur des leviers. Etant donné que j'ai relativement peu de successions et que de nombreux leviers ne sont pas distribués selon une loi normale, j'ai décidé d'utiliser un test de Kruskal-Wallis (package « agricolae », (De Mendiburu, 2014)). Ce test, non paramétrique, s'intéresse aux rangs des individus et permet de mettre en évidence un effet du profil sur le rang moyen. Si l'effet est significatif, des comparaisons deux à deux entre les profils sont réalisées.

Analyse des fronts de Pareto

En parallèle de l'analyse des profils de performances, j'ai réalisé une analyse de fronts de Pareto. Cette analyse complète la précédente car elle ne consiste pas à caractériser les successions ayant le même niveau de services, mais à caractériser celles ayant les meilleurs compromis entre services. Pour les successions sur le front, on cherche ensuite à mettre en évidence s'il n'y a pas un dénominateur commun, en termes de leviers mis en place. Cette analyse sera réalisée sur les services qui nous intéressent principalement, c'est-à-dire la marge minimale, la richesse spécifique cumulée et l'abondance en adventices, en combinant les variables 2 à 2 puis en prenant les 3 en même temps. Pour chaque analyse, on sélectionne les successions qui optimisent les variables choisies. C'est-à-dire que l'on ne peut pas augmenter le niveau d'une variable, sans diminuer le niveau des autres (Figure 6). Cependant, les points extrêmes du front peuvent nous sembler inintéressants car ils ne valorisent bien qu'un seul service. Pour éviter cela, on peut définir des seuils de niveaux de services, mais ils peuvent être difficiles à définir. Dans notre cas, j'ai décidé de me baser sur le niveau des témoins, en imposant que l'on ait une marge qui soit au moins égale à 80% de celle des témoins, que

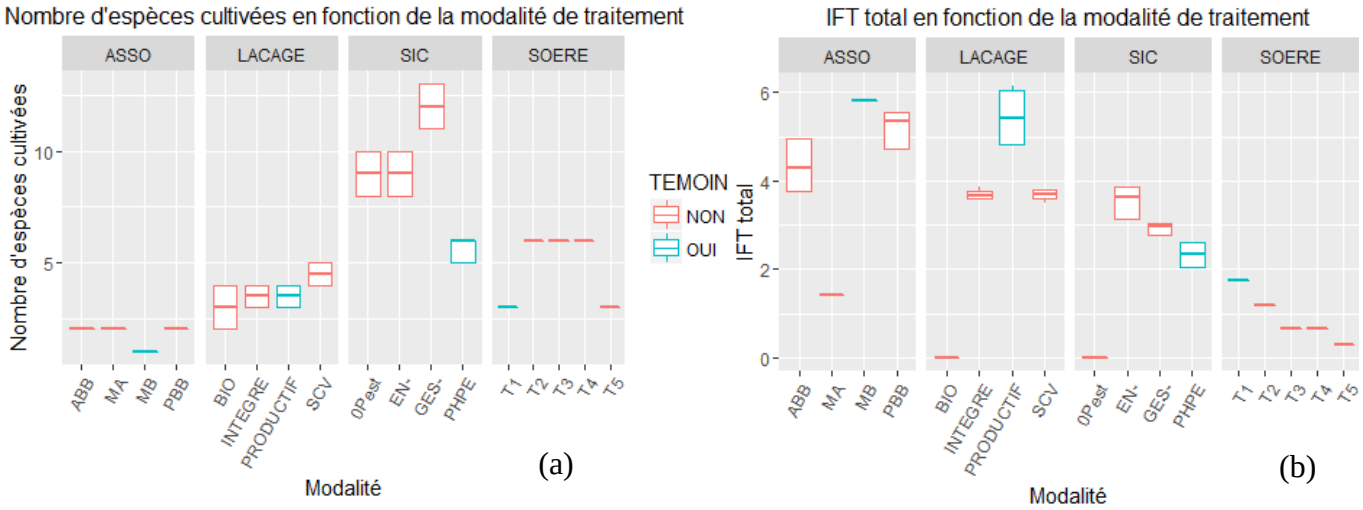


Figure 7 : Nombre d'espèces cultivées (a) et IFT total (b) en fonction des modalités de systèmes de culture

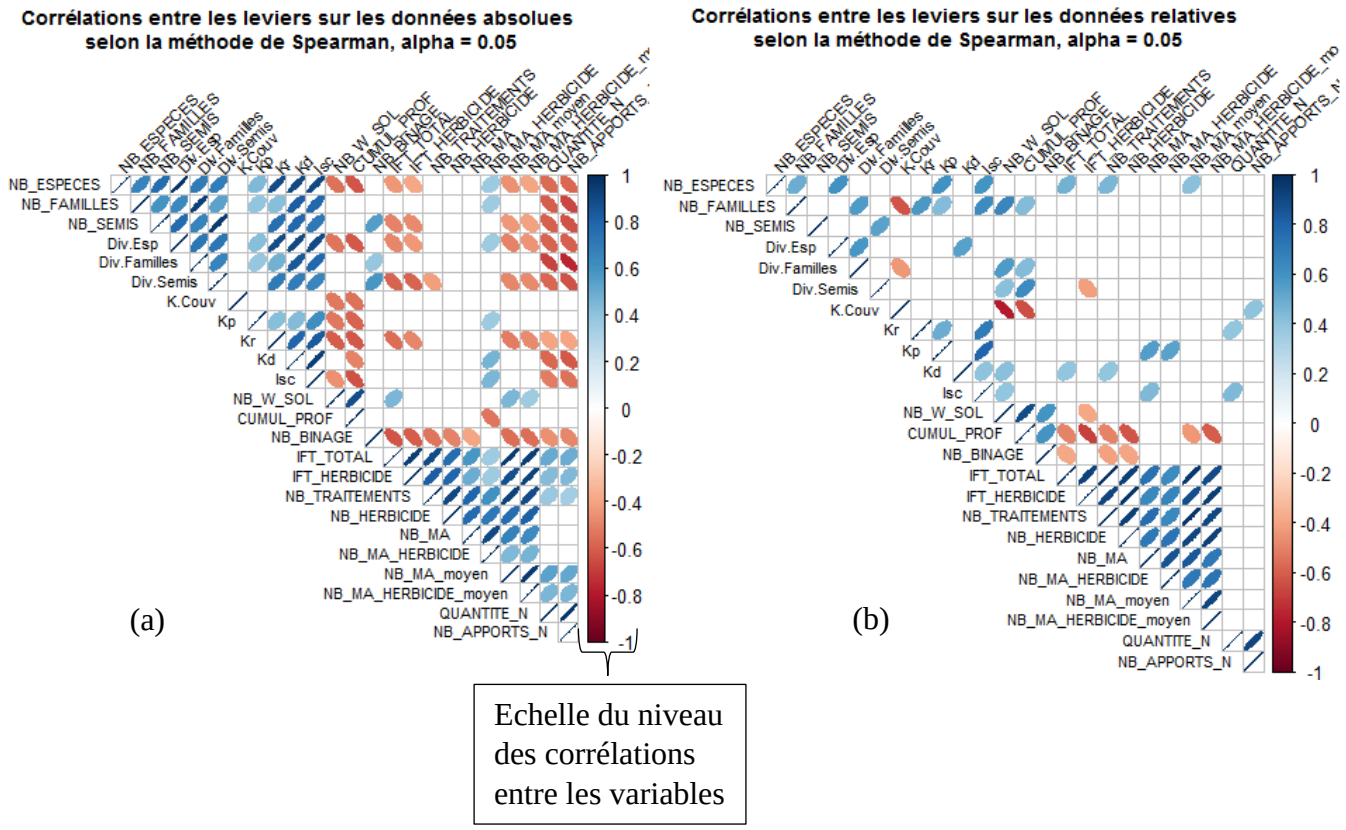


Figure 8 : Tableaux des corrélations entre les leviers sur les données absolues (a) et sur les données relatives (b)

l'abondance en adventices n'augmente pas de plus de 20% et que la richesse en adventices diminue de moins de 10%. Pour l'étude des données absolues, je calcule un seuil pour chaque succession à partir de son témoin relatif afin de ne pas pénaliser les essais aux potentiels les plus faibles.

Après avoir défini les points maximisant les compromis entre services, on les caractérise à partir de nos leviers. Pour chaque point, on va alors comparer, pour tous les leviers, sa valeur à la valeur moyenne. J'ai donc classé les successions de façon croissante pour les leviers de diversité et décroissante pour les leviers de pratiques et j'applique un dégradé de couleur allant du vert au rouge lorsque le rang augmente. Ainsi, on aura en vert des pratiques plutôt agro-écologiques (augmentation de la diversité cultivée et réduction de l'utilisation d'intrants) et en rouge les pratiques plus conventionnelles. On essaie ainsi de voir si on n'observe pas une tendance particulière pour certains leviers.

Coupler les fronts de Pareto et les profils de performances

Les successions présentes sur le front de Pareto, ne font pas forcément partie du même profil de performances. En couplant les deux analyses, on pourra mettre en évidence les leviers permettant à la fois de fournir les services qui nous intéressent tout en maximisant les compromis. Ceci revient à sélectionner les individus qui sont sur le front de Pareto et dans un profil de performances intéressant. Pour cela, je vais représenter les points sur le front de Pareto en fonction du profil auquel ils appartiennent. On pourra alors mettre en évidence certains profils qui favorisent les compromis entre services, ou les meilleures successions au sein de chacun des profils.

IV) Résultats des analyses

A) Description des variables : gammes observées et corrélations entre variables

i) Description des variables « leviers »

La figure 7 nous montrent une variabilité entre les essais et au sein des essais pour le nombre d'espèces cultivées et l'IFT total. On retrouve une variabilité importante pour de nombreux leviers de pratiques et de diversité cultivée (Annexe IV), ce qui est intéressant car on a accès à une gamme assez large de combinaisons des leviers. Cependant, le point faible de ce jeu de données c'est la grande diversité que l'on a entre les témoins. Ce que l'on veut voir, c'est l'effet de la diversité, donc si le témoin est déjà très diversifié, ou avec un niveau d'exigence en réduction d'intrants important, les différences seront plus difficiles à mettre en évidence. On a notamment une opposition entre les témoins des essais SIC et ASSO. Le premier possède une diversité cultivée élevée qui est d'ailleurs supérieure à sa référence régionale (Colnenne-David et Doré, 2015), alors que le témoin « ASSO » est caractérisé par une diversité très faible.

L'ACP réalisée sur l'ensemble des leviers (Annexe V) nous montre qu'il y a une corrélation assez forte entre eux. En effet, que ce soit avec les données absolues ou relatives, les 4 premières dimensions de l'ACP représentent plus de 75 pourcents de la variabilité totale. Vu le nombre de variables décrivant les pratiques et la diversité cultivée, cela veut dire que l'on a des corrélations entre les variables. Sur les données absolues, on a une opposition entre les leviers d'utilisation d'intrants et les leviers de diversité cultivée sur le premier axe, qui représente 40% de la variation. Les essais se focalisent donc soit sur les intrants soit sur la diversité cultivée suivant cet axe. Le tableau de corrélations entre leviers réalisé sur les données absolues (Figure 8-a) confirme cette tendance, avec une corrélation assez forte entre les leviers relatifs à

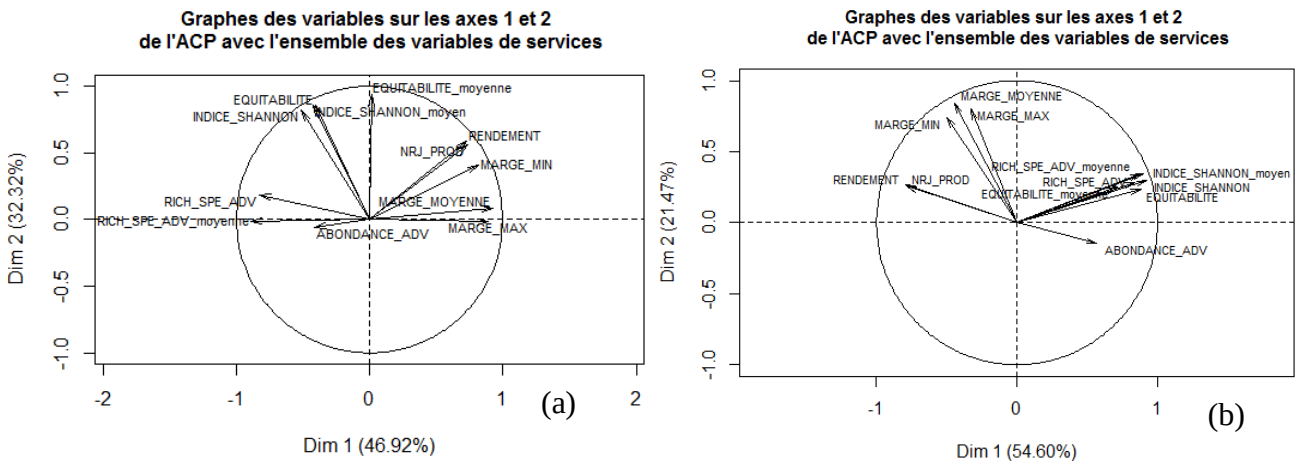


Figure 9 : Cercles des corrélations sur les deux premiers axes de l'ACP réalisée sur les services avec les données en valeurs absolues (a) et relatives (b)

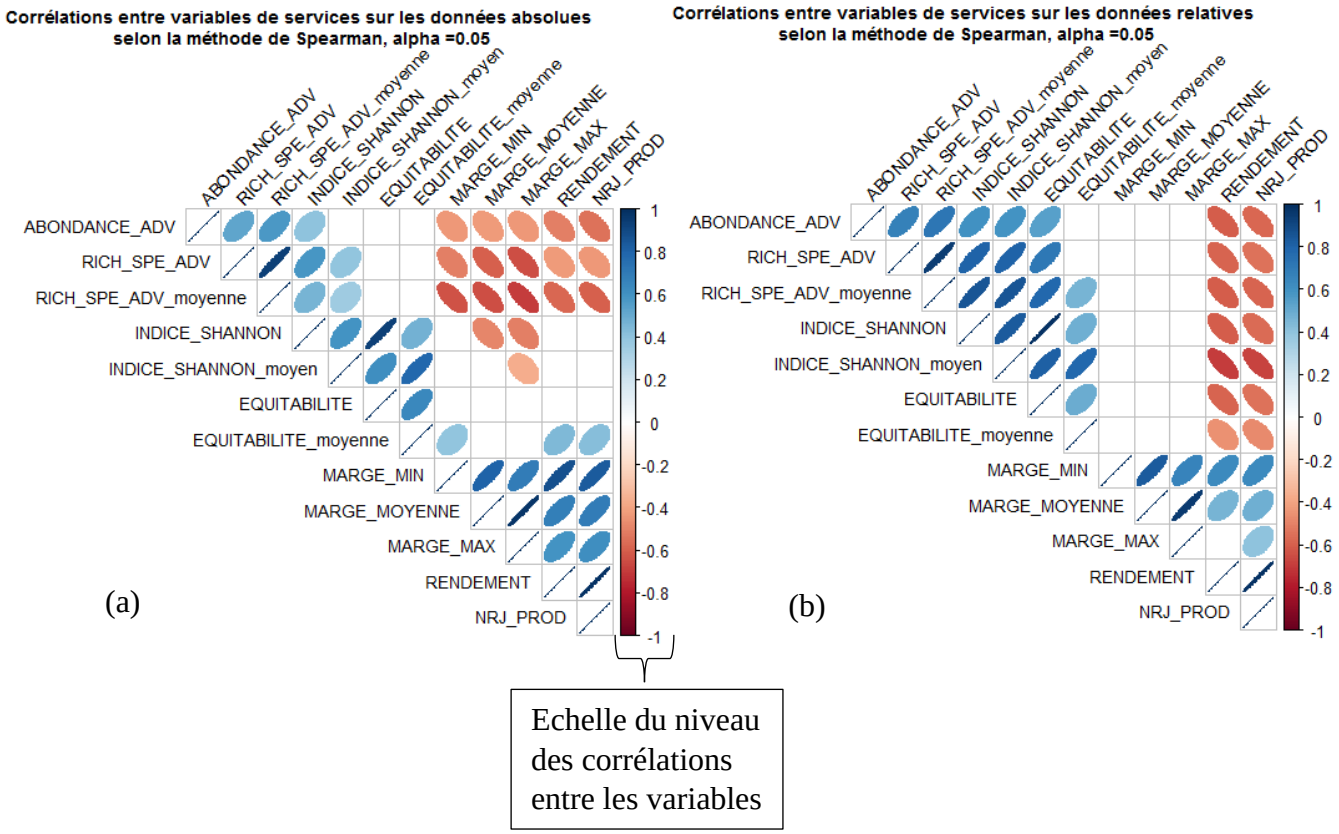


Figure 10 : Tableaux de corrélations entre les services pour les données absolues (a) et les données relatives (b)

l'utilisation d'intrants. Au sein des leviers de diversité cultivée, on a également des corrélations positives assez élevées. Cela montre que les différents leviers de diversification sont souvent mobilisés ensemble et de même pour les leviers intrants. Les seules exceptions concernent le nombre de binage qui est davantage corrélé aux leviers de diversité cultivée et le coefficient de couverture du sol qui est indépendant des autres leviers de diversification.

Cependant, si on s'intéresse aux données relatives (Figure 8-b), on peut voir que les leviers de travail du sol sont corrélés négativement avec l'utilisation de produits phytosanitaires. Ceci peut s'expliquer par le fait que le labour peut substituer les intrants chimiques pour la régulation des adventices. Un aspect plus étonnant est le fait qu'il n'y a plus vraiment d'opposition entre les leviers de diversité cultivée et de pratiques. Cela voudrait dire que l'effet observé en absolu serait dû à un effet « essai », mais qu'au sein des essais on peut avoir une baisse conjointe de la diversité cultivée et de l'utilisation d'intrants. Cette relation peut être due aux successions biologiques basées sur une couverture importante du sol, mais une diversité cultivée faible.

ii) Description des services écosystémiques

L'étude des variables de services en fonction des modalités (Annexe IV), nous montre également une grande variabilité entre les essais et les modalités. Les plus grandes différences s'observent notamment pour l'abondance et la richesse en adventices (de 0.5 à 50 plantes au m² et de 8.44 à 48.75 espèces, respectivement). On a là aussi des différences importantes entre les témoins, particulièrement entre les essais LACAGE et SOERE pour les variables d'abondance et de richesse en adventices et entre LACAGE et ASSO pour les marges. Il faudra donc tenir compte de ces témoins lors de l'analyse des données relatives, car une augmentation relative importante de l'abondance en adventices peut avoir un impact minime sur la valeur absolue si le témoin ne présente quasiment pas d'adventices.

Si on fait l'ACP sur les variables de services, on a plus de 90% de la variabilité qui est représentée sur les 4 premiers axes, à la fois avec les données en valeurs absolues et relatives. On a donc plusieurs de nos variables qui sont corrélées. Sur le graphique des variables (Figure 9-a), on peut notamment voir que les variables se regroupent en 4 groupes sur le plan principal pour l'ACP en valeurs absolues ((i) production, (ii) abondance en adventices, (iii) richesse en adventices et (iv) équitabilité et indice de Shannon des adventices). Le premier axe oppose la richesse en adventices et les variables de production, il semble donc qu'il y ait une opposition entre la production des systèmes et leur niveau de biodiversité associée, sûrement lié au fait que la production se base surtout sur l'utilisation d'intrants dans ces systèmes. En ce qui concerne l'abondance en adventices, elle n'est pas très bien représentée sur le plan principal, ce qui laisse entrevoir qu'il est possible d'augmenter la richesse spécifique en adventices sans augmenter leur abondance. On retrouve cette opposition sur le tableau des corrélations (Figure 10-a) avec des relations négatives entre la richesse en adventices et les variables de production. On retrouve également une faible corrélation positive entre la richesse et l'abondance en adventices et les indices de Shannon et des corrélations assez importantes entre les différentes variables de production.

Si on s'intéresse à l'ACP sur les données relatives (Figure 9-b), on observe cette fois-ci que les services de production et de maintien de la biodiversité associée semblent être indépendants. L'antagonisme qu'on observait sur les données absolues est donc dû à un effet « essai », car au sein des essais, une modification des pratiques pourrait permettre d'augmenter la richesse en adventices sans impacter la marge. Le tableau de corrélations (Figure 10-b) montre qu'il n'y a plus d'antagonismes entre richesse en adventices et marge. Cependant, on peut observer une

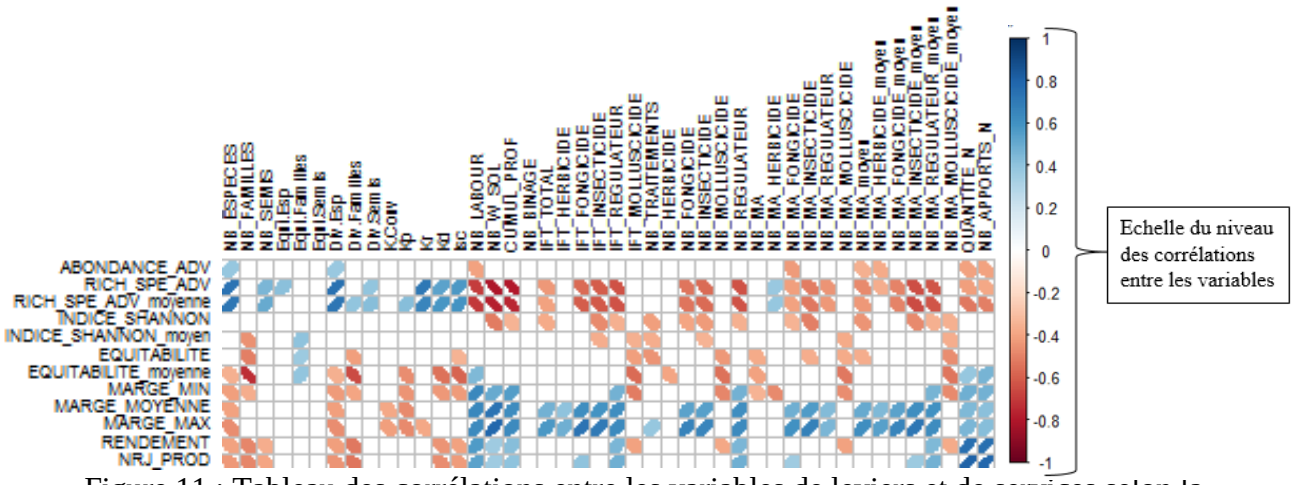
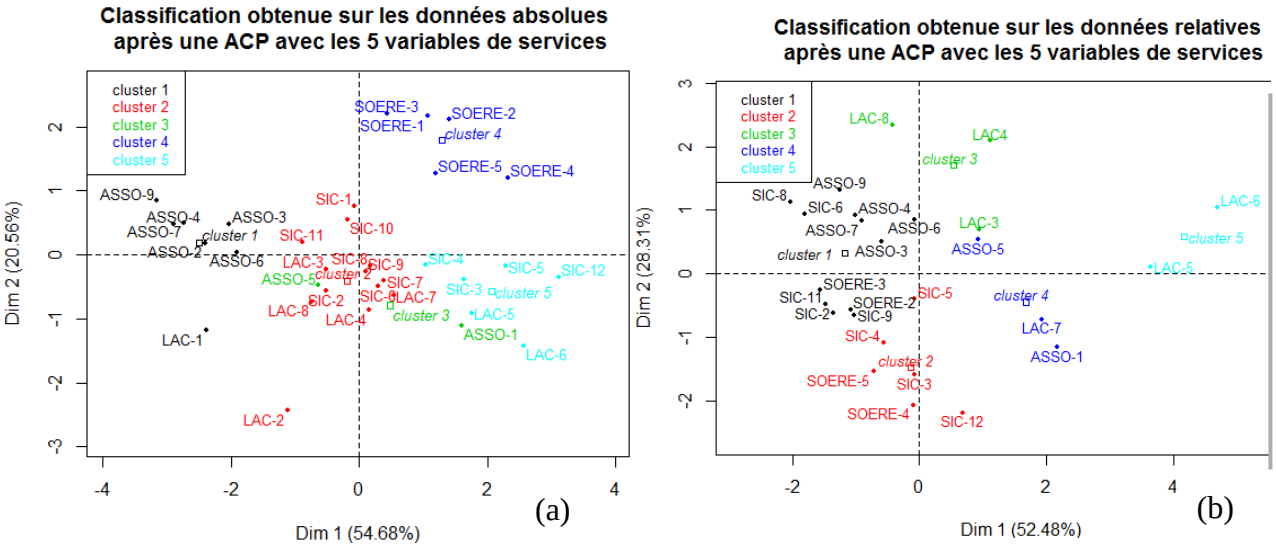


Figure 11 : Tableau des corrélations entre les variables de leviers et de services selon la méthode de Spearman avec un alpha de 0.05, sur les valeurs absolues (a) et relatives (b)



Les groupes obtenus prendront le suffixe « -a »

Les groupes obtenus prendront le suffixe « -r »

Figure 12 : Résultats des classifications obtenues sur les données en valeurs absolues (a) et en valeurs relatives (b)

Tableau 8 : Résultats significatifs de l'analyse descriptive sur les clusters obtenus sur les données absolues, à partir des variables de services et des leviers

Cluster	Services signicativement supérieurs à la moyenne	Services signicativement inférieurs à la moyenne	Leviers signicativement supérieurs à la moyenne	Leviers signicativement inférieurs à la moyenne
1-a	Les marges minimum et moyenne	La richesse en adventices	L'utilisation d'intrants	La diversité cultivée
2-a		L'indice de Shannon	La diversité cultivée et le nombre de binages	L'utilisation de pesticides et d'azote
3-a	L'abondance en adventices		Le travail du sol	La diversité cultivée
4-a	L'indice de Shannon et la richesse en adventices		L'utilisation d'azote	Le travail du sol et l'utilisation de pesticides
5-a	La richesse et l'abondance en adventices	Les marges minimum et moyenne	La diversité cultivée et l'utilisation de pesticides	Le travail du sol et l'utilisation d'azote

corrélation positive entre l'abondance et la richesse spécifique en adventices, ce qui voudrait dire qu'il est difficile d'augmenter leur richesse sans augmenter leur abondance.

iii) Analyse des corrélations entre leviers et services

Si on s'intéresse aux corrélations entre leviers et services sur les données absolues (Figure 11), on observe que la production agricole est corrélée positivement à l'utilisation d'intrants tandis que la richesse en adventices est corrélée positivement à la diversité cultivée et négativement avec les intrants. On retrouve donc ici une opposition dans les pratiques à mettre en place si on veut développer la richesse cultivée ou la production agricole. Sur les données relatives, on observe très peu de corrélations entre les leviers et les services. Ce qui ressort le plus c'est que l'augmentation de la fertilisation est corrélée positivement avec l'augmentation du rendement et négativement avec l'indice de Shannon et que les marges semblent corrélées avec la diversité cultivée (les indicateurs INDIGO). Enfin les indices de Shannon semblent corrélés négativement avec le nombre d'espèces cultivées. On pourrait supposer que l'augmentation de la diversité cultivée permette la présence de certaines espèces rares, ce qui est négatif sur l'équitabilité des adventices.

iv) Quelles variables de leviers et de services retenir pour la suite ?

A partir des résultats précédents, j'ai décidé de ne conserver que 5 variables de services pour la réalisation des profils de performances. On conserve donc l'abondance en adventices en tant qu'indicateur de la régulation des adventices et la richesse spécifique cumulée et l'indice de Shannon en tant qu'indicateurs de la biodiversité associée. Enfin, en ce qui concerne la fonction de production agricole, j'ai décidé de conserver la variable de marge minimale, car c'est la variable qui semble atténuer le plus l'effet culture (Annexe VI). J'ai également décidé de conserver la variable de marge moyenne, car les deux marges ne sont pas totalement corrélées et elle est plus représentative des prix perçus par les agriculteurs. En ce qui concerne les leviers de pratiques, je ne peux pas tous les représenter dans les résultats de mes analyses. Pour l'utilisation de produits phytosanitaires, je décide de ne garder que les variables relatives aux herbicides et aux pesticides en général. En ce qui concerne la fertilisation, je ne me focalise que sur la quantité d'azote apportée et pour la diversité cultivée, je ne m'intéresse pas à l'équitabilité de la diversité cultivée (Equi.Esp, Equi.Familles et Equi.Semis) car elles sont incluses dans les indicateurs de diversité et ont peu d'intérêts seuls.

B) Profils de performances des systèmes étudiés

i) Données en valeurs absolues

La CAH m'a permis d'obtenir 5 profils de performances avec les données absolues (Figure 12-a). Les résultats de l'analyse descriptive de ces groupes (Tableau 8), nous montre que l'on n'a pas de groupes caractérisés par une marge et une richesse en adventices élevée et une abondance faible, ce qui peut s'expliquer par les relations observées entre services. L'arbre de régressions (Annexe VII) nous montre que les groupes sont assez homogènes du point de vue des leviers, il n'y a que la succession LAC-1 du groupe 1-a qui est rassemblée avec le groupe 2-a car elle possède un niveau de diversité cultivée plus important et on a une séparation des successions ASSO-1 et ASSO-5 au sein du groupe 3-a.

J'ai représenté dans le tableau 9, les résultats significatifs du test de Kruskal-Wallis sur les leviers et services et j'ai regroupé les variables en fonction des oppositions que l'on observe entre clusters. On a les oppositions les plus importantes entre les groupes 1-a et 3-a et les groupes 2-a, 4-a et 5-a. Les deux premiers sont ainsi caractérisés par une richesse en adventices

Tableau 9 : Résultats significatifs des tests de Kruskal-Wallis sur la classification en valeurs absolues et regroupement en fonction des oppositions entre clusters

Cluster	1-a	2-a	3-a	4-a	5-a	Cluster	1-a	2-a	3-a	4-a	5-a	Cluster	1-a	2-a	3-a	4-a	5-a
RICH_SPE_ADV	10.7	24.9	18	38.1	39.8	NB_W_SOL	4.55	3.55	4.8	1.22	1.78	IFT_HERBICIDE	3.14	1.07	1.22	0.77	2.32
	c	b	bc	a	a		a	b	a	c	c		a	b	ab	b	a
MARGE_MOYENNE	1032	668	732	552	465	NB_LABOUR	0.96	0.51	1	0.55	0.07	NB_MA_moyen	7.4	3.54	3.4	1.93	4.77
	a	b	ab	b	b		a	b	a	ab	c		a	b	ab	b	ab
NB_ESPECES	2.14	6.38	2	4.8	8.17	CUMUL_PROF	72.5	50.9	78.7	30.2	6.79	NB_MA_HERBICIDE_moyen	4.6	2.21	1.6	1.53	3.58
	b	a	b	ab	a		a	b	a	bc	c		a	b	b	b	ab
NB_SEMIS	2.14	3.77	1.5	2.8	3.33	MARGE_MIN	489	330	339	370	18.1	NB_HERBICIDE	1.75	1.07	0.5	0.78	2.15
	b	a	b	ab	ab		a	bc	abc	ab	c		ab	b	b	b	a
Div.Esp	1.47	5.72	1.57	3.92	7.2	Kd	1.04	1.37	1	1.09	1.4	NB_BINAGE	0	0.34	0	0.04	0
	c	ab	bc	ab	a		b	a	b	b	a		b	a	b	ab	b
Div.Semis	1.4	3.09	1.3	2.25	2.33	Div.Familles	1.33	2.74	1.57	1	2.63	ABONDANCE_ADV	4.75	8.86	50	8.02	22.2
	b	a	b	ab	ab		b	a	ab	b	a		b	b	a	b	a
Kr	0.7	1.05	0.52	1.08	1.07	NB_FAMILLES	2	3.54	2	1	3.67	NB_TRAITEMENTS	3.71	2.12	1.7	0.93	3.4
	b	a	b	a	a		b	a	b	b	a		a	ab	ab	b	ab
Kp	3.33	4.82	1.75	4.9	5	QUANTITE_N	137	62.1	98	141	50.1	INDICE_SHANNON	1.31	1.31	1.82	2.88	1.76
	b	ab	b	ab	a		a	bc	abc	ab	c		b	b	ab	a	ab
Isc	2.85	7.02	0.95	5.56	7.35	IFT_TOTAL	5.07	2.04	2.6	0.92	3.47						
	b	a	b	ab	a		a	b	ab	b	ab						

Opposition de clusters		
1-a et 3-a vs 2-a, 4-a et 5-a	1-a et 5-a vs 2-a et 4-a	1-a, 2-a et 4-a vs 3-a et 5-a
1-a et 4-a vs 2-a et 5-a	1-a, 3-a et 5-a vs 2-a et 4-a	1-a vs 4-a

- Les nombres représentent les valeurs moyennes de chaque cluster

- Pour chaque variable les rangs moyens de deux clusters sont significativement différents s'ils n'ont aucune lettre en commun

Tableau 10 : Résultats significatifs de l'analyse descriptive, à partir des variables de services, des clusters obtenus avec les données relatives

Cluster	Services signicativement supérieurs à la moyenne	Services signicativement inférieurs à la moyenne	Leviers signicativement supérieurs à la moyenne	Leviers signicativement inférieurs à la moyenne
1-r	Les marges minimum et moyenne	La richesse en adventices et l'indice de Shannon	NB_ESPECES, Div.Semis Isc et Kp	
2-r		Les marges minimum et moyenne	NB_ESPECES	Le travail du sol
3-r	L'indice de Shannon et la richesse en adventices			NB_ESPECES, Isc, NB_LABOUR
4-r	L'abondance en adventices		NB_ESPECES, Div.Semis CUMUL_PROF	
5-r	La richesse et l'abondance en adventices et l'Indice de Shannon	La marge minimum		Div.Semis et le travail du sol

ainsi que plusieurs variables de diversité cultivée faibles, mais une marge moyenne et un travail du sol importants (on retrouve une valeur faible de CUMUL_PROF pour le groupe 5-a dans l'arbre de régression). On a également une opposition entre les groupes 1-a et 4-a et les groupes 2-a et 5-a, avec pour les premiers, des valeurs élevées de marge moyenne et de quantité d'azote apportée et faibles pour la diversité de familles (que l'on retrouve dans l'arbre de régression) et Kd. Enfin les groupes 1-a et 5-a se différencient des autres par une utilisation importante de pesticides. Les caractéristiques générales des clusters en termes de leviers mis en place sont résumées dans le tableau 8.

ii) Données relatives

La classification réalisée sur les données relatives (Figure 12-b), m'a également permis d'obtenir 5 profils de performances. Les résultats de l'analyse descriptive de ces groupes (Tableau 10), nous montre qu'il faudrait s'intéresser plus précisément aux successions appartenant aux groupes 3-r et 5-r, même si c'est surtout le groupe 3-r qui semble le plus intéressant car il est caractérisé par une richesse en adventices élevée sans pénaliser les autres services. Ce groupe est composé des essais LACAGE « INTEGRE» et un essai «BIOLOGIQUE». Ils ont des valeurs de variables de sorties qui évoluent dans le bon sens en général, sauf pour l'abondance en adventices, qui peut être multipliée par 12. Ce cluster est caractérisé par une réduction de la quantité d'intrants utilisés (même si ce n'est pas significatif), mais sans augmentation de la diversité cultivée. Le cluster 5-r ne semble favoriser finalement que la richesse en adventices et l'indice de Shannon, les autres aspects étant très pénalisés. Ce groupe est caractérisé par un arrêt du travail du sol, une couverture permanente du sol et une réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires excepté les herbicides. Cependant on n'a pas d'augmentation de la diversité cultivée.

L'arbre de régressions réalisé sur la classification (Annexe VII) nous montre que les groupes sont assez homogènes du point de vue des leviers développés. On a seulement les successions SOERE-4 du groupe 2-r et ASSO-4 du groupe 4-r qui sont regroupées avec le groupe 1-r. Pour la succession SOERE-4, on a notamment une augmentation de la diversité cultivée plus importante que les autres successions du groupe 4-r. Les différences significatives obtenues avec les tests de Kruskal-Wallis (Annexe VIII) nous montre tout d'abord une distinction entre les groupes 1-r et 3-r et les groupes 2-r, 4-r et 5-r, les premiers étant caractérisés par des marges importantes. Les groupes 1-r et 2-r se distinguent du groupe 4-r par une abondance en adventices n'évoluant pas beaucoup, et des groupes 3-r et 5-r par une variation de la richesse en adventices et de l'indice de Shannon faible. On ne retrouve pas de telles divisions avec les leviers (de diversité cultivée et de pratiques), les principales distinctions que l'on peut faire sur ceux-ci sont une diminution du travail du sol chez les groupes 2-r et 5-r par rapport aux 1-r et 4-r et un nombre d'espèces qui n'augmente pas pour le groupe 3-r. Le groupe 4-r se distingue du groupe 5-r par une baisse de la diversité de semis pour ce-dernier. Les caractéristiques générales des clusters en termes de leviers mis en place sont résumées dans le tableau 10.

C) Fronts de Pareto

i) Sur les données en valeurs absolues

Le tableau 11 synthétise les résultats des analyses de fronts de Pareto en tenant compte des seuils définis dans la méthodologie. Pour les 4 analyses, les successions sur le front sont caractérisées par leurs niveaux des variables de services et de leviers. Sur les fronts de Pareto obtenus avec les valeurs absolues, on retrouve les oppositions entre la marge et la richesse en adventices. On n'a pas vraiment de compromis entre la production agricole et la régulation des adventices, car ces dernières entrent en compétition avec les cultures. Ces deux aspects sont

Tableau 11 : Description des résultats des fronts de Pareto réalisés sur les données absolues

Front étudié sur les variables	Successions sur le front	Caractéristiques des services	Caractéristiques des leviers
MARGE_MIN / ABONDANCE_ ADV	ASSO-4	Marge très élevée. Abondance très faible Richesse en adventices assez faible.	Utilisation importante d'intrants et diversité cultivée très faible.
MARGE_MIN / RICH_SPE_ADV	SIC-5, SOERE-2, ASSO-9	Richesse spécifique en adventices moyenne à forte. Abondance moyenne ou marge élevée et abondance faible.	Utilisation moyenne de pesticides et faible en travail du sol et fertilisation et inversement. Utilisation d'intrants élevée et faible diversité cultivée.
ABONDANCE_ ADV / RICH_SPE_ADV	SIC-7, SOERE-1, SOERE-2, ASSO-7 et ASSO-4	Abondance faible à moyenne. Opposition entre marge nette et richesse spécifique	Utilisation de pesticides faible à moyenne avec parfois fertilisation et travail du sol moyen. Diversité cultivée opposée à l'utilisation d'intrants.
ABONDANCE_ ADV / MARGE_MIN / RICH_SPE_ADV	SIC-7, SOERE-1, SOERE-2, ASSO-7 et ASSO-4	Abondance faible à moyenne. Opposition entre marge nette et richesse spécifique	Utilisation de pesticides faible à moyenne avec parfois fertilisation et travail du sol moyen. Diversité cultivée opposée à l'utilisation d'intrants

Tableau 12 : Description des résultats des fronts de Pareto réalisés sur les données relatives

Front étudié	Successions sur le front	Caractéristiques des services	Caractéristiques des leviers
MARGE _MIN / ABONDANCE_ ADV	ASSO-4, LAC-8, SOERE-3	Augmentation de la marge. Baisse de l'abondance en adventices. Richesse en adventices qui augmente ou qui diminue légèrement.	Baisse de l'utilisation d'intrants. Augmentation de la diversité cultivée, mais opposée aux modifications de pratiques. Augmentation du coefficient de retour.
MARGE _MIN / RICH_SPE_ADV	LAC-4 et LAC-8	Marge nette qui augmente. Richesse et abondance en adventices qui augmentent.	Baisse de l'utilisation d'intrants. Stagnation voire chute de la diversité cultivée.
ABONDANCE_ ADV / RICH_SPE_ADV	ASSO-4, LAC-3, LAC-4 et LAC-8	Augmentation de la marge et de la richesse spécifique en adventices. Faible augmentation de l'abondance en adventices.	Stagnation de la diversité cultivée et baisse de l'utilisation d'intrants. Complémentarité entre l'augmentation de la diversité cultivée et la diminution des intrants.
ABONDANCE_ ADV / MARGE _MIN/ RICH_SPE_ADV	LAC-4, LAC-8, ASSO-4, ASSO-9, SOERE-3	Au moins deux services qui évoluent comme on le voudrait de manière importante. Le troisième a une évolution moyenne.	Baisse de l'utilisation de pesticides et du travail du sol. Parfois hausse du binage. Diversité cultivée augmentée ou inchangée. (Sauf LAC-8 où elle est diminuée, mais la couverture du sol est augmentée)

ainsi favorisés par une utilisation importante d'intrants. Par contre, il y a un compromis entre la richesse en adventices et les deux autres services. Pour ces deux compromis, les points sur le front présentent une opposition entre l'utilisation d'intrants en général et la diversité cultivée, cette dernière augmentant lorsque la richesse en adventices augmente. Les meilleurs compromis correspondent donc à un niveau moyen d'intrants et une diversité cultivée moyenne. Dans notre cas il s'agit des succession SOERE-2 et SOERE-3 qui se base sur l'introduction de prairies temporaires et donc la compétition avec les adventices par la couverture du sol. Ce qui nous intéresse le plus, c'est le front sur les 3 variables de services afin de tenir compte des 3 aspects en même temps. On retrouve là aussi l'opposition entre diversité et utilisation d'intrants avec les successions SOERE-1 et 2 et SIC-7 qui semblent les plus intéressantes. Le niveau de diversité moyen, avec certains aspects assez bons comme Kp ou Div.Semis. L'utilisation de pesticides et le nombre de passage de travail du sol y sont assez faibles par rapport aux autres successions, mais le labour et la fertilisation y sont assez élevés.

ii) Sur les données en valeurs relatives

Le tableau 12 décrit les résultats des analyses de fronts de Pareto réalisées sur les données en valeurs relatives en tenant compte des seuils. Sur le front entre la marge et l'abondance en adventices, on a les meilleurs compromis soit en ne modifiant presque pas l'utilisation d'intrants mais en augmentant légèrement la diversité cultivée, soit en diminuant l'utilisation de pesticides mais en augmentant la diversité cultivée, notamment la couverture du sol. Sur le front entre la marge et la richesse spécifique en adventices, on peut remarquer que les meilleurs compromis sont caractérisés par une baisse de l'utilisation d'intrants couplée à une stagnation du niveau de diversité cultivée, voire une baisse (mais augmentation de la couverture du sol). C'est le cas de LAC-4 et LAC-8. Il semble donc possible de réduire l'utilisation d'intrants sans baisse de rendement. Pour le compromis entre la richesse spécifique et l'abondance en adventices, on retrouve les mêmes caractéristiques pour les points sur le front. Si on s'intéresse aux trois services en même temps, on retrouve des successions ayant une baisse de l'utilisation d'intrants et une stagnation voire une augmentation de la diversité cultivée. Cette augmentation peut parfois se résumer à l'augmentation de la couverture du sol. Au sein des essais, on remarque donc que pour avoir les meilleurs compromis en termes d'évolution des services, il faut mettre en place une légère baisse de l'utilisation d'intrants, que ce soit les pesticides ou le travail du sol, couplée à une légère augmentation de la diversité cultivée, notamment la couverture du sol.

D) Confrontation des résultats des profils de performances et des fronts de Pareto

i) Clusters obtenus sur les données absolues :

Les groupes obtenus par classification sont assez homogènes sur les graphiques de Pareto (Figure 13). On retrouve donc bien le fait que les successions aient été regroupées suivant ces trois services. Pour le compromis entre la marge et l'abondance en adventices, on retrouve le cluster 1-a sur le front, caractérisé par une richesse spécifique faible et une utilisation d'intrants élevée. Au sein du groupe, les 2 successions sur le front appartiennent à la modalité PBB. Pour le compromis entre la richesse en adventices et la marge, on retrouve sur le front les groupes 1-a, 4-a et 5-a. On remarque là encore, que la richesse en adventices est élevée lorsque la diversité cultivée l'est aussi, mais que ceci est accompagné d'une marge faible. Pour le graphique de Pareto entre la richesse spécifique et l'abondance en adventices, les successions sur le front appartiennent aux groupes 1-a, 2-a et 4-a. La répartition de ces groupes sur le front nous montre que plus l'utilisation d'intrants est faible, plus le niveau de richesse important. On retrouve les deux leviers permettant les compromis entre richesse et abondance en adventices que sont

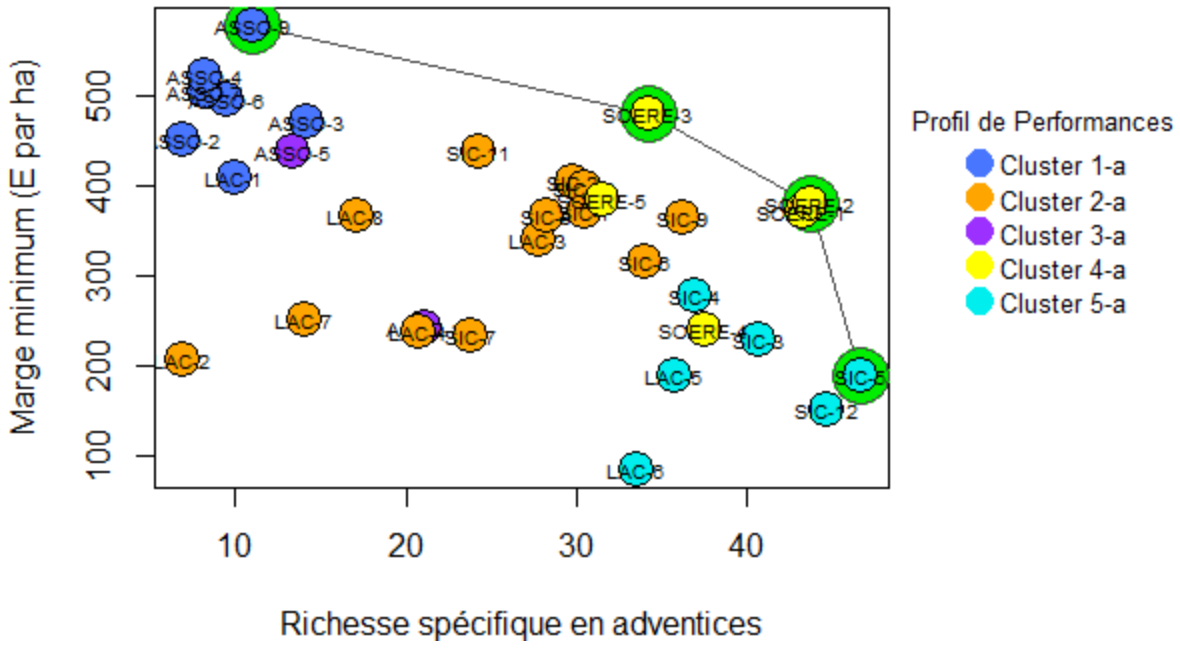


Figure 13 : Front de Pareto entre la marge minimale et la richesse spécifique en adventices sur les données en valeurs absolues

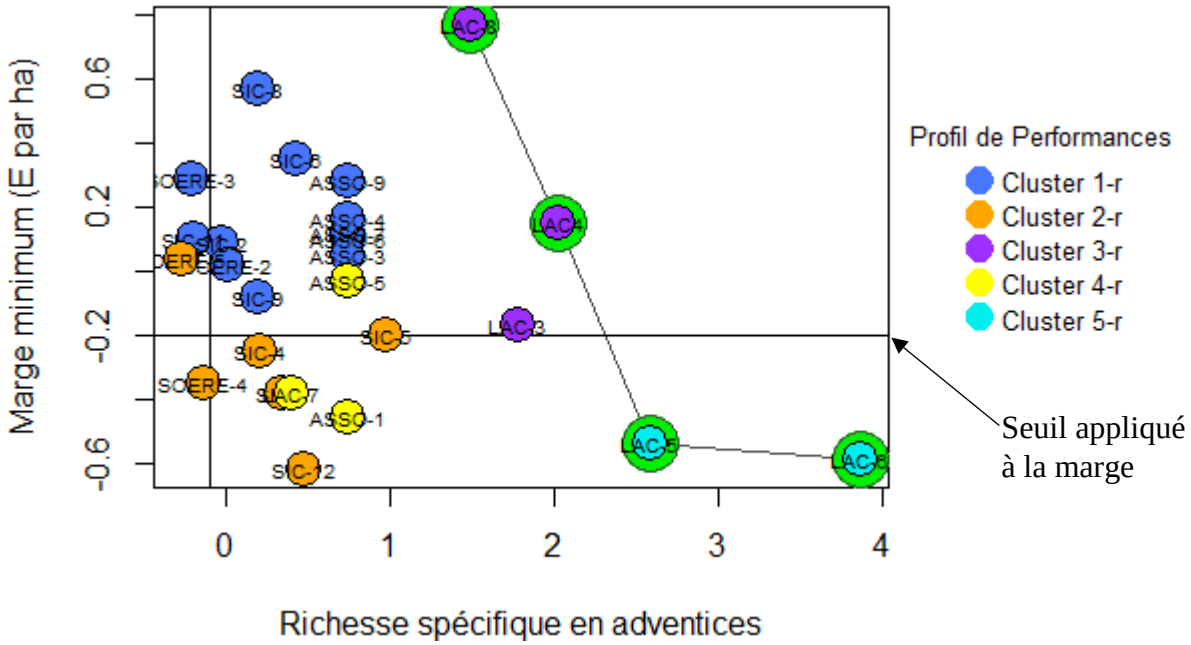


Figure 14 : Front de Pareto entre la marge minimale et la richesse spécifique en adventices sur les données en valeurs relatives

l'augmentation de la diversité cultivée et la réduction des pesticides. Si on s'intéresse aux 3 services en même temps, on retrouve les mêmes groupes que précédemment sur le front.

ii) Clusters obtenus sur les données relatives :

Sur le front de Pareto entre la marge et l'abondance en adventices, on retrouve deux successions du groupe 1-r. Ce groupe est caractérisé par une stagnation, voire une augmentation de l'utilisation d'intrants en agissant soit sur les pesticides, soit sur le travail du sol. Mais ces successions connaissent également une augmentation assez importante de la diversité cultivée. Les successions sur le front se caractérisent au sein du groupe par le fait qu'elles diminuent à la fois l'utilisation de pesticides et le travail du sol. En ce qui concerne le compromis entre la marge et la richesse en adventices (Figure 14), les successions sur le front appartiennent au groupe 3-r qui est caractérisé par une légère baisse de l'utilisation d'intrants, même si la diversité des substances utilisées peut augmenter. Cependant on n'a pas d'évolution voire une baisse de la diversité cultivée dans ce groupe. Les successions sur le front se caractérisent au sein de leur groupe par le fait qu'elles connaissent les baisses d'utilisation d'intrants les plus importantes. Pour le compromis entre richesse spécifique et abondance en adventices, on retrouve sur le front des successions appartenant aux groupes 1-r et 3-r (ce sont les mêmes successions que celles que l'on a rencontrées précédemment). De même, pour le compromis entre les trois services, on retrouve des successions appartenant aux groupes 1-r et 3-r.

V) Discussion des résultats

A) Les profils de performances

i) Sur les données en valeurs absolues

Les résultats de la caractérisation des profils de performances mettent en évidence que les profils ayant le niveau de richesse en adventices les plus important sont ceux ayant un haut niveau de diversité cultivée ou une baisse de l'utilisation de pesticides. En ce qui concerne les marges, on observe qu'elles sont plus importantes lorsqu'on a une utilisation d'intrants importante et une diversité faible. Pour l'abondance en adventices, il est plus difficile de mettre en évidence une tendance, mais elle semble être élevé lorsque la diversité cultivée est élevée. Au sein de nos essais on a donc une corrélation entre l'utilisation d'intrants et la production agricole qui est opposé à une corrélation entre la diversité cultivée et la richesse en adventices. Ainsi, il semble difficile de valoriser ces 2 services en même temps et il faut donc développer des compromis, qui pourrait être obtenue par un compromis entre utilisation d'intrants et diversité cultivée. Ces profils de performances font donc ressortir les antagonismes entre services, en particulier avec les profils 1-a et 5-a où on favorise soit la marge au détriment de la richesse spécifique en adventices, soit l'inverse. On n'a donc aucun profil maximisant les 3 services auxquels on s'intéresse. Il semble donc que si l'on veut augmenter la biodiversité associée des agroécosystèmes, il y a des compromis à faire avec la production de biens agricoles.

Mais, le fait que l'on n'observe pas de maximisation des services peut également être dû à l'effet « essai ». En effet, on observe une gamme limitée de combinaisons de pratiques (33 successions) et les objectifs et les potentiels (de rendements et de richesse en adventices) sont très différents entre les essais. Par exemple, l'essai « ASSO » se focalise surtout sur le service de production, tandis que l'essai « SIC » davantage sur l'aspect environnemental, ce qui entraîne forcément des différences dans les niveaux de services observés. Le fait que l'arbre de

régressions montre une certaine homogénéité des leviers au sein des profils de performances peut être révélateur d'un lien assez fort entre les leviers mis en place et les niveaux des biens et services obtenus, mais il peut également être le reflet de la faible diversité des combinaisons de leviers (de diversité cultivée et de pratiques), ce qui fait qu'on ne rencontre pas deux combinaisons de pratiques différentes produisant les mêmes niveaux de services.

Finalement si l'on souhaite tendre vers un compromis entre abondance de mauvaises herbes, production et richesse spécifique des adventices, il pourrait être obtenue par un compromis entre utilisation d'intrants et la diversité cultivée.

ii) Sur les données en valeurs relatives

Les profils de performances font de nouveau ressortir les antagonismes entre services, en particulier avec les profils 1-r et 5-r où on favorise soit l'augmentation de la marge au détriment de la richesse spécifique en adventices, soit l'inverse. Comme on est sur les valeurs relatives, on ne cherche pas forcément à modifier tous les services, car il peut également être intéressant d'augmenter un service sans modifier les autres. Comme les témoins sont plutôt productifs, on cherche surtout à améliorer la richesse spécifique en adventices. Ainsi, on observe ce type de profil, qui est caractérisé par une baisse de l'utilisation d'intrants, parfois couplée à une baisse de la diversité cultivée mais une couverture du sol plus importante.

Néanmoins, en mobilisant les données relatives et malgré l'opposition entre les services, les leviers associés aux profils de performances obtenus nous donnent une information différente de précédemment. On retrouve, ainsi que des profils ayant une baisse de l'utilisation de pesticides ou du travail du sol connaissent une augmentation de la richesse spécifique et de l'indice de Shannon en adventices. Mais on a aussi des successions qui connaissent une augmentation de la marge et une baisse de la richesse en adventices qui sont caractérisées par une augmentation de la diversité cultivée (**groupe 1-r**). Ceci montre qu'il est donc possible d'augmenter la marge par l'augmentation de la diversité cultivée. En la combinant à une baisse de l'utilisation des intrants, on pourrait lui associer une augmentation de la richesse en adventices. Cependant, le groupe 1-r connait en général une augmentation de l'utilisation d'intrants, même si celle-ci n'a pas été mise en évidence par le test de Kruskal-Wallis.

B) Les fronts de Pareto

i) Sur les données en valeurs absolues

Comme l'on n'observe pas vraiment d'opposition entre la production agricole et la régulation des adventices, on retrouve les mêmes points en mobilisant 2 services ou trois. Ainsi, ce qu'on veut développer se résume à augmenter la diversité des adventices tout en contrôlant leur abondance, c'est-à-dire avoir beaucoup d'espèces, mais peu d'individus de chaque espèce Si on se focalise sur le front réalisé sur les trois services, on ne peut pas vraiment dire que l'on ait des pratiques permettant de favoriser les compromis, on a juste un effet de substitution qui se met en place. Les successions ayant une diversité cultivée très faible ont une dépendance aux intrants très élevée, mais plus la diversité cultivée augmente plus il semble que l'on pourrait se passer des pesticides, mais d'autres pratiques sont utilisées comme le labour ou le binage. En résumé, on retrouve la conclusion des profils de performances : il semble que ce qui permet d'avoir les meilleurs compromis entre les services c'est de mettre en place des compromis entre leviers de diversité cultivée et de pratiques culturales. En effet les points sur le front sont souvent des successions ayant des niveaux de diversité cultivée et d'utilisation d'intrants

moyens. Ce sont donc des systèmes se basant beaucoup sur la compétition avec les adventices et des pratiques moins sélectives que les herbicides permettant de conserver une diversité d'espèces (certaines successions SOERE et SIC-7). Cependant, il faut noter que l'essai « SOERE » est caractérisé par une richesse en adventices importante, mais chez le témoins SOERE-1, ce qui peut faciliter le compromis entre richesse et production.

ii) Sur les données relatives

On retrouve, là aussi, des résultats proches entre le front réalisé sur l'abondance et la richesse en adventices et le front réalisé sur les trois services. Si on se focalise sur le front à trois variables, on observe que les meilleurs compromis sont souvent obtenus pour des successions connaissant soit une baisse importante de l'utilisation de pesticides, soit une faible baisse couplée à une augmentation de la diversité cultivée. Le binage est également souvent développé dans ces successions, il est peut-être efficace sur l'abondance des adventices sans être trop sélectif du point de vue de la richesse spécifique. Les baisses de l'utilisation d'intrants sont également souvent couplées à une augmentation de la couverture du sol, ce qui est dû aux successions intégrant des prairies temporaires. Cependant, les successions ASSO-4 et ASSO-9 qui se retrouvent sur la surface de Pareto avec les 3 services sont des successions peu diversifiées en valeurs absolues car leur témoin l'était très peu. On observe donc une baisse de l'utilisation d'intrants et une augmentation de la diversité cultivée, mais en valeurs absolues, ces leviers sont encore assez intensifs. On retrouve également des successions « ASSO » sur les fronts de Pareto, or comme on n'a pas de valeurs de richesse en adventices pour ces successions, celle-ci correspond à la moyenne de l'ensemble des successions, ce qui constitue un biais, car comme ce sont des essais très intensifs en intrants, on peut supposer qu'en réalité leur richesse en adventices est inférieure à la moyenne. Enfin, on peut remarquer que l'on ne retrouve pas beaucoup de successions de l'essai « SIC » sur les fronts obtenus avec les données relatives. Cela est dû au fait que les témoins de cet essai ont déjà de bons niveaux de services en valeurs absolues, les autres successions ne peuvent donc pas faire beaucoup mieux, c'est pour cela que l'on ne les retrouve pas en valeurs relatives.

Les meilleurs compromis en termes de l'évolution des niveaux de services sont en général obtenus par un compromis dans l'évolution des leviers. Cela voudrait dire qu'il est possible de réduire légèrement la dépendance aux intrants sans pénaliser trop fortement les services de production agricole et de régulation des adventices, permettant une augmentation de leur richesse spécifique. On peut donc utiliser plus raisonnablement les intrants sans pertes économiques et autoriser la présence de quelques adventices. Cependant il faut tenir compte de l'impact de ces adventices sur le stocke semencier et donc sur le maintien des niveaux de services sur le long terme. Il faudrait étudier l'évolution des services sur une durée beaucoup plus long pour tenir compte de cette effet décalé dans le temps.

C) Confrontations des deux analyses.

La représentation des clusters sur les fronts de Pareto confirme le compromis qu'il y a entre l'utilisation d'intrants et le niveau de la diversité cultivée que l'on retrouve chez les successions ayant les meilleurs compromis entre services. On retrouve ce compromis à la fois en valeurs absolues et en valeurs relatives, même si c'est surtout la baisse de l'utilisation d'intrants qui semble importantes en données relatives. Les dispositifs qui y parviennent le mieux sont ceux caractérisés par l'introduction de prairie (SOERE 2 et 3), ou de légumineuses (LAC4, ASSO4), ou en AB mais avec une faible biodiversité cultivée (LAC8). Il semble donc qu'il soit possible

de réduire légèrement la quantité d'intrants utilisée et tout en modifiant légèrement la diversité cultivée sans que cela n'ait trop d'impacts sur le niveau de production et la régulation des adventices, ce qui permet également d'augmenter la diversité de celles-ci. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les témoins qui sont assez intensifs ont des niveaux d'abondance en adventices qui sont très en dessous des seuils de nuisibilité. Il est donc possible d'autoriser une abondance en adventices plus importante, permettant également une richesse plus importante, sans baisse de la marge. Il serait donc possible de réduire l'utilisation d'intrants afin de diminuer les compromis entre services. Ceci est particulièrement intéressant dans les systèmes où l'abondance en adventices est très faible, car dans ce cas la corrélation avec la richesse spécifique peut y être importante. En effet, pour avoir une richesse importante il faut un niveau d'abondance en adventices minimum.

VI) Limites et perspectives d'analyses

A) Les limites des analyses

i) Les limites des indicateurs

Les résultats de nos analyses sont à interpréter avec précautions car, les méthodes de calculs des indicateurs de diversité cultivée peuvent être remises en cause. Par exemple, le niveau « Famille botanique » n'est peut-être pas suffisant pour caractériser la diversité entre les espèces. Il aurait été plus précis de s'intéresser à la diversité des traits fonctionnels, mais cela aurait été beaucoup plus compliqué à l'échelle de la succession. De même la division des périodes de semis n'est pas représentative de la grande diversité que l'on peut avoir entre les espèces. L'erreur fournit par cette classification est d'autant plus grande quand le semis a lieux à la limite entre deux périodes. Enfin, le coefficient K.Couv considère que le sol est couvert du semis à la récolte. Or la culture a besoin de temps avant de lever et d'être vraiment compétitive vis-à-vis des adventices et elle possède une capacité de couverture du sol qui lui est spécifique.

En ce qui concerne les indicateurs d'utilisation d'intrants, là aussi, j'ai choisi des indicateurs simples qui ne représentent donc pas très précisément les différences entre successions. Par exemple, la diversité des matières actives utilisées aurait pu être complétée en prenant en compte également les familles de molécules, car les matières actives peuvent avoir des modes d'actions plus ou moins proches. En ce qui concerne le travail du sol, le nombre de passages de travail du sol présente la limite de ne pas tenir compte de l'espacement entre les perturbations. En effet on peut avoir plusieurs passages en quelques jours, l'effet des passages supplémentaires a donc de moins en moins d'importance.

En ce qui concerne les variables de services, l'abondance en adventices est difficilement interprétable car le seuil de nuisibilité dépend fortement de la culture et des adventices. On ne devrait donc pas comparer des abondances d'espèces entre des parcelles ayant des communautés d'adventices différentes. Comme pour la diversité cultivée, l'impact des communautés d'adventices sur la biodiversité associée, va dépendre du niveau de diversité fonctionnelle entre les adventices. La diversité spécifique des adventices n'est pas représentative de la diversité globale de celles-ci. On aurait dû s'intéresser à la diversité fonctionnelle des adventices en utilisant leurs traits caractéristiques. Enfin, en ce qui concerne la production agricole, la marge tient à la fois compte de ce qui est produit mais également de ce qui a été investi. Elle ne représente pas exactement la fonction de production du système car elle inclut également les pratiques mises en place.

ii) Les limites des méthodes

Du point de vue des méthodes d'analyse, on peut mettre en avant que lorsqu'on travaille en données absolues, on ne prend pas en compte l'effet « essai », donc comme les différents essais ont des potentiels de services différents, on a tendance à regrouper les individus en fonction de l'essai auquel ils appartiennent. Ainsi, on peut passer à côté de pratiques intéressantes si celles-ci sont mises en place dans des milieux au potentiel faible. Travailler sur les données relatives permet de ne plus avoir cet effet « essai » grâce au témoin de chaque essai. Cependant on ne caractérise les successions que par rapport aux variations des services fournis. Or celle-ci dépend du niveau de services du témoin et donc de ses pratiques et de sa diversité cultivée. Elle dépend également du niveau de différence des pratiques par rapport au témoin. Si on ne modifie pas beaucoup les leviers, on ne devrait pas s'attendre à des modifications de services importantes. Dans l'analyse des fronts de Pareto on aura donc tendance à sélectionner les modalités qui ont le plus évolué par rapport au témoin, ce qui revient à sélectionner les modalités ayant les témoins les plus mauvais. En effet, il est plus facile d'augmenter la richesse en adventices lorsqu'elle est très faible chez le témoin, mais ça ne veut pas dire que ce sont les leviers mis en place dans ces successions qui ont le plus d'impact sur la richesse en adventices. Cela explique très bien la faible représentation des essais SIC, dont le témoins SIC7 est déjà très exigent en termes d'objectifs de durabilité.

En ce qui concerne l'analyse de fronts de Pareto, l'un des premiers inconvénients que l'on rencontre est que plus on a de variables, plus on a de points sur le front. Comme on a peu d'individus, on peut rapidement se retrouver avec une grande partie de nos successions se trouvant sur le front. La mise en place de seuils réduit ce nombre de point en enlevant les individus extrêmes. Mais cependant les seuils que j'ai mis en place sont critiquables, car je me base sur les valeurs des témoins et que ceux-ci sont très différents. Je vais là aussi favoriser les essais avec les mauvais témoins et je risque de rater des successions intéressantes si leur témoin l'est déjà. Le service qui pose le plus de problèmes correspond à la régulation des adventices, car les témoins présentent parfois des valeurs d'abondance en adventices très faibles. Donc autoriser une augmentation de 20% revient à ne quasi pas modifier cette abondance et des successions ayant une abondance de 10 plantes au m² ne sont pas conservées si le témoin n'en a que 7 au m². Il faut donc toujours regarder les valeurs absolues et relatives, car une succession intéressante en données relatives peut être très mauvaise en valeurs absolues et inversement. Pour le seuil d'abondance il serait donc plus précis de s'intéresser à un seuil de nuisibilité, mais celui-ci dépend du type d'adventices rencontré.

B) Perspectives d'analyses

D'autres analyses auraient pu être réalisées sur ce type de données. Une manière de mettre en évidence les effets des pratiques et de la diversité, consiste à réaliser une modélisation du niveau de services en fonction des pratiques. En effet, la plupart des leviers ont des valeurs continues, ils peuvent donc théoriquement prendre une infinité de valeurs. Les autres variables prennent en général des valeurs entières, on a donc une infinité de combinaisons de leviers possibles théoriquement. On n'a donc jamais deux successions présentant des différences que pour un seul levier, ce qui fait qu'il est difficile de caractériser l'effet de chacun des leviers. Pour cela, il faudrait réaliser une modélisation des services fournis en fonction des leviers. Au vu du grand nombre de leviers et du peu d'individus, on aurait pu mettre en place une régression de type LASSO qui permet de déterminer parmi l'ensemble des leviers ceux qui ont un impact sur les variables de sortie et déterminer l'importance de ces différents leviers. Ainsi on ne conserve que les leviers qui ont un impact significatif sur les services fournis. L'un des avantages est que pour les données relatives, il tient compte à la fois de la variation des services et des leviers.

Mais cependant, les limites de ce modèle sont le fait que les leviers ne suivent pas tous une loi normale, qu'ils sont souvent corrélés et que les relations ne sont pas forcément linéaires.

Sans changer complètement nos analyses, on pourrait réaliser les analyses précédentes, mais en ne conservant, pour chaque succession, que les mesures des services réalisées sur le blé, car c'est la seule culture que l'on retrouve dans toutes les successions. Ceci pourrait permettre de se passer de l'effet culture sur le niveau de production agricole et l'abondance en adventices. En effet, on n'aurait plus l'effet de la culture sur la compétition avec les adventices, ce qui nous permettrait de nous intéresser seulement à l'effet des pratiques et de la diversité cultivée (historique des cultures précédentes). Cependant on aurait un nombre de mesures qui varierait beaucoup, notamment au sein des essais. De plus, on trouve cela plus intéressant de s'intéresser à l'ensemble des cultures car les agriculteurs ne tiennent pas compte que de la culture de blé, mais de toute la succession. Ne s'intéresser qu'à la culture de blé faciliterait la comparaison, mais cela serait moins représentatif de l'ensemble de la succession.

Conclusion :

A partir de l'hypothèse selon laquelle une augmentation de la diversité cultivée pourrait permettre la fourniture de davantage de services écosystémiques comme la régulation des bioagresseurs ou le maintien de la biodiversité associée sans réduire la production agricole, j'ai réalisé une analyse des liens entre ces services sur quatre jeux de données d'expérimentations testant plusieurs leviers agro-écologiques pour augmenter la durabilité des systèmes de grandes cultures. L'analyse des leviers mis en place au sein des successions étudiées nous montre qu'on a en général un antagonisme entre le niveau de la diversité cultivée et l'utilisation d'intrants. En ce qui concerne le niveau des services obtenus, on observe que l'on a une corrélation positive entre la richesse spécifique et l'abondance en adventices, mais que le niveau de production est plutôt corrélé négativement avec les 2 premiers services. Si on fait le lien avec les pratiques, la richesse semble plus importante dans les successions ayant un niveau de diversité élevée, alors que l'on a une production élevée et une abondance en adventices faible dans les successions utilisant beaucoup d'intrants. Néanmoins, les profils de performances montrent que l'on a des successions qui permettent d'augmenter la richesse en adventices sans diminuer les deux autres services. La caractérisation de ces groupes et des individus sur le front de Pareto montre que pour atteindre ce compromis, on a mis en place une faible réduction de l'utilisation d'intrants sans modifier le niveau de la diversité cultivée, ou en l'augmentant légèrement, en se focalisant parfois sur certains aspects spécifiques comme la couverture du sol. Cependant, les analyses sur les données en valeurs relatives peuvent être biaisées par la grande variabilité que l'on a entre les témoins en termes de leviers mis en place et donc des niveaux des services développés. Cette analyse devrait donc être poursuivie en étudiant une plus grande diversité de successions et en ayant des témoins plus homogènes. Les résultats de ses analyses sont spécifiques des successions disponibles et ne représentent donc pas l'ensemble des combinaisons de pratiques pouvant être mises en place. Mais ils permettent de montrer qu'il est possible d'avoir des compromis entre la production et les services de régulation des adventices et de maintien de la biodiversité associée. Pour cela, il faut augmenter la biodiversité cultivée et réduire l'utilisation d'intrants de manière cohérente. Les pratiques doivent être choisies en fonction des caractéristiques de la biodiversité cultivée.

Bibliographie :

Bockstaller, C., et P. Girardin. 2008. « Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO ® » : UMR Nancy-Université - INRA agronomie et Environnement Nancy-Colmar - BP 20507 68021 Colmar Cedex. 119 p.

Bohan, D. A., S. J. Powers, G. Champion, A. J. Haughton, C. Hawes, G. Squire, J. Cussans, et S. K. Mertens. 2011. « Modelling Rotations: Can Crop Sequences Explain Arable Weed Seedbank Abundance? Crop Sequence Effects on Seedbanks ». *Weed Research*, Vol. 51 : p. 422-432. doi:10.1111/j.1365-3180.2011.00860.x.

Brown, Elissa, Ben Sullender, and Amy Teller. n.d. Assessing Biodiversity. https://apps.carleton.edu/curricular/ocs/winter_china/assets/Biodiversity_Final_Assessment.doc

Caporali, F., R. Mancinelli, et E. Campiglia. 2003. « Indicators of Cropping System Diversity in Organic and Conventional Farms in Central Italy ». *International Journal of Agricultural Sustainability*. p. 67-72. doi:10.3763/ijas.2003.0107.

Chabert, A. 2017. « Expression combinée des services écosystémiques en systèmes de production agricole conventionnels et innovants : étude des déterminants agroécologiques de gestion du sol, des intrants et du paysage ». Institut National Polytechnique de Toulouse. 268 p. Disponible sur : http://oatao.univ-toulouse.fr/17569.

Colnenne-David, C., et T. Doré. 2015. « Designing Innovative Productive Cropping Systems with Quantified and Ambitious Environmental Goals ». *Renewable Agriculture and Food Systems*, Vol. 30 : p. 487-502. doi:10.1017/S1742170514000313.

Craheix, D., F. Angevin, J.-E. Bergez, C. Bockstaller, B. Colomb, L. Guichard, R. Reau, W. Sadok, et T. Doré. 2011. « MASC 2.0, Un outil pour l'analyse de la contribution des systèmes de culture au développement durable. Jeu complet de fiches critères de MASC 2.0. » INRA-AgroParisTech-GIS GC HP2E. 133 p.

Daily, G. 1997. *Nature's Services: Societal Dependence On Natural Ecosystems*. Island Press. 415 p.

Dassou, A. G., et P. Tixier. 2016. « Response of Pest Control by Generalist Predators to Local-Scale Plant Diversity: A Meta-Analysis ». *Ecology and Evolution*, Vol. 6 : p. 1143-53. doi:10.1002/ece3.1917.

De Mendiburu, F. 2014. « Agricolae: statistical procedures for agricultural research ». *R package version*.

Deytieux, V. 2017. « Performances de prototypes de systèmes de grandes cultures : Analyse d'un réseau expérimental ». Université de Bourgogne. 300 p.

Duelli, P., et M. K. Obrist. 2003. « Biodiversity indicators: the choice of values and measures ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Biotic Indicators for Biodiversity and Sustainable Agriculture, Vol. 98 (1–3): p. 87-98. doi:10.1016/S0167-8809(03)00072-0.

Duru, M., O. Therond, G. Martin, R. Martin-Clouaire, M. A. Magne, E. Justes, E. P. Journet, et al. 2015. « How to Implement Biodiversity-Based Agriculture to Enhance Ecosystem Services: A Review ». *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 35 (4): p. 1259-81. doi:10.1007/s13593-015-0306-1.

Emmerson, M., M.B. Morales, J.J. Oñate, P. Batáry, F. Berendse, J. Liira, T. Aavik, et al. 2016. « How Agricultural Intensification Affects Biodiversity and Ecosystem Services ». *Advances in Ecological Research*, Vol. 55 : p. 43-97. Elsevier. doi:10.1016/bs.aecr.2016.08.005.

Gaba, S., G. Fried, E. Kazakou, B. Chauvel, et M. L. Navas. 2014. « Agroecological Weed Control Using a Functional Approach: A Review of Cropping Systems Diversity ». *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 34 : p. 103-19. doi:10.1007/s13593-013-0166-5.

Gaba, S., F. Lescourret, S. Boudsocq, J. Enjalbert, P. Hinsinger, E. P. Journet, M. L. Navas, et al. 2015. « Multiple Cropping Systems as Drivers for Providing Multiple Ecosystem Services: From Concepts to Design ». *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 35 (2) : p. 607-23. doi:10.1007/s13593-014-0272-z.

German, R. N., C. E. Thompson, et T. G. Benton. 2016. « Relationships among Multiple Aspects of Agriculture's Environmental Impact and Productivity: A Meta-Analysis to Guide Sustainable Agriculture: Multiple Measures of Agricultural Sustainability ». *Biological Reviews*, 23 p. doi:10.1111/brv.12251.

Haines-Young, R., et M. Potschin. 2012. « Common international classification of ecosystem services (CICES, Version 4.1) ». *European Environment Agency*, Vol. 33. 17 p. http://test.matth.eu/content/uploads/sites/8/2012/09/CICES-V4_Final_26092012.pdf.

Kremen, C., et A. Miles. 2012. « Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs ». *Ecology and Society*, Vol. 17 (4). 25 p. doi:10.5751/ES-05035-170440.

Le Roux, X., R. Barbault, J. Baudry, F. Burel, I. Doussan, E. Garnier, F. Herzog, et al. 2008. « Agriculture et biodiversité: des synergies à valoriser. Rapport final ». 116 p. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Disponible sur : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01173713/.

Liebman, M., et E. Dyck. 1993. « Crop Rotation and Intercropping Strategies for Weed Management ». *Ecological Applications*, Vol. 3 (1) : p. 92-122. doi:10.2307/1941795.

Liebman, M., C. L. Mohler, et C. P. Staver. 2001. *Ecological Management of Agricultural Weeds*. 545 p. Cambridge University Press. ISBN : 0-511-01764-2 http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=164758.

Malézieux, E., Y. Crozat, C. Dupraz, M. Laurans, D. Makowski, H. Ozier-Lafontaine, B. Rapidel, S. Tourdonnet, et M. Valantin-Morison. 2009. « Mixing Plant Species in Cropping Systems: Concepts, Tools and Models. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 29 (1) : p. 43-62. doi:10.1051/agro:2007057.

Mao, Z., et C. Allinne. 2016. « Using optimization tools for a better reconciliation between multiple ecosystem services (ESs) in croplands and forests ». Présentation du 13 décembre.

Nelson, E. J., G. C. Daily, et others. 2010. « Modelling ecosystem services in terrestrial systems ». *F1000 biology reports*, Vol. 2 (1). 6 p. doi:10.3410/B2-53.

Noss, R. F. 1990. « Indicators for Monitoring Biodiversity: A Hierarchical Approach ». *Conservation Biology*, Vol. 4 (4): p. 355-64. doi:10.1111/j.1523-1739.1990.tb00309.x.

Pielou, Evelyn C. 1966. « The measurement of diversity in different types of biological collections ». *Journal of theoretical biology*, Vol. 13 : p. 131-44. doi : 10.1016/0022-5193(66)90013-0

Pingault, N., E. Pleyber, C. Champeaux, L. Guichard, et B. Omon. 2009. « Produits phytosanitaires et protection intégrée des cultures : l'indicateur de fréquenc de traitement. » *Notes et études socio-économiques*, nº 32 (mars): p. 61-94.

Pyšek, P., et J. Lepš. 1991. « Response of a Weed Community to Nitrogen Fertilization: A Multivariate Analysis ». *Journal of Vegetation Science*, Vol. 2 (2) : p. 237-44. doi:10.2307/3235956.

R Core Team. 2016. *R: A language and environment for statistical computing.* (version 3.2.2). Vienna, Austria.: R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/.

Ratnadass, A., P. Fernandes, J. Avelino, et R. Habib. 2012. « Plant Species Diversity for Sustainable Management of Crop Pests and Diseases in Agroecosystems: A Review ». *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 32 (1) : p. 273-303. doi:10.1007/s13593-011-0022-4.

Revelle, W. 2017. « Package 'psych' ». http://ftp.cs.pu.edu.tw/network/CRAN/web/packages/psych/psych.pdf.

Rusch, A., R. Chaplin-Kramer, M. M. Gardiner, V. Hawro, J. Holland, D. Landis, C. Thies, et al. 2016. « Agricultural Landscape Simplification Reduces Natural Pest Control: A Quantitative Synthesis ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 221 (avril) : p. 198-204. doi:10.1016/j.agee.2016.01.039.

Shannon, Claude E., et Warren Weaver. 1949. « The mathematical theory of communication. Urbana, Ill ». *Univ. Illinois Press* 1: 17.

Shrestha, A., S. Z. Knezevic, R. C. Roy, BR BALL-COELHO, et C. J. Swanton. 2002. « Effect of tillage, cover crop and crop rotation on the composition of weed flora in a sandy soil ». *Weed Research*, Vol. 42 (1) : p. 76–87. doi: 10.1046/j.1365-3180.2002.00264.x

Smith, R. G., K. L. Gross, et G. P. Robertson. 2008. « Effects of Crop Diversity on Agroecosystem Function: Crop Yield Response ». *Ecosystems*, Vol. 11 (3) : p. 355-66. doi:10.1007/s10021-008-9124-5.

Tilman, D., C. L. Lehman, et K. T. Thomson. 1997. « Plant diversity and ecosystem productivity: theoretical considerations ». *Proceedings of the national academy of sciences*, Vol. 94 (5) : p.1857–1861. Copyright : 0027-8424y97y941857-5$2.00y0

Trichard, A., A. Alignier, B. Chauvel, et S. Petit. 2013. « Identification of Weed Community Traits Response to Conservation Agriculture ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 179 (octobre) : p. 179-86. doi:10.1016/j.agee.2013.08.012.

Tscharntke, T., R. Bommarco, Y. Clough, T. O. Crist, D. Kleijn, T. A. Rand, J. M. Tylianakis, S. Nouhuys, et S. Vidal. 2007. « Conservation Biological Control and Enemy Diversity on a Landscape Scale ». *Biological Control*, Vol. 43 (3): p. 294-309. doi:10.1016/j.biocontrol.2007.08.006.

Tscharntke, T., Y. Clough, T. C. Wanger, L. Jackson, I. Motzke, I. Perfecto, J. Vandermeer, et A. Whitbread. 2012. « Global Food Security, Biodiversity Conservation and the Future of Agricultural Intensification ». *Biological Conservation*, Vol. 151 (1) : p. 53-59. doi:10.1016/j.biocon.2012.01.068.

Valantin-Morison, M., L. Guichard, et M. H. Jeuffroy. 2008. « Comment maîtriser la flore adventice des grandes cultures grâce aux éléments de l'itinéraire technique? » *Innovations Agronomiques*, nº 3 : p. 27-41.

Wei, T. 2016. « Package 'corrplot' ». *Statistician*, Vol. 56 : p. 316–324.

Zhang, W., T. H. Ricketts, C. Kremen, K. Carney, et S. M. Swinton. 2007. « Ecosystem services and dis-services to agriculture ». *Ecological Economics*, Special Section - Ecosystem Services and Agriculture Ecosystem Services and Agriculture, Vol. 64 (2) : p. 253-60. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.02.024.

Sitographie :

« Agrileader ». 2017. http://www.agrileader.fr/. Consulté en mai 2017.

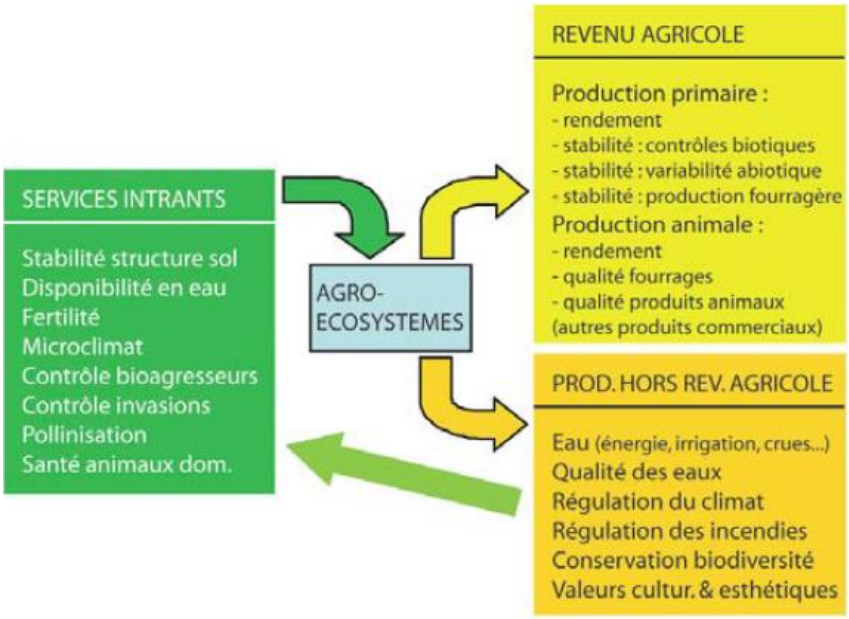
ANSES. 2017. « ephy ». https://ephy.anses.fr/. Consulté en mars 2017.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. 2017. « Agreste - La statistique, l'évaluation et la prospective agricole ». http://agreste.agriculture.gouv.fr/. Consulté en avril 2017.

« Terres Inovia ». 2017. http://www.terresinovia.fr/. Consulté en mai 2017.

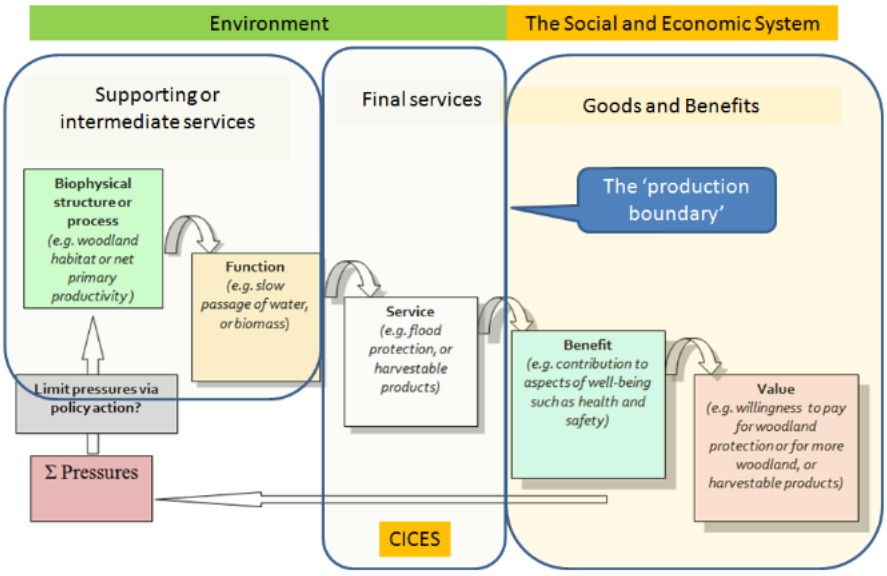
Annexes :

Annexe I: Schéma conceptuel de l'organisation des services des agroécosystèmes modifié d'après Zhang et al. 2007 (Le Roux et al. 2008)



D'autres définitions des services écosystémiques que celle proposée par le CICES ont été développées. Par exemple, Zhang et al. (2007), se sont concentrés davantage sur l'agroécosystème et ont divisé les services écosystémiques en fonction de leurs rôles au sein de celui-ci. Ainsi ils font la distinction entre les services dit « intrants » qui sont utiles à l'agriculture et à la production de biens et les services « sortants » qui sont fournis par les agroécosystèmes. Au sein de ces deux composantes, ils mettent également en opposition les notions de services (pollinisation) ou de dis-services (dégâts de ravageurs) (Chabert 2017). Le Roux s'est également basé sur cette division pour sa définition des services écosystémiques dans le cadre de son expertise sur les synergies entre agriculture et biodiversité. Il différencie ainsi les services écosystémiques en 3 groupes : les services intrants permettant la production agricole, les services « revenu agricole » qui contribuent à la valeur monétaire de la production agricole obtenue dans l'agroécosystème (rendement et qualité) et enfin les services « produits hors revenu agricole » qui correspondent aux autres services (culturels, de régulation…). Ces derniers vont impacter les services intrants, participant indirectement à la production agricole et à la durabilité des services de régulation (Le Roux et al. 2008).

Annexe II: Le modèle en cascade de Haines-Young and Potschin (2012)



Le modèle en cascade de Haines-Young et Potschin (2012) peut nous permettre de visualiser le lien qu'il y a entre le fonctionnement des écosystèmes et la fourniture de services. Leur théorie est que la structure et les processus biophysicochimiques de l'écosystème permettent la mise en place de fonctions écosystémiques comme la photosynthèse ou la minéralisation. Ces fonctions vont ensuite permettre la mise en place de services (production, stockage du carbone) qui pourront à leur tour engendrer un bénéfice pour l'homme. Il est important de noter que les éléments de la structure ou des processus écologiques ne deviennent des services que s'ils sont utilisés (passivement ou activement) par l'homme. De plus, le passage entre les différents maillons de cette chaîne n'est pas unique. En effet, différents processus peuvent intervenir dans la mise en place d'une fonction et différentes fonctions peuvent participer à la mise en place d'un même service. Inversement, une même fonction pourra intervenir dans plusieurs services et un même processus participe à plusieurs fonctions écologiques.

Annexe III: Description plus détaillée des 4 essais utilisés pour cette analyse

i) Jeux de données LACAGE

Cette expérimentation vise à tester la viabilité économique ainsi que les performances environnementales et techniques de systèmes de cultures innovants pouvant s'intégrer dans le contexte agricole du bassin parisien. Elle contient 8 successions répartis en 4 grands systèmes de culture et mises en place sur 2 blocs (Tableau 1-A). J'ai accès à 7 années de mesures sur cet essai, de 2010 à 2016, contenant les rendements de toutes les cultures récoltées. Cependant, je n'ai pas forcément de relevés d'adventices tous les ans sur toutes les parcelles, car elles ont principalement été réalisées sur les parcelles de blé. On a ainsi les 4 modalités suivantes :

- « PRODUCTIVE », dont l'objectif est d'obtenir des rendements élevés sur une succession simple de Pois-Blé-Colza-Blé. Il constitue notre témoin.
- « INTEGRE », où est mis en place la même succession que précédemment mais avec des objectifs de rendement revus à la baisse et l'utilisation de variétés plus rustiques.
- « BIOLOGIQUE », qui se base sur la succession de deux années de culture de luzerne puis de deux années de cultures de blé et le fait de n'utiliser aucun pesticide.
- « SCV », qui s'appuie principalement sur le non travail du sol et la mise en place d'un couvert permanent de luzerne.

Annexe III-A : Description des successions de l'essai LACAGE

Modalité	PRODUCTIF				INTEGRE				SCV				BIOLOGIQUE			
Blocs	B I	BII	B I	BII	B I	BII	B I	BII	B I	BII	B I	BII	B I	BII	B I	BII
Parcelles	18.1	15.2	18.2	15.1	19.1	14.2	19.2	14.1	12.2	17.1	12.1	17.2	13.2	16.1	13.1	16.2
Succession	LAC-2		LAC-1		LAC-4		LAC-3		LAC-6		LAC-5		LAC-8		LAC-7	
2010	Blé		2/3 Pois H 1/3 Pois P		Blé		2/3 Pois H 1/3 Pois P		Blé + Luzerne		Blé + Luzerne		Luzerne		Blé	
2011	Colza		Blé		Colza		Blé		Luzerne		Luzerne		Blé		Orge P + Pois P	
2012	Blé		Colza		Blé		Colza		Luzerne		Avoine P + Luzerne		Blé		Luzerne	
2013	2/3 Pois H 1/3 Pois P		Blé		2/3 Pois H 1/3 Pois P		Blé		Blé + Luzerne		Pois de P + Luzerne		Luzerne		Blé	
2014	Blé		2/3 Pois H 1/3 Pois P		Blé		2/3 Pois H 1/3 Pois P		Pois H + Luzerne		Blé + Luzerne		Luzerne		Blé	
2015	Colza		Blé		Colza mélange		Blé		Blé + Luzerne		Colza + Luzerne		Blé		Luzerne	
2016	Blé		Colza		Blé		Colza		Colza + Luzerne		Blé + Luzerne		Blé		Luzerne	

ii) Jeux de données SIC

L'objectif de cette expérimentation est d'évaluer les performances de systèmes de cultures innovants. Les différentes modalités ont toutes comme objectifs de base d'avoir de bons niveaux de production tout en étant respectueuses de l'environnement. Cet essai regroupe ainsi 12 parcelles réparties en trois blocs contenants chacun 4 modalités de systèmes de culture (Tableau 2-A). Les rotations de ces 4 modalités et les itinéraires techniques mis en place étant différents entre les 3 blocs, je considère qu'il y a 12 successions différentes. J'ai accès à 8 années de mesures sur cet essai, de 2009 à 2016. Cependant les relevés d'adventices sont

réalisés dans le cadre des règles de décision, ils sont donc réalisés à diverses périodes de l'année et il n'y en a pas sur toutes les parcelles tous les ans. On a ainsi les 4 modalités suivantes :

- « PHPE », qui vise un objectif de rendement élevé tout en limitant son impact environnemental (sans contraintes supplémentaires). Il constitue donc notre témoin.
- « 0Pest », correspondant à une rotation sans application de pesticides, et se basant davantage sur la diversification des cultures et l'utilisation de variétés rustiques.
- « EN-», correspondant à une rotation visant une consommation d'énergie réduite de 50% par rapport à la modalité « PHPE ».
- « GES-», qui vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 50% par rapport à la modalité « PHPE ».

Annexe III-B : Description des successions de l'essai SIC

	Succession	SIC-1	SIC-2	SIC-3	SIC-4	SIC-5	SIC-6	SIC-7	SIC-8	SIC-9	SIC-10	SIC-11	SIC-12
Année	Modalité	PHPE	0Pest	EN-	GES-	EN-	GES-	PHPE	0Pest	GES-	PHPE	0Pest	EN-
2009	Culture	Orge P	Maïs	Lin oléa	Blé	Avoine P	Colza	Blé	Féverole P	Maïs	Colza	Blé	Féverole H
	Interculture				Pois fourrager		Pois fourrager	Moutarde blanche				Sarrasin	
2010	Culture	Féverole H	Blé	Blé/Trèfle B	Orge H	Féve H	Blé	Orge P	Blé	Triticale	Blé	Féverole P	Blé
	Interculture		Moutarde blanche	Moutarde blanche	Trèfle A /Avoine		Pois P		Avoine/ Trèfle A	Avoine P	Moutarde blanche		
2011	Culture	Blé	Féverole P	Avoine P	Maïs	Blé	Orge H	Féverole H	Chanvre	Féverole P	Orge P	Blé	Lin oléa
	Interculture						Trèfle A/ Avoine				Sarrasin	Pois	
2012	Culture	Colza	Blé	Féverole H	Triticale	Lin oléa	Maïs	Blé	Triticale	Colza	Féverole H	Chanvre	Blé/Trèfle B
	Interculture		Vesce		Moutarde blanche				Moutarde blanche	Fénugrec			Trèfle B
2013	Culture	Blé	Chanvre	Blé	Féverole P	Blé/Trèfle B	Triticale	Colza	Maïs	Blé	Blé	Triticale	Avoine P
	Interculture	Moutarde blanche				Trèfle A	Avoine/ Lentille fourragère/ Moutarde blanche			Sarrasin		Moutarde /Lentille fourragère	Moutarde blanche
2014	Culture	Orge P	Triticale	Colza /Trèfle A	Colza	Avoine H	Féverole P	Blé	Blé	Orge H	Colza	Maïs	Soja
	Interculture	Moutarde	Moutarde blanche/ Lentille fourragère			Phacélie /Triticale puis Orge		Moutarde Blanche	Phacélie/ Moutarde blanche	Pois fourrager /Trèfle A			
2015	Culture	Féverole H	Mais	Blé	Blé	Soja	Colza	Orge P	Féverole P	Maïs	Blé	Blé	Blé/Pois
	Interculture			Trèfle	Moutarde /Avoine						Moutarde	Phacélie /Moutarde	
2016	Culture	Blé	Blé	Avoine P	Soja	Blé	Blé	Féverole H	Blé	Pois H	Orge P	Féverole P	Colza
	Interculture				Sarrasin /Vesce								Cameline

Légende : P = de printemps Trèfle A = Trèfle d'Alexandrie Lin oléa = Lin oléagineux

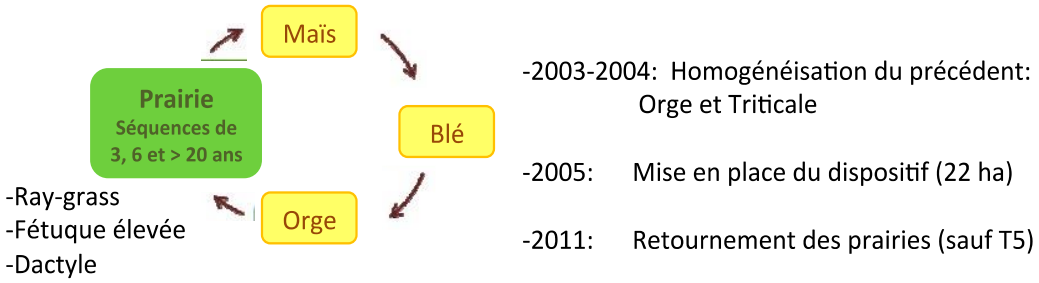
H = d'hiver Trèfle B = Trèfle Blanc

iii) Jeux de données SOERE ACBB

Cet essai se base sur l'effet de l'introduction de prairies temporaires au sein d'une rotation, sur les performances de production et de gestion des adventices. Cette expérimentation contient deux témoins : une rotation assez typique de la région, maïs-blé-orge (T1) et une prairie permanente (mélange de ray-grass anglais, fétuque élevée et dactyle aggloméré) (T5), mais dans notre étude on ne conservera que T1 en tant que témoin. On a ensuite une rotation incluant 3 années de prairie temporaire dans la rotation témoin, maïs-blé-orge-prairie (T2) et 2 rotations incluant 6 années de prairie temporaire (T3 et T4 avec une fertilisation très faible sur prairie) (Tableau 3-A). Cet essai a ainsi été conduit pendant 9 ans, de 2005 à 2013, afin de pouvoir

réaliser une rotation de 6 années de prairie puis les trois années de culture. Pour cet essai, j'ai également accès aux mesures de rendement annuel ainsi qu'a des relevés d'adventices réalisés sur toutes les parcelles tous les ans. Chacune des 5 successions est répétée au sein de 4 blocs.

Annexe III-C : Description des successions de l'expérimentation SOERE ACBB



	ANNEES	A00	A0	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
T1	Culture: M/B/O			C1: M	C2: B	C3: O	C1: M	C2: B	C3: O	C1: M	C2: B	C3: O	C1: M	C2: B	C3: O	C1: M	C2: B	C3: O	C1: M	C2: B	C3: O
T2	Prairie 3ans N + fauche			C1: M	C2: B	C3: O	P 1	P 2	P 3	C1: M	C2: B	C3: O	P 1	P 2	P 3	C1: M	C2: B	C3: O	P 1	P 2	P 3
T3	Prairie 6ans N + fauche			P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	C1: M	C2: B	C3: O	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	C1: M	C2: B	C3: O
T4	Prairie 6ans N- fauche			P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	C1: M	C2: B	C3: O	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15	C1: M	C2: B	C3: O
T5	Prairie 20ans N+ fauche			P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15	P 16	P 17	P 18

iv) Jeux de données ASSO

Cette expérimentation avait pour but de tester l'effet de l'association Pois/Blé sur la production et la gestion des bioagresseurs. Ils ont voulu tester l'effet de l'introduction de l'association dans une rotation en mettant en place des successions simples à base de cultures de pois et de blé avec des associations ou non (Tableau 4-A). Ainsi, cet essai conduit pendant 5 ans (de 2008 à 2012) est composé de 2 monocultures (de blé et de l'association) et de successions incluant du pois, du blé et des associations pois/blé sur la base des rotations suivantes : pois-blé-blé et association-blé-blé. Pour ces 2 rotations, j'ai à chaque fois 3 successions différentes en fonction de la culture présente la première année, ce qui me fait en tout 9 successions différentes. La monoculture de blé sera considérée comme le témoin. Sur cet essai, j'ai accès aux mesures de rendement pour toutes les parcelles et les années, mais en ce qui concerne les autres services, je n'ai que des mesures d'abondance et seulement pour les années 2009 et 2011.

Annexe III-D : Description des successions de l'essai ASSO

Succession	ASSO-2	ASSO-1	ASSO-4	ASSO-3	ASSO-9	ASSO-5	ASSO-7	ASSO-6
Modalité	MB	MA	PBB			ABB		
2008	Blé	Blé/Pois	Blé	Blé	Pois	Blé	Blé	Blé/Pois
2009	Blé	Blé/Pois	Blé	Pois	Blé	Blé	Blé/Pois	Blé
2010	Blé	Blé/Pois	Pois	Blé	Blé	Blé/Pois	Blé	Blé
2011	Blé	Blé/Pois	Blé	Blé	Pois	Blé	Blé	Blé/Pois
2012	Blé	Blé/Pois	Blé	Pois	Blé	Blé	Blé/Pois	Blé

Annexe IV: Diversité des niveaux de leviers développés et des biens et services écosystémiques produits entre les 16 modalités de systèmes de culture

Les lignes coloriées en jaunes correspondent aux témoins de chaque essai. Les valeurs de moyenne et de déviation standard sont calculées sur les successions appartenant à chaque modalité.

Annexe IV-A : Calcul de la moyenne (M) et de la déviation standard (SD) des principaux indicateurs de diversité cultivée en fonction des modalités de successions.

Essai	Modalité	NB_ESPECES		NB_FAMILLES		NB_SEMIS		Div.Esp		Div.Familles		Div.Semis		K.Couv		Isc	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
SIC	PHPE	5.67	0.49	3.67	0.98	4	0	5.13	0.39	2.71	0.52	3.5	0.00	0.82	0.02	7.05	0.27
	0Pest	9	0.85	5	0.85	4.33	0.49	8.23	0.94	3.94	0.69	3.7	0.3	0.82	0.03	8.45	0.03
	GES-	12	0.85	3.67	0.49	4	0.85	11.45	0.9	2.78	0.23	3.03	0.9	0.93	0.02	8.93	0.16
	EN-	9	0.85	4	0	3.67	0.98	8.19	0.87	2.93	0.29	2.76	0.99	0.85	0.03	7.13	0.35
LACAGE	PRODUCTIF	3.5	0.52	3	0	3	0	2.78	0.75	2.28	0.23	2.34	0.29	0.84	0.01	6.08	0.33
	INTEGRE	3.5	0.52	3	0	3	0	2.78	0.75	2.28	0.23	2.34	0.29	0.84	0.02	6.08	0.33
	SCV	4.5	0.52	3	0	2.5	0.52	3.1	0.44	1.99	0.02	1.36	0.71	1	0	6.91	0.66
	BIOLOGIQUE	3	1.03	2	0	3.5	0.52	2.36	0.67	1.86	0.15	2.9	0.44	0.89	0.03	4.5	0.07
SOERE	T1	3	0	1	0	3	0	3	0	1.00	0	2.11	0	0.65	0	5.2	0.0
	T2	6	0	1	0	4	0	6	0	1.00	0	3.14	0	0.83	0	5.4	0.0
	T3	6	0	1	0	3	0	4	0	1.00	0	2.5	0	0.9	0	5.6	0.0
	T4	6	0	1	0	3	0	4	0	1.00	0	2.5	0	0.9	0	5.6	0.0
	T5	3	0	1	0	1	0	3	0	1.00	0	1	0	0.96	0	6	0.0
ASSO	MB	1	0	1	0	2	0	1	0	1.00	0	0.8	0	0.85	0	0.5	0.0
	MA	2	0	2	0	1	0	2	0	2.00	0	1	0	0.81	0	0.5	0.0
	ABB	2	0	2	0	2	0	0.98	0.24	0.98	0.24	1.33	0.4	0.84	0.01	1.4	0.0
	PBB	2	0	2	0	2	0	1.33	0.4	1.33	0.4	1.33	0.4	0.83	0.01	3.43	0.0
	Témoin																

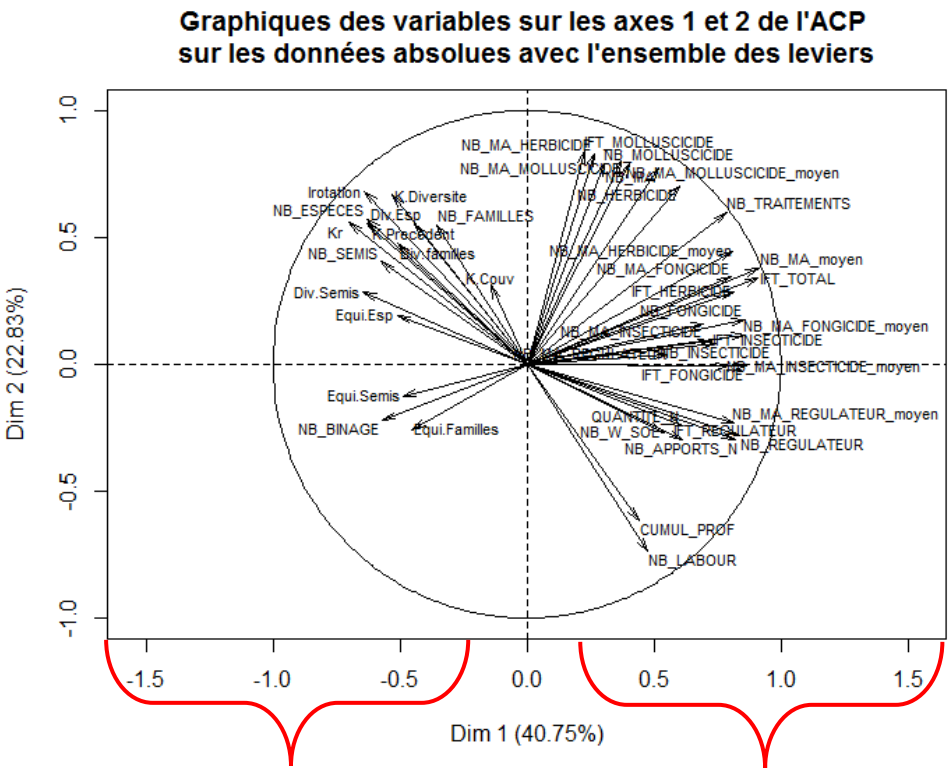
Annexe IV-B : Calcul de la moyenne (M) et de la déviation standard (SD) des principaux indicateurs des pratiques culturales en fonction des modalités de successions.

Essai	Modalité	NB_W_SOL		NB_BINAGE		IFT_TOTAL		IFT_HERBICIDE		NB_TRAITEMENTS		NB_HERBICIDE		NB_MA		NB_MA_HERBICIDE		QUANTITE_N	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
SIC	PHPE	3.5	0.21	0.04	0.06	2.33	0.24	1.37	0.12	2.29	0.16	1.33	0.12	24.33	0.98	16.33	0.98	60	1.07
	0Pest	4.04	0.37	1.17	0.16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37.23	12.65
	GES-	2.54	0.06	0.04	0.06	2.93	0.12	1.82	0.07	3	0.28	1.75	0.18	25.67	2.15	17.67	1.3	57.5	13.31
	EN-	1.96	0.06	0	0	3.55	0.32	2.36	0.15	3.29	0.22	2.13	0	21	3.07	15.33	2.15	28.75	6.66
LACAGE	PRODUCTIF	4.32	0.3	0	0	5.45	0.66	2.21	0.23	5.57	0.59	2.15	0.29	26.5	1.71	13.75	1.34	149.07	16.01
	INTEGRE	4	0.13	0.07	0.07	3.70	0.11	1.9	0.02	4.07	0.07	1.93	0.07	21	3.18	13.25	3.89	111.79	15.13
	SCV	1.14	0	0	0	3.68	0.13	2.52	0.19	3.93	0.07	2.43	0	31.5	5.68	21.5	5.68	84.64	4.09
	BIOLOGIQUE	2.93	0.52	0.29	0.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOERE	T1	2.33	0	0.11	0	1.76	0	1.43	0	1.78	0	1.44	0	16	0	13	0	106.33	0
	T2	1.78	0	0.11	0	1.19	0	0.92	0	1.33	0	1.11	0	13	0	10	0	153.11	0
	T3	0.89	0	0	0	0.67	0	0.59	0	0.67	0	0.56	0	14	0	11	0	178.44	0
	T4	0.89	0	0	0	0.67	0	0.59	0	0.67	0	0.56	0	14	0	11	0	48.44	0
	T5	0.22	0	0	0	0.31	0	0.31	0	0.22	0	0.22	0	6	0	6	0	217.78	0
ASSO	MB	4.6	0	0	0	5.81	0	4.01	0	3.6	0	1.8	0	16	0	7	0	166	0
	MA	4.8	0	0	0	1.42	0	0	0	1.2	0	0	0	5	0	0	0	60	0
	ABB	4.67	0.1	0	0	4.35	0.51	2.67	0.49	2.8	0.46	1.2	0.3	15	1.5	7	0	147.33	11.53
	PBB	4.67	0.1	0	0	5.21	0.36	3.47	0.17	3.73	0.44	2	0.17	18.33	2	10.33	1.8	118.67	14.53
	Témoin																		

Annexe IV-C : Calcul de la moyenne (M) et de la déviation standard (SD) des principaux indicateurs des biens et services écosystémiques en fonction des modalités de successions.

Essai	Modalité	MARGE_MIN		MARGE_MOYENNE		ABONDANCE_ADV		RENDEMENT		RICH_SPE_ADV		INDICE_SHANNON	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
SIC	PHPE	333.51	75.36	732.76	107.91	9.14	6.01	48.63	3.7	30.33	3.7	1.8	0.34
	0Pest	402.91	30.63	677.44	31.65	11.02	6.65	53	2.43	29.25	3.39	1.2	0.37
	GES-	318.32	36.76	663.24	42.14	15.26	4.3	47.56	1.22	38.08	3	1.31	0.28
	EN-	189.01	33.2	458.00	48.19	23.19	8.67	36.52	3.88	46	3.33	1.84	0.32
LACAGE	PRODUCTIF	307.01	105	776.52	129.26	0.51	0.24	56.65	3.99	8.44	2.66	0.3	0.3
	INTEGRE	288.41	68.12	692.37	96.18	5.92	2.83	49.2	4.24	24.25	3.82	1.29	0.27
	SCV	136.17	101.02	402.67	146.78	23.25	5.76	33.36	5.54	34.63	2.42	1.6	0.18
	BIOLOGIQUE	308.28	59.98	519.44	82.84	6.69	4.82	38.18	3.05	15.56	2.48	1.42	0.49
SOERE	T1	370.15	17.73	752.41	25.54	8.85	0.77	56.44	1.26	48.75	5.12	2.95	0.16
	T2	379.09	24.52	622.18	32.14	9.92	1.37	68.96	2.17	48.25	2.63	2.98	0.02
	T3	478.63	23.04	621.06	22.56	6.07	1.09	81.18	2.35	38.75	2.99	2.83	0.17
	T4	238.94	30.17	379.24	37.05	8.98	3.25	43.87	2.55	41.75	3.3	3	0.2
	T5	383.17	40.71	383.17	40.71	6.27	1.81	80.23	4.07	35.75	9.54	2.61	0.34
ASSO	MB	449.75	101.06	1008.75	154.58	NA	NA	74.64	7.15	NA	NA	NA	NA
	MA	242.06	27.52	538.01	43.06	50	0	39.71	2.07	NA	NA	NA	NA
	ABB	478.67	66.59	1008.02	108.01	NA	NA	70.79	5.82	NA	NA	NA	NA
	PBB	522.5	66.78	1072.92	104.92	NA	NA	68.64	6.16	NA	NA	NA	NA
	Témoin												

Annexe V: Cercle des corrélations de l'ACP réalisée sur l'ensemble des leviers de pratiques et de diversité cultivée en valeurs absolues

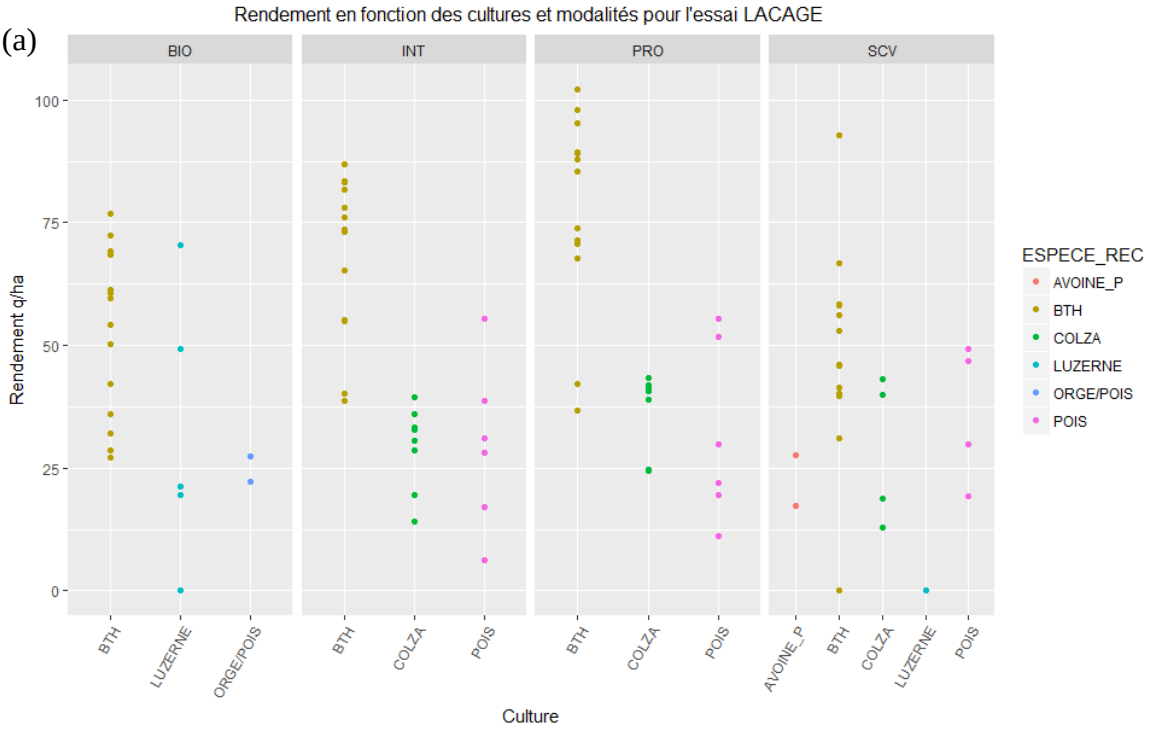


Indicateurs de la diversité cultivée

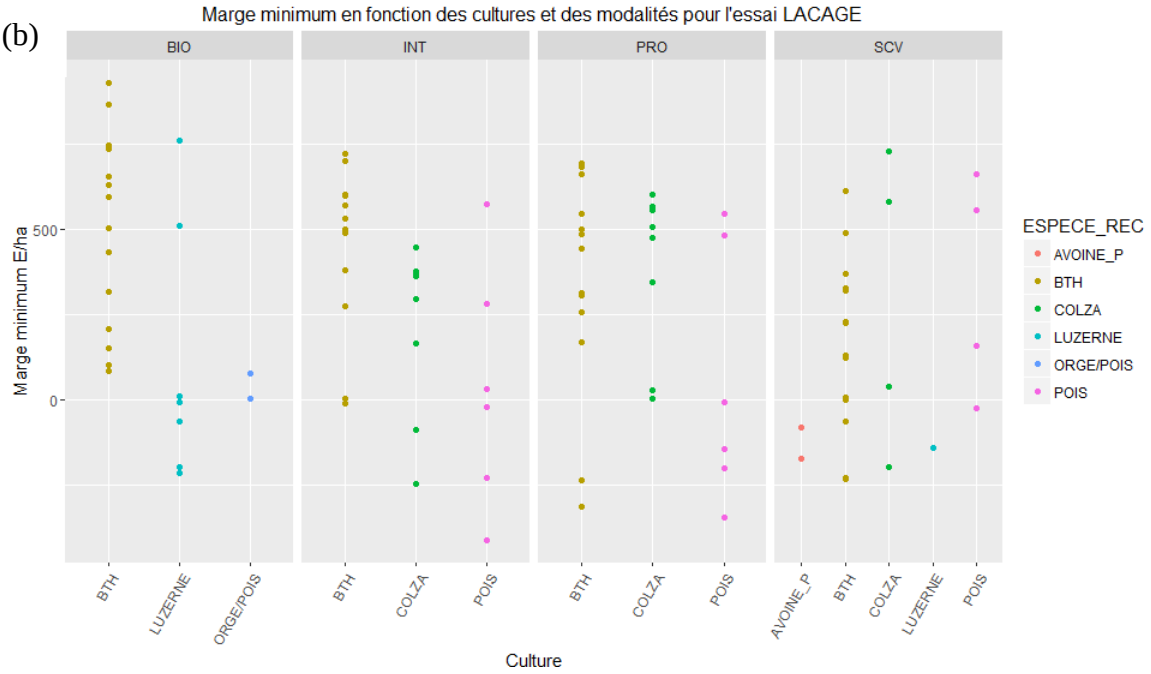
Indicateurs des pratiques culturales

Annexe VI: Représentation des rendements (a) et de la marge minimum (b) par culture en fonction des modalités de système pour l'essai LACAGE.

(a)



(b)



Ces graphiques représentent les rendements et marges minimums obtenus pour chaque année pour chacune des successions de l'essais LACAGE. Les valeurs ont ensuite été classées par modalité et en fonction de la culture présente lors de chaque mesure. Sur les résultats de l'essai LACAGE, on peut ainsi voir que la marge minimum semble réduire l'écart que l'on observe entre le blé et les autres cultures par rapport aux mesures de rendement, notamment pour les modalités « PRODUCTIF » et « INTENSIF ».

Légende :

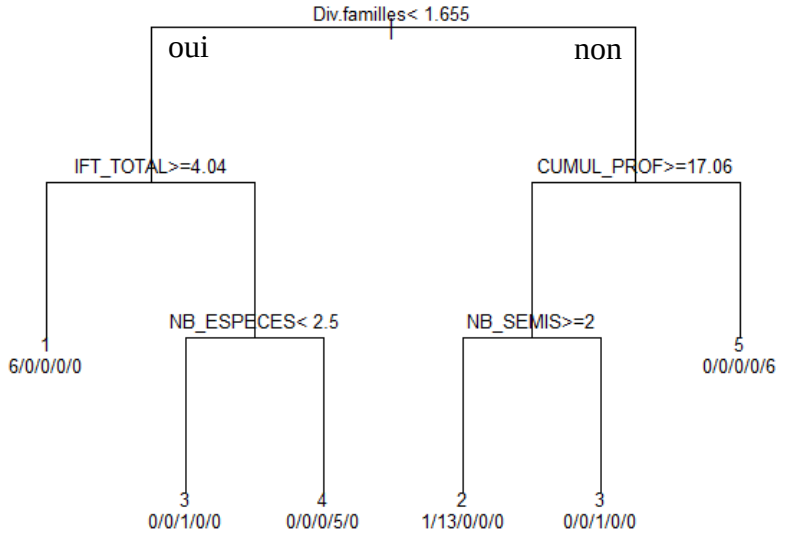
PRO =PRODUCTIF

INT = INTEGRE

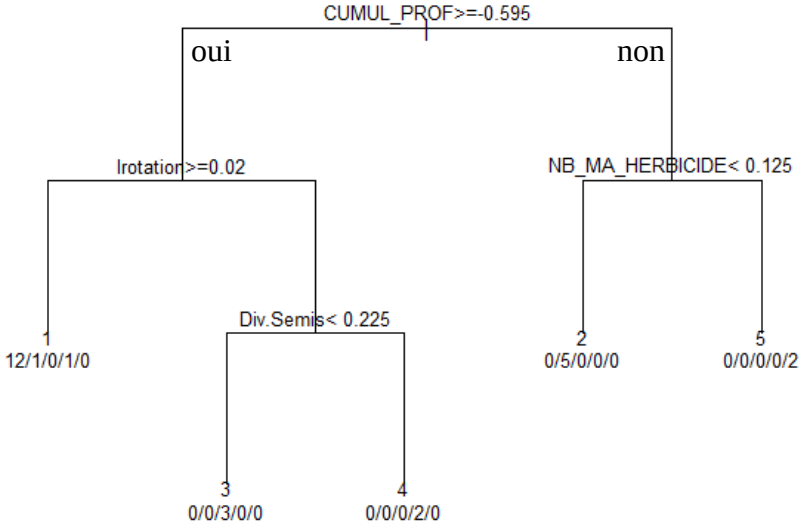
BIO = BIOLOGIQUE

Annexe VII: Arbres de régression réalisés sur les profils de performances obtenus avec les 5 variables de services en valeurs absolues (a) et en valeurs relatives (b)

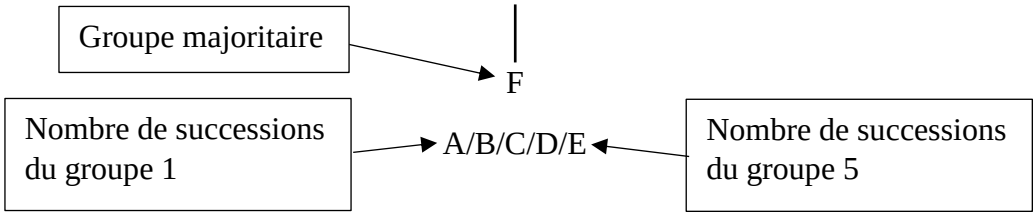
(a) **Arbre de régression décrivant les clusters obtenues sur les données absolues en fonction de l'ensemble des leviers**



(b) **Arbre de régression décrivant les clusters obtenues sur les données relatives en fonction de l'ensemble des leviers**



A chaque nœud, la branche de gauche correspond à la réalisation de la condition et la branche de droite correspond à l'opposé. Les feuilles terminales décrivent le groupe principal ainsi que la répartition des successions répondant à la suite des conditions au sein des différents clusters. Ainsi, ces arbres permettent de caractériser des groupes de successions homogène du point de vue des leviers en essayant de conserver les groupes obtenus avec les niveaux de services.



Annexe VIII : Résultats significatifs des tests de Kruskal-Wallis sur la classification en valeurs relatives et regroupement en fonction des oppositions entre clusters

Cluster	MARGE_MIN		MARGE_MOYENNE		ABONDANCE_ADV		RICH_SPE_ADV		INDICE_SHANNON		NB_ESPECES		Isc		Div.Semis		Kp		NB_W_SOL		NB_LABOUR		CUMUL_PROF	
1-r	0.17	a	-0.02	a	4.29	c	0.34	b	0.34	b	0.92	a	1.88	a	0.30	ab	0.18	a	-0.08	a	0.01	a	0.02	a
2-r	-0.29	b	-0.38	b	1.79	bc	0.27	b	-0.01	b	0.67	ab	0.08	ab	-0.19	ab	-0.01	b	-0.51	ab	-0.7	b	-0.72	b
3-r	0.25	a	-0.09	ab	8.60	abc	1.75	a	3.36	a	-0.11	b	-0.08	b	0.07	ab	-0.01	ab	-0.02	ab	-0.29	ab	-0.26	ab
4-r	-0.29	b	-0.35	b	51.3	a	0.63	ab	2.17	ab	0.67	ab	0.50	ab	0.51	a	0.02	ab	-0.03	a	0.07	a	0.14	a
5-r	-0.57	b	-0.49	b	46.2	ab	3.23	a	4.53	a	0.29	ab	0.14	ab	-0.45	b	0.10	ab	-0.74	b	-1	b	-1	b

- Les nombres représentent les valeurs moyennes de chaque cluster

- Pour chaque variable les rangs moyens de deux clusters sont significativement différents s'ils n'ont pas de lettre en commun

Opposition de clusters			
1-r et 3-r vs 2-r, 4-r et 5-r	1-r et 2-r vs 4-r	3-r et 5-r vs 1-r et 2-r	1-r et 4-r vs 2-r et 5-r
1-r vs 3-r	4-r vs5-r	1-r vs 2-r	

AGRO CAMPUS OUEST	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, horticoles et du Paysage Spécialité : Ingénieur Agronome Spécialisation : Sciences des Productions Végétales Option : Ingénierie des Agrosystèmes Responsable d'option : M.Carof

Auteur(s) : Séverin YVOZ Date de naissance* : 09/02/1994	Organisme d'accueil : INRA Adresse : Avenue Lucien Brétignière, 78850 Thiverval-Grignon Maître de stage : M.Valantin-Morison
Nb pages : 26 Annexe(s) : 11 pages	
Année de soutenance : 2017	

Titre français : **Augmentation de la biodiversité cultivée et interactions avec la production agricole, la régulation biologique des bioagresseurs et la biodiversité associée**

Titre anglais : Increase of planned biodiversity and interactions with crop production, bioregulation of pests and associated biodiversity

Résumé (1600 caractères maximum) : L'agriculture intensive est de plus en plus remise en cause pour son impact négatif sur l'environnement, avec notamment une érosion de la biodiversité. C'est pourquoi des pratiques agroécologiques se basant notamment sur l'augmentation de la diversité cultivée sont développées. On fait l'hypothèse que l'augmentation de la diversité cultivée pourrait permettre d'augmenter les services écosystémiques et substituer en partie l'effet des intrants. L'objectif est d'observer les relations entre production de biens et de services de régulation des adventices et de maintien de la diversité associée, puis d'identifier et de caractériser les successions ayant les meilleures synergies entre services, sur 33 successions provenant de 4 essais. Après la création d'indicateurs décrivant les successions, des analyses de corrélations entre variables ainsi que des profils de performances et des fronts de Pareto ont été réalisées, puis les successions les plus intéressantes ont été caractérisées par les indicateurs. Ainsi, on a pu observer une corrélation négative entre la production et la richesse en adventices, caractérisée par une opposition entre la diversité cultivée et l'utilisation d'intrants. Cependant, on a mis en évidence des successions permettant d'augmenter la richesse en adventices sans réduire la production ni la régulation des adventices. Celles-ci sont caractérisées par une faible réduction de l'utilisation d'intrants et une légère augmentation de la diversité cultivée. Il faut donc raisonner de manière cohérente la diversité cultivée et l'utilisation d'intrants.

Abstract (1600 caractères maximum) : Intensive agriculture is more and more criticized due to its negative impacts on the environment, like biodiversity loss. That's why agroecological practices based on the increase of the planned diversity are developed. Here, we hypothesised that this increase of the planned diversity could increase the supply of ecosystem services and partly reduce effects of inputs use. The aim of the study is to observed relationships between production of good and ecosystem services of weed regulation and maintaining of associated diversity. Then we identified and described the rotations that have the best synergies between services, on 33 successions from 4 experiments. First, we created indicator to describe the successions then I performed correlations analysis on the variables and performances profiles and Pareto fronts. Finally, the most interesting successions were described with the indicators. So, we observed a negative correlation between production and weeds species richness, which is characterized by an opposition between planned diversity and the use of inputs. However, we highlighted successions which increased weed species richness without decreasing production or weeds regulation. These successions are characterised by a small decrease of inputs use and a small increase of planned diversity. It seems that we must consider in the same time planned biodiversity and input use to create new cropping systems.

Mots-clés : Abondance, Richesse spécifique, Marge, Travail du sol, Pesticides, Fertilisation, Agroécosystème

Key Words : Abundance, Species Richness, Margin, Tillage, Pesticides, Fertilization, Agroecosystem

* *Elément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires*

Document à déposer sur moodle en **format .txt**