



HAL
open science

Évaluation multicritère de systèmes de culture agroécologiques en Bourgogne Franche-Comté

Solèmne Skorupinski

► **To cite this version:**

Solèmne Skorupinski. Évaluation multicritère de systèmes de culture agroécologiques en Bourgogne Franche-Comté. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03572325

HAL Id: dumas-03572325

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03572325v1>

Submitted on 14 Feb 2022

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

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



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

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR Rennes

Année universitaire : 2020-2021	Mémoire de fin d'études <input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) <input type="checkbox"/> de master d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) <input type="checkbox"/> de Montpellier SupAgro (étudiant arrivé en M2) <input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)
Spécialité : Agronome	
Spécialisation (et option éventuelle) : Agroécologie	

Evaluation multicritère de systèmes de culture agroécologiques en Bourgogne Franche-Comté

Par : Solèmne SKORUPINSKI



Soutenu à Rennes le 16/09/2021

Devant le jury composé de :

Président : Safya MENASSERI

Maître de stage : Nicolas MUNIER-JOLAIN

Enseignant référent : Matthieu CAROF

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :
Hayo VAN-DER-WERF

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation « Paternité-Pas d'Utilisation

Commerciale-Pas de Modification 4.0 France » disponibles en ligne

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Table des matières

INTRODUCTION	1
1. EVALUER LA DURABILITE DES SYSTEMES AGROECOLOGIQUES AVEC UNE APPROCHE MULTICRITERE.....	2
1.1. L'agroécologie : une réponse pertinente aux enjeux du développement durable.....	2
1.1.1. Définitions, principes et enjeux de l'agroécologie	2
1.1.2. Le besoin d'évaluer la durabilité des systèmes agroécologiques	3
1.2. Les approches d'évaluation de la durabilité et leurs modalités.....	4
1.2.1. Evaluer la durabilité à l'échelle du système de culture.....	4
1.2.1.1 Définitions et évolution du concept de système de culture	4
1.2.1.2 La pertinence de cette échelle pour l'évaluation de systèmes agroécologiques....	5
1.2.1.3 Les évaluations multi-sites : prise en compte des spécificités des systèmes.....	5
1.2.2. Le choix de critères et d'indicateurs pertinents pour l'évaluation	6
1.2.2.1 Les éléments prédominants pour évaluer la dimension socio-économiques.....	6
1.2.2.2 L'évaluation de la dimension environnementale : utilisation de PPP et.....	7
1.2.2.3 ... qualité du sol avec un regard sur le rôle des micro-organismes	8
i. L'importance de caractériser la microbiologie du sol	8
ii. Les avantages de l'identification taxonomique des CMB.....	8
1.3. Les différentes voies d'analyse de l'ensemble des indicateurs	9
1.3.1. Analyses exploratoires et descriptives des performances	9
1.3.2. Synthèse des performances par transformation et agrégation des indicateurs.....	10
1.3.2.1 Normaliser les indicateurs pour les comparer sur une échelle commune.....	10
1.3.2.2 Agréger les indicateurs pour synthétiser l'information	10
2. MATERIEL ET METHODE.....	11
2.1. I-SITE : un réseau régional de systèmes de culture	11
2.1.1. Description globale des systèmes et des stratégies.....	11
2.1.2. Base de données qui a permis l'étude et construction de typologies	11
2.1.2.1 Une catégorisation des rotations en sept groupes	12
2.1.2.2 Identification de trois grands types de sol	12
2.2. Calcul des indicateurs de performance et méthodes d'analyse	13
2.2.1. Calcul des indicateurs à partir de référentiels.....	13
2.2.1.1 Indicateur de fréquence de traitement (IFT).....	13
2.2.1.2 Marge semi-nette et robustesse économique	13
2.2.1.3 Temps de travail	14
2.2.2. Les méthodes d'analyse des résultats des indicateurs	14
2.3. Analyse des données de microbiologie des sols.....	15
2.3.1. Prélèvement des sols et analyse métagénomique ciblée	15
2.3.2. Choix des facteurs à tester	16
2.3.3. Méthodes statistiques.....	16
3. RESULTATS	17
3.1. Analyse des indicateurs de performance	17
3.1.1. Comparaisons des performances des systèmes de culture	17

3.1.1.1	Un fort gradient selon l'indice de fréquence de traitements.....	17
3.1.1.2	Marge semi-nette et robustesse	18
3.1.1.3	Temps de travail	19
3.1.2.	Etude des relations entre les indicateurs	20
3.1.2.1	Compromis entre IFT et marge semi-nette	20
3.1.2.2	Absence de relation entre le temps de travail et les autres indicateurs.....	21
3.1.3.	Analyse globale des et identification des meilleurs systèmes de culture.....	22
3.1.3.1	Classement des systèmes selon leurs performances	22
3.1.3.2	Description des meilleurs systèmes	22
3.2.	Analyse des données de microbiologie des sols.....	23
3.2.1.	Identification des facteurs impactant	23
3.2.2.	Identification des genres exprimés différemment.....	24
4.	CONCLUSION.....	25
	BIBLIOGRAPHIE	27

Liste des abréviations

ACP : Analyse en Composante Principale

AE : AgroEcologie

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique

CA-SYS : Co-designed Agroecological System experiment

CBO : Colza-Blé-Orge

CV : Coefficient de Variation

EMC : Evaluation MultiCritère

IFT : Indice de Fréquence de Traitements phytopharmaceutiques

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

IPPAP : Indice des Prix des Produits Agricoles à la Production

IPAMPA : Indice des Prix d'Achat des Moyens de Production Agricole

IC : InterCulture

ITK : Itinéraire Technique

MSN : Marge Semi-Nette

NMDS : Non-Metric Multidimensional Scaling

OP : OléoProtéagineux

PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobacteria

RE : Robustesse Economique

SDC : Système De Culture

SDP : Situation De Production

TT : Temps de Travail

Introduction

Depuis des décennies, l'agronomie a produit des connaissances et développé des agrosystèmes dans le but de maximiser la productivité et les performances économiques. Cette agriculture « moderne » repose largement sur une utilisation forte d'intrants chimiques et d'énergie, une généralisation de la mécanisation et la spécialisation des productions. Elle a notamment conduit à une simplification des paysages et à la spécialisation forte des territoires. Cependant, ces agrosystèmes ont générés et continuent de générer des impacts environnementaux majeurs à des échelles locales et globales, incluant : l'érosion et la diminution de la qualité du sol, la perte de biodiversité (en particulier des variétés locales), la résistance des bioagresseurs aux produits phytosanitaires, la diminution de la qualité de l'eau (pollution des eaux de surface et souterraines par des nutriments et des toxines), une forte dépendance aux énergies fossiles et une contribution importante aux gaz à effet de serre (Malézieux, 2012). Malgré l'urgence croissante de réduire ces nuisances, la FAO (2020) estime qu'une augmentation de moitié de la production agricole sera nécessaire pour nourrir la population mondiale d'ici 2050. Pour relever ce défi, il semble indispensable de rompre avec le modèle agricole actuel et de concevoir de nouveaux agrosystèmes qui s'inscrivent dans une agriculture durable, c'est-à-dire, qui assurent une production suffisante tout en n'ayant que très peu, voire aucun, impact négatif sur l'environnement et en maintenant, voire en améliorant, la régénération des ressources naturelles (Tilman et al., 2002; Doré et al., 2011). C'est l'objectif de l'agroécologie qui veut construire des modèles agricoles qui mobilisent les fonctions des écosystèmes pour concilier les enjeux environnementaux, économiques et sociaux de l'agriculture. Selon la FAO (2018), « la mise à l'échelle de l'agroécologie est reconnue et proposée pour la prochaine décennie comme une approche et un moyen stratégique pour promouvoir et réaliser les objectifs de développement durable à l'horizon 2030 ». Cependant, un certain scepticisme, qui traverse le milieu agricole comme celui des décideurs, persiste quant à la faisabilité et aux effets positifs de l'agroécologie (Levard et al., 2019). En effet, il existe une forte diversité de systèmes agroécologiques possibles car chacun doit s'adapter au contexte de production et parce qu'ils se distinguent par le niveau de recours aux processus biologiques. Il est nécessaire d'évaluer si ces systèmes sont capables de concilier les enjeux de la durabilité ; et dans le cas contraire, d'identifier leurs forces et faiblesses. Dans ce cadre, les méthodes d'évaluation multicritère de la durabilité ont toute leur place : intégrant les multiples dimensions de l'agriculture durable, elle permettent de travailler sur un modèle simplifié de la réalité et d'analyser le degré d'atteinte des enjeux de la durabilité (Lairez et al., 2015).

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet I-SITE « Agroécologie en Bourgogne Franche-Comté » qui veut étudier le potentiel de l'agroécologie comme solution viable pour répondre aux enjeux de l'agriculture durable. Initié en 2017 pour une durée de trois ans, ce projet est le fruit d'une collaboration entre l'UMR Agroécologie de l'INRAE de Dijon, le pôle d'innovation AgrOnov et la coopérative Dijon Céréales, avec le soutien financier du Programme

d'Investissement d'Avenir et de la COMUE Université de Bourgogne Franche-Comté. L'objectif général est d'identifier des systèmes agroécologiques (principalement en grandes cultures) multi-performants, c'est-à-dire, qui concilient toutes les composantes de la durabilité. Afin de répondre à cette question, deux volets principaux ont été mis en place : premièrement, l'installation d'une expérimentation systémique sur la plateforme CA-SYS de la ferme expérimentale de l'INRAE Dijon à Bretenière. Il s'agit de systèmes de culture en forte rupture avec les modèles actuels, dont l'objectif est d'explorer une agroécologie totale à l'échelle du paysage. Deuxièmement, la construction et l'évaluation d'un réseau régional de systèmes de culture agroécologiques dans le but d'identifier des combinaisons de techniques qui favorisent la multi-performance. Dans ce cadre, de nombreuses données ont été collectées par les équipes de recherche : les détails des conduites techniques, les résultats de production, mais aussi des analyses physico-chimiques et microbiologiques des sols.

L'objectif général du stage est de réaliser une évaluation globale des performances des systèmes du réseau afin d'identifier les systèmes agroécologiques les mieux à même de concilier les dimensions de la durabilité ; puis, dans un second temps, d'analyser les communautés microbiennes pour étudier leur lien avec les pratiques agricoles et la qualité des sols.

1. Evaluer la durabilité des systèmes agroécologiques avec une approche multicritère

1.1. L'agroécologie : une réponse pertinente aux enjeux du développement durable

1.1.1. Définitions, principes et enjeux de l'agroécologie

Le terme « agroécologie » (AE) est né en 1928 d'après Basil Bentsin qui l'utilise pour exprimer l'application des principes de l'écologie à la recherche sur l'amélioration des plantes. Depuis, ce terme a traversé les frontières géographiques, professionnelles et sociales et est porteur plusieurs idées : les agriculteurs y voient une nouvelle manière de produire, les citoyens et les politiciens l'élèvent comme modèle d'évolution de l'agriculture dans la société, tandis que les chercheurs le conçoivent comme un objet de recherche dont ils dessinent le cadre (Doré et al., 2019). La définition la plus consensuelle est de considérer l'AE à la fois comme une science, comme un mouvement social et comme un ensemble de pratiques ou de techniques (Wezel et al., 2009). Des visions plus politiques et transformatives ont aussi émergé avec, par exemple, la définition de Gliessman (2018) qui voit l'AE comme « l'intégration de la recherche, de l'éducation, de l'action et du changement qui apporte la durabilité à toutes les composantes du système alimentaire : écologique, économique et social ».

D'un point de vue technique, deux AE sont souvent distinguées : une AE faible et une AE forte. La première s'insère dans la continuité des systèmes agricoles actuels et se base surtout sur la substitution (utiliser des intrants moins néfastes pour l'environnement ou de la lutte biologique) ou sur les technologies de précision qui augmentent l'efficacité d'utilisation des intrants (Duru et al., 2014). Ces pratiques visent avant tout à réduire les impacts environnementaux négatifs

mais ne sont que des substituts technologiques qui tendent vers une optimisation du modèle de production déjà en place, sans le remettre en question (Estevez et al., 2000). C'est la principale différence avec l'AE forte dont le principe est de valoriser et de mobiliser les processus biologiques afin de fournir les services écosystémiques. Plus précisément, il s'agit d'utiliser la biodiversité pour produire des « services intrants » qui sont les supports de la production via leurs rôles dans la régulation des stress biotiques et abiotiques (Tibi et al., 2017). Ces services dépendent de la mise en œuvre d'un ensemble cohérent de pratiques agricoles adaptées à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et aussi du paysage (Duru et al., 2014). Cela implique donc des reconceptions en profondeur des systèmes agricoles et la remise en cause du choix de l'assolement et des variétés, des modalités des interventions, de l'association des productions végétale et animale, de l'organisation des paysages, etc. (Caquet et al., 2019).

Faire évoluer les systèmes agricoles actuels vers l'AE forte est l'un des enjeux principaux de la transition AE qui nécessite une transformation systémique de l'agriculture et de l'alimentation (Duru et al., 2015). Cependant, il existe une multitude de modèles agricoles possibles (Plumecocq et al., 2018) qui diffèrent notamment par la nature des techniques utilisées et leur organisation, elles-mêmes dépendantes du contexte local. De plus, les principes de l'AE forte impliquent la rupture avec les conduites actuelles des exploitations agricoles, ainsi qu'une prise de risque pour les agriculteurs due à une incertitude sur ses résultats (Magrini et al., 2019).

1.1.2. Le besoin d'évaluer la durabilité des systèmes agroécologiques

L'AE est considérée comme une approche pertinente pour répondre aux objectifs du développement durable (Levard et al., 2019). Ce dernier se décompose en trois dimensions : économique, environnementale et sociale. Appliqué à l'agriculture, il implique de produire des denrées alimentaires en quantité et de qualité suffisante pour nourrir la population mondiale, de le faire sans endommager l'environnement, en préservant les ressources naturelle et la biodiversité, en maintenant un revenu et une qualité de vie décente pour les agriculteurs et en contribuant au développement rural de l'économie du secteur agricole (FAO, 2021). Cependant, il existe encore des doutes sur la faisabilité et la pertinence de l'AE pour concilier ces enjeux, appelant à l'approfondissement de nos connaissances sur cette question.

L'agriculture est caractérisée par sa multifonctionnalité et ses nombreuses externalités positives et négatives sur les écosystèmes et les sociétés humaines (OECD, 2001). Ainsi, le concept de durabilité appliqué à l'agriculture est nécessairement complexe car il est multidimensionnel et par conséquent, il ne peut se résumer à un seul déterminant (Pannell et al., 2000). L'évaluation multicritère (EMC) est identifiée comme la meilleure approche pour traiter les questions de durabilité (Pannell et al., 1999) : elle permet d'intégrer de nombreuses variables hétérogènes qui proviennent de disciplines différentes et propose une analyse de leur ensemble (Lairez et al., 2015). Cependant, si le concept de durabilité est un emblème puissant, il reste ambigu et

porteur d'une pluralité d'objectifs. En conséquence, il existe une multitude d'approches possibles lorsqu'il s'agit de procéder à son évaluation.

1.2. Les approches d'évaluation de la durabilité et leurs modalités

Le terme « multicritère » provient de travaux de la recherche opérationnelle sur l'aide à la décision multicritère (Schärlig, 1985). Une analyse multicritère prend en compte des points de vue contradictoires et propose des solutions qui concilient aux mieux des critères choisis. Ainsi, une EMC est une évaluation qui intègre de multiples variables de différentes natures et dépasse la simple description en visant l'analyse et l'interprétation de leur ensemble. Appliquée à la durabilité des systèmes AE, le but est de réduire la complexité du réel en un modèle simple pour évaluer la performance globale. Cela suppose d'organiser un éventail d'indicateurs pertinents qui mesurent ou estiment la réponse des systèmes évalués par rapport aux critères de la durabilité (Lairez et al., 2015).

Depuis les années 1990, de nombreuses approches multicritères ont été proposées pour évaluer la durabilité des systèmes agricoles (Bockstaller et al., 2009). Le débat persiste aujourd'hui sur les modalités de ces méthodes : la prise en compte du contexte de production, l'échelle d'évaluation, le choix des indicateurs et les poids respectifs de ces derniers dans l'évaluation (Deytieux et al., 2016). Le choix parmi ces possibilités dépend de l'objectif de l'évaluation, de la personne à qui elle s'adresse et du type de système évalué (Lairez et al., 2015).

1.2.1. Evaluer la durabilité à l'échelle du système de culture

Le territoire, la filière, ou l'exploitation sont autant d'échelles possibles pour évaluer les performances de systèmes AE. Afin d'évaluer la durabilité d'un ensemble de pratiques mises en œuvre par l'agriculteur, l'échelle du système de culture (SDC) est bien adaptée.

1.2.1.1 Définitions et évolution du concept de système de culture

Le concept du SDC a beaucoup évolué depuis sa naissance à la fin du XVIII^{ème} siècle, s'enrichissant des usages qui en ont été fait, et sa définition suscite encore des divergences de perception (Papy, 2008). Un premier cadre est celui de Sebillotte (1990) qui définit le SDC comme « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de façon identique ». Le SDC se caractérise ainsi par une succession culturale, chaque culture étant associée à « une combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu pour en tirer une production donnée », que Sebillotte appelle « itinéraire technique ». Une autre perception est de voir le SDC comme la résultante d'un ensemble de règles de décision qui détermine les techniques culturales utilisées. Une règle de décision est une fonction qui relie une action à l'observation de facteurs physiques ou biologiques et son objectif est de conduire à la solution la plus adaptée au contexte à un instant donné. Ce concept contribue à une mise en œuvre cohérente de techniques culturales en lien avec les objectifs à atteindre

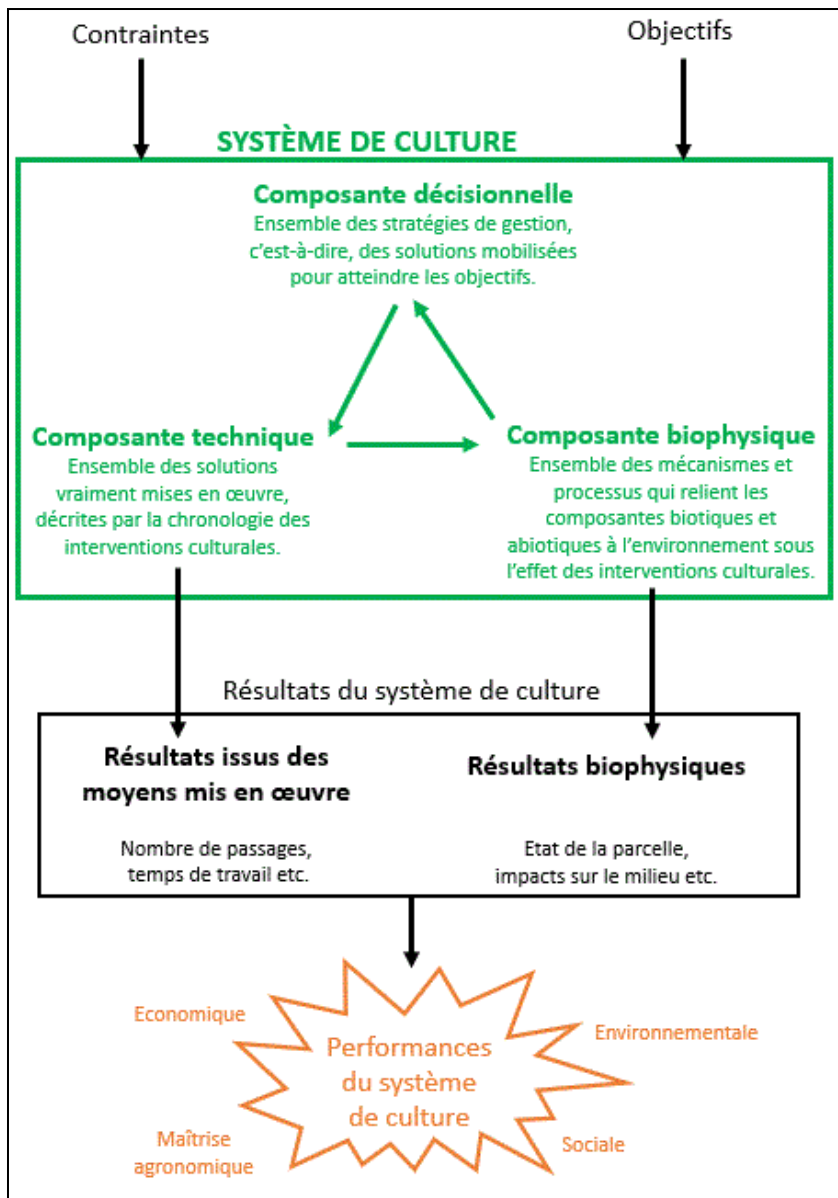


Figure 1 : Cropping system components and their links with the framework of objectives and constraints, and to system outcomes and performance.

Figure 1 : Composantes du système de culture et ses relations avec le cadre d'objectifs et de contraintes, ainsi qu'avec les résultats et les performances du système.

Extrait et adapté de Schaub et al. (2016).

(Lechenet, 2014). Enfin, Schaub et al. (2016) propose une définition plus complète en ajoutant aux deux idées précédentes une dimension de contexte biophysique. Ainsi, le SDC peut se décomposer en trois parties complémentaires et indissociables : les composantes biophysique, décisionnelle et technique. Ces trois dimensions sont en interaction et affectent directement les résultats, et donc les performances, du SDC (Figure 1).

1.2.1.2 La pertinence de cette échelle pour l'évaluation de systèmes agroécologiques

L'AE se définit notamment par la mise en place de pratiques au service de la valorisation des processus écologiques. Travailler à l'échelle du SDC permet justement d'appréhender les interactions entre les pratiques agricoles mises en place et donc d'analyser la cohérence de la combinaison de techniques résultant de la stratégie de gestion. C'est-à-dire, de voir comment une coordination de pratiques permet aux composantes du système d'entrer en synergie pour servir un objectif de la durabilité (Meynard et al., 2003).

De plus, comme le suggère Schaub et al. (2016), la multi-performance d'un SDC dépend du contexte local, que l'on peut appeler « situation de production » (SDP). La SDP regroupe l'ensemble des caractéristiques biophysiques et socio-économiques (eg : accès aux débouchés, présence d'élevage) qui orientent la stratégie du pilote et déterminent les performances (Aubertot et al., 2013). Ainsi, la SDP dessine un cadre de contraintes et d'opportunités que l'agriculteur ne peut pas modifier, ou du moins, sur le court terme (Lechenet, 2014). Les SDC sont donc très variables d'un lieu à un autre. Pour Meynard et al. (2003), les principales composantes de la SDP sont : les conditions pédoclimatiques, qui conditionnent notamment le choix des espèces et des variétés cultivées, les qualités de récolte exigées selon le type de production (eg : une contrainte au niveau du taux de protéines des grains d'une céréale peut conditionner les modalités de fertilisation azotée), et enfin, les règlementations (eg : zonages agroécologiques) qui peuvent favoriser voire imposer certaines pratiques. Evaluer à l'échelle du SDC permet donc de prendre en compte ces éléments contextuels, ce qui est particulièrement pertinent pour les évaluations multi-sites.

1.2.1.3 Les évaluations multi-sites : prise en compte des spécificités des systèmes

Une EMC peut être faite pour un seul site, ce qui est indispensable pour comprendre les processus biophysiques, identifier des systèmes prometteurs pour un contexte donné, et communiquer sur les innovations pour encourager leur adoption par les agriculteurs. Dans ce cas, les résultats sont restreints à la SDP concernée. Réaliser une EMC « multi-site » permet d'évaluer un ensemble de SDC et d'étudier une large diversité de SDP (Deytieux et al., 2016). Pour cela, il est important de caractériser au préalable les SDP et cela à plusieurs niveaux.

Les paramètres climatiques (températures et précipitations) et de sol (propriétés bio-physico-chimiques) sont les éléments biophysiques les plus fréquemment décrits. Concernant le

contexte socio-économique, il s'agit surtout de renseigner des typicités régionales comme les activités et les débouchés agricoles principaux (eg : filières de valorisation comme des ateliers d'élevage ou des entreprises de transformation). Puis, il est important de caractériser les combinaisons de techniques mises en œuvre par l'agriculteur, qui résultent de sa stratégie de gestion. La rotation culturale est systématiquement considérée et peut être décrite de plusieurs façons : nombre de séquences culturales, pourcentage de céréales, présence de cultures de printemps etc. Concernant les interventions culturales il est fréquent de renseigner les modalités de travail de sol, de fertilisation et d'utilisation de pesticides (Deytieux et al., 2016).

Ces éléments descriptifs de la SDP ou des caractéristiques de gestion du SDC peuvent ensuite être considérés à différents niveaux dans les EMC : parfois simplement fournis à titre indicatif pour le lecteur, ils peuvent aussi être intégrés comme éléments d'interprétation des résultats sur les performances. Cela peut être fait de façon libre comme dans l'étude de Pacini et al. (2003) qui nuance ses résultats en incluant l'impact du contexte pédoclimatique ; ou en mobilisant des méthodes statistiques spécifiques, comme le font Bürger et al. (2012) en réalisant des analyses multivariées pour quantifier l'impact d'éléments contextuels variés (températures, précipitations, qualité de sol, successions culturales, travail de sol etc.).

1.2.2. Le choix de critères et d'indicateurs pertinents pour l'évaluation

Les critères sont des variables qui qualifient un phénomène ou la dimension d'un problème (eg : la rentabilité est un critère qui caractérise la dimension économique de la durabilité). Les indicateurs sont des variables qui permettent de renseigner ces critères (eg : le produit brut renseigne la rentabilité). Ce sont des variables mesurables qui reposent sur une relation connue ou supposée avec le phénomène évalué (Boulangier, 2004). Ils peuvent être de plusieurs natures : quantitatifs ou qualitatifs, descriptifs ou prédictifs, élémentaires ou agrégés, mesurés, calculés ou observés. Ils doivent être pertinents scientifiquement (validés et reconnus par la communauté scientifique, reproductibles dans des contextes différents et sensibles au changement lorsque le système évalué évolue). Leur mesure ou calcul doit être faisable et accessible par les utilisateurs ; le résultat doit être clair, compréhensible, utile pour les utilisateurs et facilement communicable (Lairez et al., 2015).

1.2.2.1 Les éléments prédominants pour évaluer la dimension socio-économiques

Les performances économiques sont généralement résumées en termes de rentabilité et peu d'indicateurs différents sont utilisés. Les plus courants sont la marge brute et la marge semi-nette (MSN), mesurées en euros par hectare (€/ha) (Deytieux et al., 2016). La marge brute est la différence entre le produit brut (issu de la récolte) et les coûts opérationnels (semences, engrais, pesticides et carburant). La MSN inclut aussi les coûts liés à la mécanisation et parfois d'autres charges fixes (assurances, entretien des bâtiments etc.). Utiliser ce chiffre comme indicateur de la performance économique est intéressant puisqu'il permet de rendre compte de

l'efficacité de production. Or, un des enjeux de l'AE est justement de diminuer les intrants tout en augmentant les quantités produites. Cependant, les prix des intrants et des récoltes dépendent des prix du marché qui sont variables au cours du temps. Ainsi, quelques études ont pris en compte la variabilité des indicateurs de rentabilité selon la volatilité des prix afin de mesurer la sensibilité des systèmes aux aléas économiques (Prato et al., 2007; Lechenet et al., 2014).

La composante sociale est la moins représentée dans les EMC de la durabilité. Le critère utilisé le plus fréquemment est la charge de travail, mesurée en heures par hectare (h/ha). Elle prend en compte les opérations techniques mais ignore généralement le temps consacré aux observations au champs, au partage de connaissances ou aux tâches administratives (Deytieux et al., 2016). Certaines études ont aussi mesuré la répartition du travail au cours l'année (Pardo et al., 2010) et la complexité de certaines tâches (Colomb et al., 2013). D'autres vont plus loin en incluant une notion d'acceptabilité par la société (Vasileiadis et al., 2013).

1.2.2.2 L'évaluation de la dimension environnementale : utilisation de PPP et...

Pour évaluer la dimension environnementale, deux types de critères peuvent être distingués : ceux qui quantifient l'utilisation des ressources extérieures (engrais, eau, énergie etc.) et ceux qui rendent compte de l'effet des pratiques sur la qualité des compartiments environnementaux (contamination de l'eau via la lixiviation de l'azote ou du phosphore, émission de gaz à effet de serre, perte de biodiversité etc.).

Dans le premier cas, l'intensité d'utilisation des produits phytopharmaceutiques (PPP) est un critère largement considéré ; l'indice de fréquence de traitement (IFT) est l'indicateur de référence pour la quantifier (Deytieux et al., 2016). Créé dans les années 1980 au Danemark puis adapté en France dans les années 2000, il comptabilise le nombre d'applications de PPP sur un hectare pendant une campagne culturale en se basant sur une dose de référence. Cette dernière, appelée « dose homologuée », correspond à la dose efficace d'application d'un produit sur une culture pour un organisme donné (Brunet et al., 2008). Tous les produits jugés nocifs pour l'environnement selon le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA) sont concernés (biocides appliqués au champs, régulateurs de croissance et parfois traitements de semences). De plus, l'IFT permet de mesurer la dépendance des exploitations aux PPP, ce qui en fait un bon indicateur pour refléter la pression des PPP sur l'unité d'étude (Meybeck et al., 2010). Cependant, l'IFT ne permet pas de quantifier l'impact des PPP sur l'environnement (Lechenet et al., 2014). Il existe des indicateurs tels que I-PHY de la méthode INDIGO® qui permet d'identifier les pratiques à risques pour le milieu naturel. Il est basé sur un modèle expert qui prend en compte les caractéristiques des substances actives des PPP, de la parcelle et des conditions d'application pour calculer des notes de risque de contamination dans l'eau et l'air (Bellec et al., 2013).

1.2.2.3 ... qualité du sol avec un regard sur le rôle des micro-organismes

Dans le cas de mesures d'impact sur l'environnement, la qualité du sol est le critère le plus souvent évalué et il est fréquemment traduit par le taux de matière organique (MO) et le risque d'érosion (Deytieux et al., 2016). En effet, améliorer la quantité MO et diminuer l'érosion permet de stocker les éléments nutritifs dans le sol et peut notamment permettre de diminuer l'utilisation d'engrais. Certains outils tels que MASC 2.0 (*Multicriteria Assessment of the Sustainability of Cropping systems*), considèrent également la biodiversité du sol et notamment celle des microorganismes. Cependant, mesurer la présence et l'abondance de microorganismes particuliers n'est pas encore envisagé pour évaluer la santé du sol dans les EMC. Pourtant, cela présente des avantages prometteurs.

i. L'importance de caractériser la microbiologie du sol

Les communautés microbiennes (CMB), composées principalement de bactéries, de champignons et d'archées, sont impliquées dans les fonctions écologiques essentielles du sol via la décomposition de la MO et les cycles biogéochimiques des nutriments (Saccá et al., 2017). Les CMB ont donc une influence critique sur la productivité et la durabilité des agroécosystèmes (Chen et al., 2018) et le maintien de leur biodiversité est crucial pour la santé des sols (Kennedy et Smith, 1995). De plus, les paramètres microbiologiques sont reconnus comme étant de bons indicateurs de la santé des sols. En cause, leur pertinence écologique, leur sensibilité et rapidité de réponse face aux changements et la variété de facteurs avec lesquels ils interagissent (Yang et al., 2020). L'abondance (biomasse microbienne), le niveau de diversité (indice de Shannon) et l'activité enzymatique sont généralement corrélés positivement avec la santé du sol et sont donc les paramètres les plus souvent mesurés. Cependant, ces valeurs ne rendent pas directement compte de la composition taxonomique des CMB, une information qui pourrait servir de base à la construction de nouveaux indicateurs de qualité des sols.

ii. Les avantages de l'identification taxonomique des CMB

La recherche sur les CMB a permis d'identifier les effets bénéfiques qui accompagnent la présence dans les sols de certains taxons. Par exemple, certaines souches de rhizobactéries, appelées PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*), sont reconnues pour stimuler la croissance des plantes et leurs défenses contre les microorganismes pathogènes. C'est notamment le cas de la famille *Pseudomonas* dont la présence contribue à une augmentation des rendements (Lemanceau, 1992). Aussi, certaines espèces (eg : *Bacillus* spp., *Agrobacterium radiobacter*) permettent l'amélioration de la phytoextraction des métaux lourds par les plantes et donc la décontamination des sols (Wood et al., 2016). Cependant, il n'existe pas de CMB idéale et universelle pour la production ou la décontamination ; les bénéfices apportés par les communautés dépendent des paramètres locaux (Fierer, 2017).

Table 1 : Number of articles dealing with a multicriteria assessment of sustainability, according to the methods used to analyze the results and the objectives of the assessment.

Tableau 1 : Nombre d'articles scientifiques traitant d'une évaluation de la durabilité selon la ou les méthodes d'analyse de multi-performance utilisées et les objectifs de l'évaluation.

Tous les articles comptabilisés traitent d'une évaluation multicritère de la durabilité de systèmes de culture ; elles sont multi-sites et sont réalisées ex-ante (systèmes virtuels) ou ex-post (données réelles). Un même article peut être compté plusieurs fois s'il fait l'objet de plusieurs objectifs et/ou méthodes d'analyse.

TYPE DE METHODE	EXEMPLES	OBJECTIF DE L'EVALUATION				
		Décrire la variabilité des performances	Identifier les hautes performances	Analyser l'impact d'un changement	Identifier les moteurs de performance	Mettre en évidence et analyser les compromis
Statistiques descriptives simples	- Tableaux des scores - Diagrammes en barres - Radars - Boxplots	13	8	10	8	8
Statistiques multi-dimensionnelles	- Analyses multivariées - Tests de corrélation - Courbes de compromis - Partitionnement (clustering)	4	0	1	3	1
Méthodes basées sur des modèles linéaires	- Analyses de variance univariées ou multivariées	0	0	0	6	1
Autres méthodes	- Définition d'un "espace" de durabilité	3	6	1	1	2

Extrait et adapté de Deytieux et al. (2016)

Des études récentes ont rapporté des changements dans la composition et la structure des CMB selon les SDC en place, suggérant l'existence d'une spécificité de niche et d'une spécialisation fonctionnelle selon le SDC (Lupatini et al., 2017; Bill et al., 2021). Il semble alors possible d'utiliser cette relation afin de déterminer une gestion du sol efficace et durable, qui favoriserait la présence de taxons ou de communautés bénéfiques pour la santé du sol, dans un contexte donné. Cependant, les facteurs et les mécanismes qui régissent les modifications de ces communautés sont pour le moment peu étudiés et très mal connus. Davantage de recherches sont encore nécessaires pour comprendre l'immense complexité des CMB. En cause, leur forte hétérogénéité spatiale, leur dynamique temporelle et leur infinie biodiversité (Yang et al., 2020). Heureusement, les récents progrès technologiques en matière de séquençage ADN haut débit permettent d'étudier la diversité des CMB en analysant directement leur composition taxonomique par l'amplification de marqueurs (Rao, 2007).

1.3. Les différentes voies d'analyse de l'ensemble des indicateurs

Un fois les indicateurs élémentaires calculés, il faut procéder à leur analyse. De nombreuses méthodes sont possibles en fonction des objectifs de l'évaluation. Elles peuvent reposer simplement sur des études descriptives des indicateurs bruts, ou bien aller plus loin en proposant une synthèse par agrégation de tous les résultats. La description de quelques méthodes intéressantes est réalisée en se basant particulièrement sur l'étude de Deytieux et al. (2016) qui propose une catégorisation des méthodes possibles (Tableau 1).

1.3.1. Analyses exploratoires et descriptives des performances

Le tableau 1 résume les méthodes d'analyse fréquemment employées lors d'EMC de durabilité de SDC, en fonction de leur(s) objectif(s). La plupart des études utilisent les statistiques descriptives afin de représenter et analyser les différences entre les SDC. Le moyen le plus simple est d'utiliser des outils graphiques tels que les diagrammes en barres, qui peuvent être découpés selon des catégories à mettre en évidence (Pardo et al., 2010). Également, dans le cas de répétitions spatiales et/ou temporelles, il est utile de regarder la variabilité de la performance au sein d'un même SDC. Par exemple, une représentation en boxplots permet de visualiser la distribution des valeurs (Fumagalli et al., 2012). Puis, il est intéressant d'étudier la relation entre les indicateurs pour identifier des compromis ou des synergies. Il est possible de tracer simplement des courbes de compromis entre deux indicateurs (Lechenet et al., 2014), ou bien de construire des profils de performance selon l'ensemble des indicateurs en appliquant une analyse en composante principale puis une classification ascendante (Mézière et al., 2015). Enfin, pour ce qui est de l'identification des moteurs des performances, l'utilisation de modèles linéaires et d'analyses de variance sont adaptés (Bürger et al., 2012).

1.3.2. Synthèse des performances par transformation et agrégation des indicateurs

1.3.2.1 Normaliser les indicateurs pour les comparer sur une échelle commune

Pour comparer les performances au regard de plusieurs indicateurs, il est nécessaire de les exprimer sur une même échelle / dans une même unité de mesure. Il faut alors normaliser les valeurs, c'est-à-dire, les transformer en nombres purs et sans dimension. Différentes méthodes existent comme le classement, la standardisation (par la moyenne et l'écart-type), le redimensionnement (*re-scaling*), la distance à une valeur de référence ou encore les échelles catégoriques (Nardo et al., 2005). La méthode *re-scaling* est intéressante car elle permet de fonder la transformation sur la plage de valeurs du lot de systèmes étudiés et donne aux indicateurs une portée identique (de 0 à 1). Cependant, si les valeurs extrêmes (minimum et maximum) sont des valeurs aberrantes, elles peuvent générer un effet de distorsion sur l'indicateur transformé (Nardo et al., 2005).

1.3.2.2 Agréger les indicateurs pour synthétiser l'information

L'agrégation des indicateurs en un indicateur composite permet de synthétiser leur information. Pour des questions de durabilité, l'idée est d'obtenir une unique valeur qui fait office de note de durabilité du système. Cependant, cette procédure est source de débats (Nardo et al., 2005) car il y a un risque d'incohérence dans l'assemblage d'informations de natures différentes (eg : critères environnementaux, sociaux et économiques). De plus, il y a nécessairement une perte d'information puisque la variabilité des performances selon les critères est masquée. Enfin, agréger les indicateurs implique de leur attribuer un poids. Cette étape de pondération est très subjective car elle repose forcément sur une vision personnelle de la durabilité. Dans ce cadre, il est important de pouvoir considérer plusieurs possibilités. L'outil MASC 2.0, qui considère simultanément les trois piliers de la durabilité à l'aide de 32 indicateurs, permet de renseigner des préférences sur la pondération des critères (Sadok et al., 2009). Ainsi, il est possible de comparer les résultats de multi-performance selon plusieurs possibilités de pondération. De plus, pour pallier à ce problème de subjectivité, il est possible de consulter des experts de diverses disciplines (Castoldi et al., 2010).

Il n'y a pas de méthode universelle pour évaluer la durabilité de systèmes AE mais bien une diversité de modalités (échelles, indicateurs, méthodes d'analyse) parmi lesquelles il faut faire un choix, en fonction des objectifs et des données disponibles pour l'étude. Dans le cadre du stage, le calcul de quelques indicateurs permettra de refléter les trois piliers de la durabilité et de répondre à deux questions : quels systèmes du réseau sont les mieux à même de favoriser la multi-performance ? Quelle est la nature des relations entre plusieurs critères de la durabilité ? Dans un second temps, une analyse de la microbiologie des sols permettra d'investiguer une potentielle relation entre la composition taxonomique des communautés microbiennes et les caractéristiques des SDC.

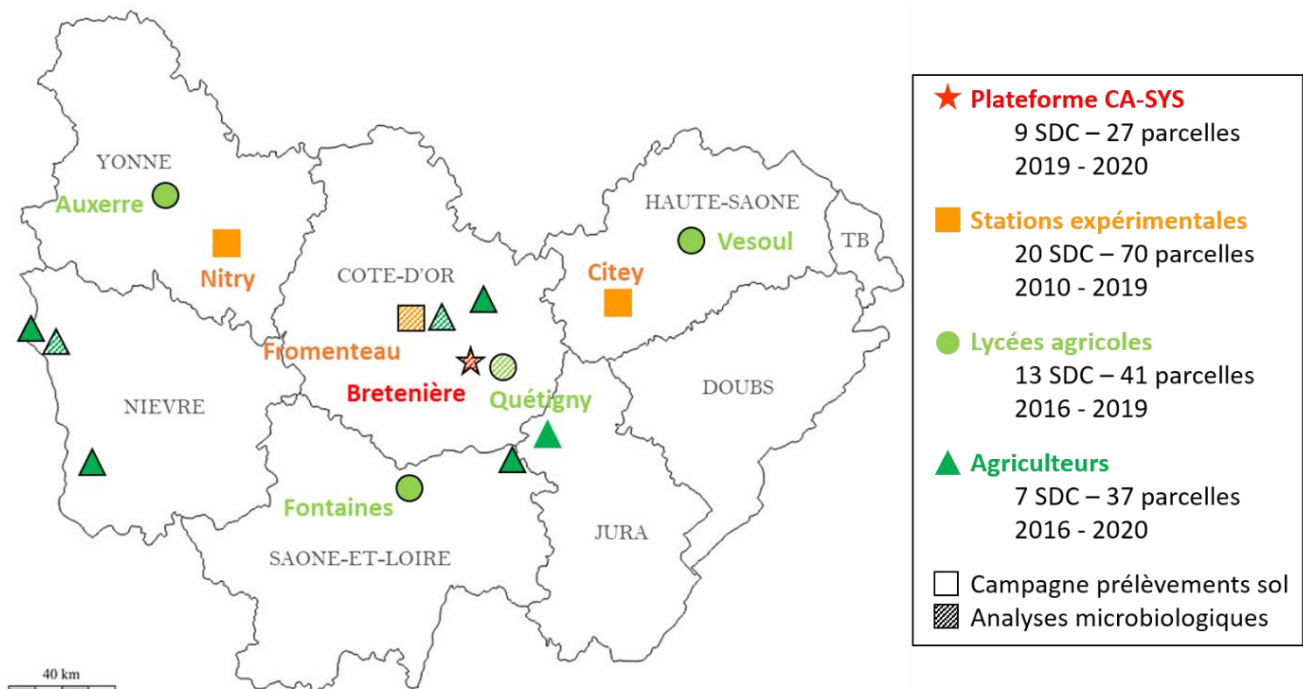
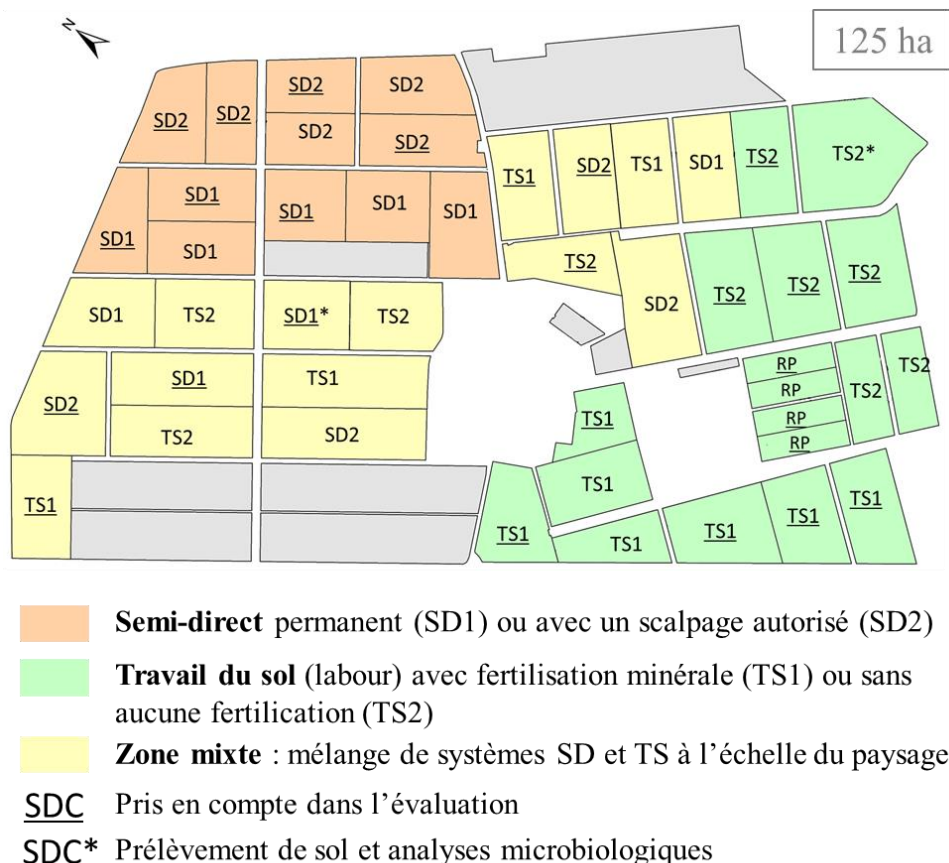


Figure 2 : Map of the area 'Bourgogne Franche-Comté' with the location of the 61 cropping systems within the network.

Figure 2 : Carte de la région Bourgogne Franche-Comté avec les localisations des 61 SDC du réseau. Répartition selon les différents acteurs, indication du nombre de SDC et de parcelles évalués par site et distinction des sites concernés par la campagne de sols.



- Semi-direct permanent (SD1) ou avec un scalpage autorisé (SD2)**
- Travail du sol (labour) avec fertilisation minérale (TS1) ou sans aucune fertilisation (TS2)**
- Zone mixte : mélange de systèmes SD et TS à l'échelle du paysage**
- SDC Pris en compte dans l'évaluation
- SDC* Prélèvement de sol et analyses microbiologiques

Figure 3 : Map of CA-SYS experimental site.

Figure 3 : Plan de la plateforme CA-SYS. Attribution des parcelles selon les SDC et les zones agroécologiques et identification des parcelles participant à l'évaluation.

2. Matériel et méthode

2.1. I-SITE : un réseau régional de systèmes de culture

Le réseau I-SITE est composé de 61 SDC qui ont été qualifiés comme AE. Situés en région Bourgogne Franche-Comté et pour la plupart, en grandes cultures, leur SDP sont plutôt proches (le climat est le même mais les types de sol sont différents) mais leurs objectifs et leurs stratégies de gestion sont très différents.

2.1.1. Description globale des systèmes et des stratégies

Le réseau se compose de sept agriculteurs partenaires, de la plateforme CA-SYS, de quatre lycées agricoles et de trois stations expérimentales du réseau ARTEMIS coordonnant plusieurs coopératives agricoles de la région. La Figure 2 présente leur localisation ainsi que leur composition en termes de nombre de SDC, de parcelles et de campagnes culturales prenant part dans l'évaluation.

La Figure 3 schématise la plateforme CA-SYS (*Co-designed Agroecological System experiment*) conçue sur l'unité expérimentale INRAE du domaine d'Epoisses à Bretenière. Son objectif est l'évaluation de SDC agroécologiques à plusieurs échelles. Elle a été conçue pour maximiser le recours aux processus biologiques et écologiques dans le but d'atteindre la multi-performance à un horizon de dix ans. Dans ce cadre, aucun produit phytopharmaceutique (PPP) n'est utilisé, ce qui signifie une rupture forte avec les systèmes actuels, et des aménagements paysagers (bandes fleuries, haies) ont été mis en place. Deux gestions de sol sont étudiées : le semis direct sous couvert permanent ou non permanent, et le travail du sol avec ou sans ajout de fertilisants. En parallèle, deux niveaux de diversification sont étudiés : une diversification temporelle (à l'échelle de la succession culturale) et spatiale (à la parcelle, mélange d'espèces/variétés). Les SDC sont agencés de façon à former trois zones agroécologiques pour permettre des études à l'échelle du petit territoire.

Les SDC de CA-SYS sont considérés comme des « points chauds » AE car ils atteignent un haut niveau de recours aux processus biologiques. Quant aux autres SDC, ils poursuivent en général un à trois objectifs dont les principaux sont : la diminution du recours aux intrants, et particulièrement aux PPP chimiques, l'amélioration de la qualité du sol pour conserver un « sol vivant » et le gain en autonomie azotée. Les stratégies adoptées sont diverses par le nombre et la nature des pratiques (diversification des rotations, diminution du travail du sol, en particulier le travail profond, maximisation de la couverture du sol avec des cultures intermédiaires et/ou du semi-direct etc.) mais aussi par le degré de leur mise en cohérence.

2.1.2. Base de données qui a permis l'étude et construction de typologies

Le tableau 2 résume l'ensemble des informations collectées sur les SDC au cours du projet. Les éléments de contexte de production, les objectifs et les stratégies, ainsi que le détail des itinéraires techniques (ITK) ont été obtenus grâce à des échanges avec les personnes en

Table 2 : List of the data gathered about the cropping systems (technical management and features of the cropping systems, soil parameters).

Tableau 2 : Liste des données collectées sur la conduite, les caractéristiques et les paramètres de sol des systèmes de culture du réseau. Les données en jaune ont été collectées pour les 61 SDC. Les données en italique sont cependant partielles (indisponibles pour certains SDC). Les données en bleu sont issues d'une campagne de prélèvements de sol réalisée sur la majorité (12/15) des sites (voir Figure 1). Les données en vert sont issues de la même campagne mais les analyses microbiologiques n'ont été réalisées que pour six SDC (voir Tableau 5).

Informations générales

Objectifs / stratégie générale

- Diminuer le recours aux intrants
- Diminuer le travail du sol
- Couvrir les sols au maximum
- Gagner en autonomie
- [...]

Rotation culturale

- Cultures principales
- *Composition des couverts*

Contexte pédoclimatique

SOL

- Texture du sol
- Taux de matière organique
- Profondeur de sol

CLIMAT

- Températures
- Précipitations
- Ensoleillement

Itinéraire technique

GENERAL

- Jour de l'intervention
- Débit de chantier
- Outils utilisé
- Proportion parcelle concernée

TRAVAIL DU SOL

- *Profondeur de travail*

SEMIS

- Espèce(s) / variété(s) semée(s)
- Densité de semis (kg/ha)

FERTILISATION

- Nom de l'intrant
- % *élément chimique*
- Quantité épandue (T ou L/ha)

PROTECTION DES CULTURES

- Nom du produit
- Quantité appliquée (kg ou L/ha)

RECOLTE

- Quantité récoltée (TMS/ha)
- Type de récolte
- *Destination de récolte*

Analyses bio-physico-chimiques des sols

Caractéristiques organiques et chimiques

- Matière organique (g/kg)
- Carbone organique (g/kg)
- Azote total (g/kg)
- Rapport C / N
- Phosphore P205 (g/kg)
- CEC (mé/kg)
- pH eau
- Carbonates totaux (g/kg)

Caractéristiques physiques

- Argiles fins / grossiers (g/kg)
- Limons fins / grossiers (g/kg)
- Sables fins / grossiers (g/kg)
- Refus à 2mm (%)

Analyses microbiologiques

- Description géonomiques des bactéries (nombre de séquences par taxons identifiés)

charge et le partage de leurs fiches techniques. Ces données ont été synthétisées en un format unique et sont assez complètes malgré quelques données manquantes. En parallèle, une campagne de prélèvements de sols a été réalisée sur la majorité des sites (Figure 1) pour caractériser les propriétés bio-physico-chimiques des sols des SDC. De plus, pour six SDC (Tableau 5), des analyses microbiologiques ont été réalisées.

Les données relatives aux ITK permettent de calculer les indicateurs de performance et les analyses microbiologiques permettent d'étudier les CMB. Les autres informations constituent des éléments d'interprétation. La première étape est de réaliser une typologie de ces derniers afin de faciliter leur utilisation dans l'interprétation des performances.

2.1.2.1 Une catégorisation des rotations en sept groupes

Les rotations présentes dans le réseau sont diverses par le nombre total d'espèces, le type de culture et leur saisonnalité, et la présence et la diversité des mélanges de couverts. Il semble judicieux de catégoriser ces rotations afin de faciliter les futures interprétations. Dans ce but, huit facteurs ont été choisis : les pourcentages dans la succession de céréales, de crucifères, de légumineuses, de graminées d'été (maïs) et d'oléoprotéagineux (soja et tournesol), la proportion de cultures précédées d'une culture intermédiaire, la présence d'une prairie temporaire d'au moins trois ans, et enfin, un indice de diversité. Cet indice est la somme du nombre d'espèces et du nombre de familles botaniques pour les cultures principales, à laquelle peut s'ajouter un bonus (de 1 à 3) selon la diversité des mélanges de couvert. Ces facteurs ont permis de réaliser une analyse en composante principale (ACP) suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) (package *FactorMineR*) en utilisant le critère de Ward (Annexe 1). Le tableau 3 résume les caractéristiques des sept groupes formés.

2.1.2.2 Identification de trois grands types de sol

De la même façon que pour les types de rotation, une typologie a été construite pour catégoriser les types de sol à partir des résultats des analyses bio-physico-chimiques. Tout d'abord, une matrice des corrélations a permis de remarquer la forte corrélation entre le carbone organique, l'azote total et le taux de MO, ainsi que la corrélation entre la CEC et le taux d'argile (Annexe 2.1). Les trois variables (C org., N tot. et CEC met.) ont été retirées pour éviter la redondance de leur information. Une ACP puis une CAH ont été réalisées sur les variables restantes (Annexe 2.2) ce qui a permis de constituer trois groupes dont la signification est résumée dans le tableau 5. Comme 11 sites seulement ont été échantillonnés, il est plus judicieux de restreindre le nombre de groupes au minimum afin qu'ils restent représentatifs.

Table 3 : Seven rotation categories, built from the crop successions followed by the cropping systems of the network.

Tableau 3 : Les sept catégories de rotations, construites à partir des successions culturales des systèmes de culture du réseau.

CBO	Rotation courte colza-blé-orge (CBO)
CBO_IC	Rotation courte CBO avec une interculture (IC)
CBO_OP	Rotation CBO allongée avec l'ajout d'un oléoprotéagineux (soja ou tournesol)
Div1	Rotation diversifiée avec 5 à 7 espèces différentes, 15% d'oléoprotéagineux et 15 à 50% de légumineuses
Div2	Rotation diversifiée avec 10 à 11 espèces différentes, 40 à 75% de cultures précédées d'une IC et 15 à 30% de légumineuses
Div3	Rotation diversifiée avec 8 à 10 espèces différentes, présence de tous les types de culture et 8% de cultures précédées d'une IC
PT	Rotation comprenant 3 ou 4 ans de prairie temporaire

2.2. Calcul des indicateurs de performance et méthodes d'analyse

2.2.1. Calcul des indicateurs à partir de référentiels

Tous les indicateurs sont rapportés à l'hectare. En effet, travailler à l'échelle du SDC signifie d'étudier les résultats d'une combinaison de pratiques, résultante d'une stratégie de gestion, qui ne dépend pas nécessairement de la surface concernée.

2.2.1.1 Indicateur de fréquence de traitement (IFT)

Tous les PPP vendus et utilisés en France sont référencés par un numéro d'autorisation de mise sur le marché (AMM). A chacun de ces numéros correspond une ou plusieurs doses homologuées selon la culture et/ou le bioagresseur. Ces valeurs sont disponibles en ligne à partir de l'atelier de calcul du MAA (2020). Nos données n'indiquant pas les bioagresseurs ciblés par les traitements, c'est l'IFT à la culture qui est calculé en utilisant la plus faible dose homologuée à la cible pour une culture donnée. Tout d'abord, l'IFT est calculé pour une parcelle pour une campagne culturale : c'est la somme des ratio « dose appliquée » sur « dose de référence » pour chaque produit, multiplié par la proportion de surface de parcelle traitée. Pour les produits dont le nom ne correspondait à aucun numéro AMM, une valeur par défaut de 1 a été attribuée. Dans le cas du calcul de l'IFT « avec traitement de semence », une valeur de 1 est ajoutée à la valeur finale s'il y a au moins une utilisation de semences traitées. Enfin, l'IFT pour un SDC est la moyenne des valeurs des IFT de toutes les parcelles et toutes les campagnes culturales.

2.2.1.2 Marge semi-nette et robustesse économique

La MSN, en €/ha, est calculée comme la différence entre le produit issu de la récolte et les coûts de production (somme des charges opérationnelles et des charges de mécanisation). Les produits correspondent aux valeurs de rendement multipliées par leur prix de vente ; les charges opérationnelles correspondent aux quantités d'intrants utilisés multipliées par leur prix d'achat ; les charges de mécanisation correspondent aux coûts associés aux outils utilisés.

Les références de prix de vente des récoltes et des coûts de production ont été obtenues depuis la plateforme AGROSYST d'INRAE. Créé en association avec le réseau DEPHY (plan Ecophyto), il s'agit d'un système d'information dont le but est de capitaliser les connaissances sur les systèmes agricoles et de les mettre à disposition. La plateforme permet également le calcul d'indicateurs de performances sociotechniques et économiques. Pour cela, elle contient un référentiel de prix qui se décline en 10 séries appelées « scénarios ». Ces scénarios représentent 10 années contrastées au niveau des prix du marché (entre 2005 et 2017) et sont calculés selon des indices de prix fournis par l'INSEE : les indices des prix des produits agricoles à la production (IPPAP) et ceux des prix d'achat des moyens de production agricole (IMPAMPA). 10 prix sont donc disponibles pour chaque culture selon le type de production et pour un très grand nombre de PPP et fertilisants organiques. Pour les fertilisants minéraux, ce sont les prix par élément chimique et il faut calculer le prix des produits à partir de leur forme

Table 4 : Normalization formulas using re-scaling method, according to the type of indicator.

Tableau 4 : Formules de normalisation par redimensionnement (re-scaling) selon le type d'indicateur. D'après Nardo et al. (2005).

Indicateur croissant Marge semi-nette (MSN) Robustesse éco. (RE)	$x' = \frac{x - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}$
Indicateur décroissant IFT Temps de travail (TT)	$x' = \frac{\max(X) - x}{\max(X) - \min(X)}$

Où x est la valeur de l'indicateur, X l'ensemble des valeurs qu'ils peut prendre, et x' la valeur normalisée de l'indicateur.

et de leur composition. Les charges de mécanisation sont calculées à partir du matériel déclaré par les utilisateurs de la plateforme et leur niveau d'utilisation. Elles correspondent aux coûts fixes liés à l'amortissement du matériel et aux coûts variables comme la consommation de carburant et les réparations. Elles ne prennent pas en compte le coût de la main d'œuvre. Les valeurs pour ces charges sont donc très spécifiques aux outils utilisés par les agriculteurs. Or, dans notre base de données, les informations sur le matériel se rapportent souvent à une grande catégorie d'outils (eg : pulvérisateur) sans mention des dimensions ou de la puissance du tracteur. Pour chaque grand type d'outils, la charge de mécanisation retenue est donc la médiane des valeurs disponibles dans AGROSYST.

Pour chaque SDC, la moyenne des MSN par parcelle et par campagne culturale a été calculée pour chaque scénario de prix. Ces 10 valeurs permettent de calculer la robustesse économique (RE) : c'est le ratio de la moyenne et de l'écart-type des MSN selon les scénarios de prix (Lechenet et al., 2014).

2.2.1.3 Temps de travail

Le temps travail (TT) en h/ha est la somme des temps par hectare de chaque opération culturale. Cette valeur est calculée à partir des valeurs de débit de chantier (ha/h) de la base de données d'AGROSYST. Ces données sont directement renseignées par les utilisateurs de la plateforme pour chaque outils. De même que pour les charges de mécanisation, ces valeurs peuvent fortement varier au sein d'une même catégorie d'outils. La médiane pour chaque grand type d'outils a donc été utilisée comme valeur de référence.

2.2.2. Les méthodes d'analyse des résultats des indicateurs

Pour étudier les performances à l'échelle du SDC, on analyse les indicateurs calculés pour chaque parcelle et chaque campagne culturale, puis moyennés sur l'ensemble du SDC. La variabilité d'un indicateur au sein d'un SDC est représentée grâce à des diagrammes en boîtes (construits selon la médiane, les quartiles et les déciles). Pour la MSN, c'est la variabilité selon la volatilité des prix qui est représentée. Des diagrammes en barres permettent de représenter la valeur des indicateurs par SDC et d'apprécier la distribution des performances au sein du réseau. Un découpage par catégories (de produit ou d'activité) est réalisé afin d'apporter des éléments d'interprétation. Puis, les relations deux à deux entre les indicateurs sont étudiées. Pour cela, des graphiques en nuages de points dans un espace à deux dimensions sont analysés. Enfin, les SDC sont classés selon leur multi-performance, c'est-à-dire, en prenant en compte simultanément les résultats de chaque indicateur. Pour cela, une étape de normalisation est nécessaire afin que les indicateurs aient tous le même poids et s'expriment sur une échelle commune. La méthode utilisée est le redimensionnement (Nardo et al., 2005) en utilisant les valeurs extrêmes. Dans le cas de l'IFT et du TT, c'est la plus faible valeur qui représente la meilleure note ; pour la MSN et la RE, c'est l'inverse (voir Tableau 4). Ensuite, il s'agit de

classer les SDC selon leur moins bonne performance : la moins bonne note sur l'ensemble des critères devient la note finale. Ce principe permet d'identifier les SDC les plus performants comme ceux qui concilient au mieux tous les critères ; c'est-à-dire, sans en négliger un au profit d'un autre. Il est inspiré du procédé multicritère interactif de (Gabrel et al., 2002) et notamment utilisé dans l'outil d'aide à la décision DECID'HERB (Savois et al., 2003). Enfin, les caractéristiques des meilleurs SDC sont présentées sous forme d'un tableau récapitulatif.

2.3. Analyse des données de microbiologie des sols

2.3.1. Prélèvement des sols et analyse métagénomique ciblée

Les méthodes d'analyse de métagénomique ciblée sont de plus en plus utilisées pour étudier la diversité des espèces présentes dans un écosystème. Elles consistent en une extraction de l'ADN d'un échantillon environnemental, puis à l'amplification d'un fragment cible. Ce fragment est présent chez tous les taxons concernés par l'analyse, mais sa séquence varie selon les taxons. Après avoir déterminé ces séquences (séquençage), il est possible d'identifier le taxon auxquelles elles appartiennent (assignation taxonomique) en faisant la correspondance avec une base de référence (Falentin et al., 2019). Pour cibler les bactéries (micro-organismes procaryotes), c'est le fragment correspondant au gène codant pour l'ARNr 16S qui est le plus utilisé. En effet, ce gène est ubiquitaire dans le monde du vivant mais présente suffisamment de variabilité pour refléter les relations phylogénétiques entre les bactéries (Woese et al. 1990). Il est donc considéré comme un marqueur de choix pour l'assignation taxonomique.

En 2018 et 2019, des prélèvements de sol ont été réalisés sur six SDC du réseau. L'objectif initial était de caractériser les microorganismes telluriques en présence d'une culture de céréale (2018) puis d'une culture de pois (2019) et d'étudier l'impact des pratiques agricoles sur la composition de leurs communautés. Des prélèvements de sol nu (au niveau des inter-rangs) et de sol rhizosphérique (récupéré après lavage des racines issues d'une motte de terre avec un plant) ont été réalisés à différents moments de l'année (mai, juin et novembre). Pour chaque échantillonnage, cinq répétitions ont été réalisées. Puis, les échantillons ont été analysés par métagénomique ciblée sur le gène 16S et les assignations taxonomiques ont été faites pour cinq niveaux phylogénétiques : l'embranchement, la classe, l'ordre, la famille et le genre. Afin de rendre les échantillons comparables entre eux, il est nécessaire d'avoir le même nombre de séquences totales. Pour cela, dix milles séquences sont prises au hasard pour chaque échantillon. Le nombre de séquences pour chaque taxon est ensuite déterminé. Notre objectif est de voir, à partir de ces données, s'il est possible d'identifier des taxons particuliers qui soient liés à des pratiques agricoles et/ou indicatrices de performance. Pour cela, il s'agit tout d'abord de tester l'effet de différents facteurs, liés au système de culture et aux pratiques agricoles, sur les compositions microbiennes. Puis, de voir si l'on peut trouver des taxons qui s'expriment différemment selon les modalités de ces facteurs.

Table 5 : List of the factors chosen for the taxonomic composition analysis of soil microbial communities, with their modalities and significance.

Tableau 5 : Liste des facteurs choisis pour l'étude taxonomique des communautés microbiennes, avec leurs modalités et leur signification.

FACTEUR		MODALITES	SIGNIFICATION
Système de culture	SDC	Noms des systèmes	CA-SYS_1, CA-SYS_9, Agri_4, Agri_5, Lycée QP, Station FT4
Année	A	2018	Campagne culturale avec une céréale
		2019	Campagne culturale avec un pois
Mois	M	Mai ; Juin ; Novembre	
Répétition	REP	Numéro de la répétition	Jusqu'à 5 répétitions par parcelle
Type de prélèvement	NR	Sol nu	Prélèvements dans un interrang
		Sol rhizosphérique	Prélèvements au niveau d'un plant après lavage des racines
Caractéristiques physico-chimiques du sol	PC	Type_1	Limoneux-sableux, taux de MO bas, ratio C/N élevé, pH moyen de 6.7
		Type_2	Argileux-limoneux, taux de MO bas, ratio C/N élevé, pH moyen de 7.7
		Type_3	Argileux-limoneux calcaire, taux de MO élevé, pH moyen de 8.2
Profondeur de sol	PR	Superficiel	Profondeur de sol inférieure à 50 cm
		Profond	Profondeur de sol supérieure à 50 cm
Type de rotation	ROT	Div1	Rotation diversifiée avec 5 à 7 espèces différentes, 15% d'oléoprotéagineux et 15 à 50% de légumineuses
		Div2	Rotation diversifiée avec 10 à 11 espèces différentes, 40 à 75% de cultures précédées d'une IC et 15 à 30% de légumineuses
		PT	Rotation incluant des prairies temporaires (3-4 ans)
Type de travail de sol	TS	Aucun travail	Jamais de travail de sol
		Sans labour	Jamais de labour mais travail superficiel
		Labour occasionnel	Systèmes qui labourrent 40 à 70% du temps
Type de fertilisation	FE	Fmin	Fertilisation minérale uniquement
		Fmixte	Fertilisation minérale et organique
		Forg	Fertilisation organique très majoritairement
IFT herbicides	HE	HE_nul	Aucun herbicide utilisé
		HE_moy	IFT herbicide de l'ordre de 1
		HE_fort	IFT herbicide de l'ordre de 2
IFT insecticides	IN	IN_nul	Aucun insecticide utilisé
		IN_moy	IFT insecticide allant de 0.1 à 1
		IN_fort	IFT de l'ordre de 2
IFT fongicides	FO	FO_nul	Aucun fongicide utilisé
		FO_moy	IFT fongicide de l'ordre de 0.5
		FO_fort	IFT fongicide de 1

2.3.2. Choix des facteurs à tester

Le tableau 5 présente la liste des facteurs qui ont été choisis. Ce choix a été fait selon leur pertinence, décrite dans la littérature, mais aussi en fonction des informations disponibles dans la base I-SITE (Tableau 1). Les facteurs quantitatifs ont été discrétisés pour permettre les analyses statistiques ultérieures. Les facteurs ‘Année’ (A), ‘Mois’ (M), ‘Répétition’ (REP) et ‘Type de prélèvement’ (NR) sont directement liés au plan d’expérimentation et permettent de quantifier son influence. Les facteurs ‘Caractéristiques physico-chimiques’ (PC) et ‘Profondeur de sol’ (PR) sont liés au contexte de pédologie ; les modalités de PC correspondent aux groupes construits préalablement (Section 2.1.1.2). Les autres facteurs sont liés à la conduite des SDC. Les ‘Type de rotation’ (ROT) correspondent aux groupes construits précédemment (Section 2.1.1.1) ; les facteurs ‘Type de travail de sol’ (TS) et ‘Type de fertilisation’ (FE) sont construits à partir des itinéraires techniques. TS se base sur la fréquence moyenne d’intervention de travail du sol au niveau du SDC, et FE sur la quantité moyenne de fertilisants épanchée. Enfin, les trois facteurs relatifs à l’IFT (‘herbicides’ (HE), ‘insecticides’ (IN) et ‘fongicides’ (FO)) sont fondés sur les résultats de calcul de l’indicateur IFT (Section 3.1.1.1). Pour ces trois cas (TS, FE et IFT) trois modalités ont été retenues à chaque fois. Contrairement aux facteurs PC et ROT, ce groupement est basé uniquement sur les résultats des six SDC concernés par les analyses microbiologiques, c’est-à-dire, sans prendre en compte les résultats des autres SDC du réseau. En effet, il semblait plus judicieux de construire des groupes contrastés pour ces six SDC afin de maximiser les chances d’observer une différence au niveau des CMB.

2.3.3. Méthodes statistiques

L’assignation taxonomique a permis d’identifier 58 phylums, 125 classes, 257 ordres, 444 familles et 1439 genres bactériens, et de déterminer leur abondance. Pour chaque facteur et chaque niveau, un test d’indépendance par permutation est réalisé. Cette méthode permet de baser l’hypothèse nulle sur une distribution empirique (conditionnelle aux données observées) dans le cas où les données ne reflètent pas de distribution particulière. Sous l’hypothèse nulle, toute permutation des données est « également probable » et le facteur de groupement n’a pas d’effet. Si la p-value est suffisamment basse, on rejette cette hypothèse et on peut considérer qu’il y a un effet du groupe testé. Dans notre cas, le nombre de permutations possibles est très élevé, c’est pourquoi un seul échantillon de permutations est constitué en employant une approche de Monte Carlo. Puis, une analyse NMDS (*Non-Metric Multidimensional Scaling*) permet d’obtenir une représentation graphique des échantillons. En se basant sur les similarités ou les dissimilarités entre individus selon le nombre total des séquences, elle permet d’obtenir un nuage de points qui s’ajuste au mieux selon les proximités observées (Desbois, 2005). Il est possible de projeter les modalités de facteurs intéressants sur le nuage afin d’apprécier leur influence sur la distribution. Pour cela, des ellipses centrées selon le barycentre des points sont tracées. Enfin, une analyse d’expression différentielle de gènes est réalisée avec la fonction

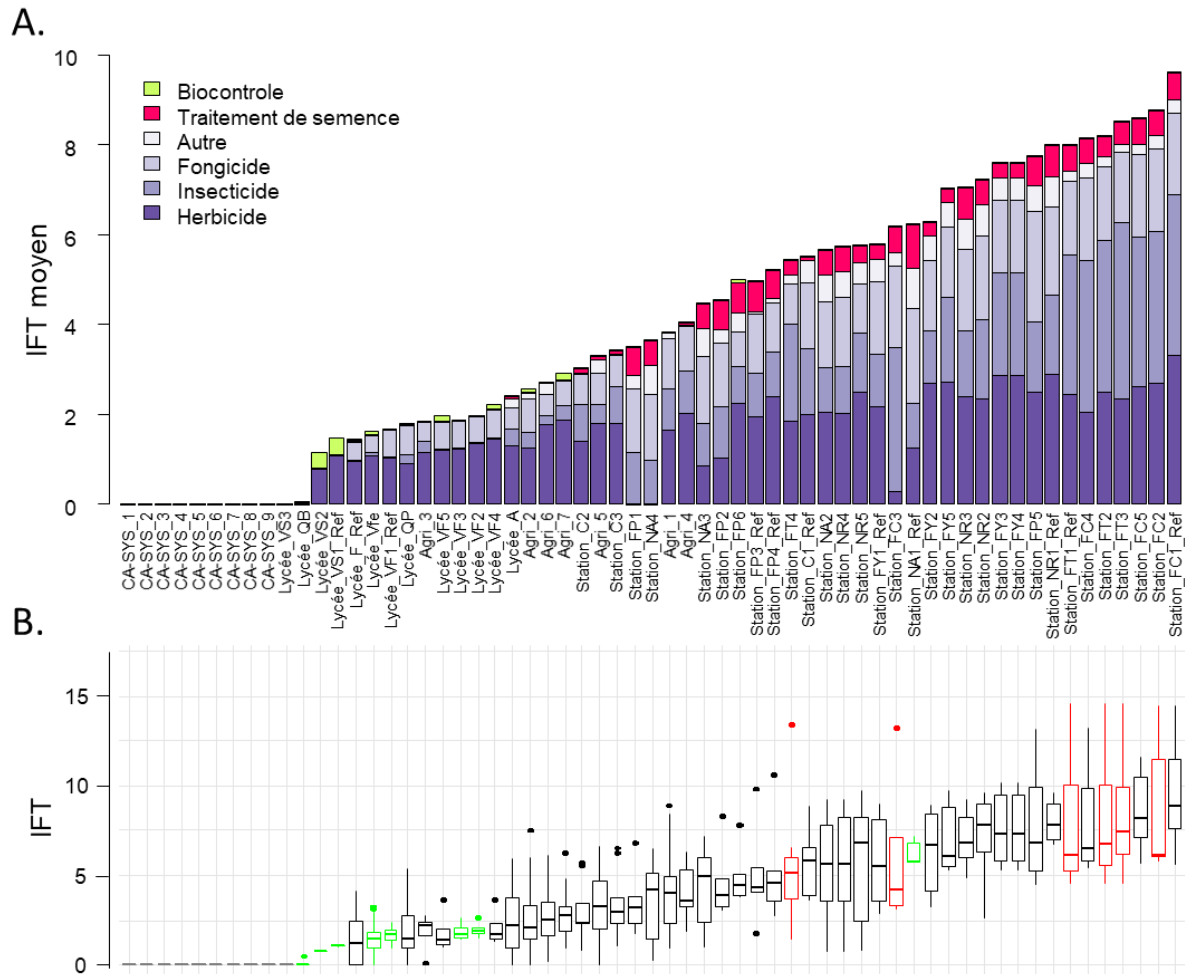


Figure 4 : Average treatment frequency indices (TFI) values for the 61 cropping systems of the network.

Figure 4 : Valeurs des indices de fréquence de traitement (IFT) pour les 61 systèmes de culture du réseau. Les SDC sont rangés par ordre croissant selon leur IFT moyen. A) Diagramme en barres qui présente la valeur moyenne de l'IFT total avec une distinction en couleur selon le type de PPP utilisé. B) Gradient de diagrammes en boîte qui représentent la distribution des valeurs d'IFT chimique (sans les produits de biocontrôle) pour chaque SDC (en fonction des parcelles et des campagnes culturales). Les boîtes rouges correspondent à des écart-types supérieurs à 3,5 et les boîtes vertes, à des écart-types inférieurs à 1.

DESeq2 (*Differential expression analysis based on the Negative Binomial Distribution*) du package *DESeq2*. Cette méthode normalise les échantillons, permet de comparer les modalités deux à deux et renvoie les taxons différentiellement présents en se basant sur un modèle de distribution binomiale.

3. Résultats

3.1. Analyse des indicateurs de performance

3.1.1. Comparaisons des performances des systèmes de culture

3.1.1.1 Un fort gradient selon l'indice de fréquence de traitements

La figure 4.A montre les valeurs d'IFT moyennes pour chaque SDC avec une distinction selon les PPP utilisés. Les valeurs sont très dispersées ($CV = 73\%$) et vont de 0 à 9,6 pour une moyenne de 4. Il existe donc un fort gradient de l'utilisation de PPP avec des valeurs relativement extrêmes. En effet, en Bourgogne Franche-Comté, la valeur de référence d'IFT moyenne pour les grandes cultures est de 4,6 (DRAAF, 2021). Les valeurs les plus hautes dans le réseau (autour de 9) représentent donc le double de cette valeur de référence, ce qui est particulièrement élevé. Pour les SDC dont l'IFT n'est pas nul, la proportion de l'IFT herbicides représente 45% de l'IFT total et son CV est de 47%. La variabilité des IFT insecticides et fongicides est plus élevée avec des CV de 108% et 71% respectivement. En conséquence, la proportion des IFT herbicides est d'autant plus forte que l'IFT total est faible. Cela suggère, comme décrit par Lechenet (2014), une plus forte difficulté à diminuer le recours aux herbicides par rapport aux autres PPP. De plus, parmi les SDC avec un IFT faible (non nuls et inférieurs à 3), sept utilisent des produits de biocontrôle. Ils mettent en place une stratégie de substitution des intrants chimiques par des intrants moins dommageables pour l'environnement, une stratégie que l'on ne retrouve pas chez les SDC à plus fort IFT.

Les systèmes CA-SYS ont pour objectif de n'utiliser aucun PPP et Lycée_QB est en agriculture biologique ; ils présentent donc des IFT nuls. L'IFT de Lycée_VS3 est également nul, ce qui s'explique par le fait qu'il soit en prairie et la pression en PPP est généralement moindre pour ce type de culture. Pour le reste du réseau, la variabilité de l'IFT entre les SDC peut s'expliquer par les cultures présentes dans les rotations : l'IFT varie en fonction de la culture implantée (Annexe 3.A). Par exemple, l'IFT moyen du colza est trois fois plus élevé que l'IFT moyen du maïs. Cependant, ce n'est pas le seul facteur puisque, pour une même culture, la variabilité peut aussi être très importante ($CV = 64\%$ pour l'IFT colza). Cette variabilité peut être également liée aux choix stratégiques du pilote qui influencent la pression en bioagresseurs. En effet, le niveau de diversification des rotations, le choix des variétés ou encore le recours au désherbage mécanique sont autant de pratiques qui impactent les populations d'adventices et de pathogènes. De façon plus indirecte, ces choix stratégiques sont liés au contexte pédoclimatique de

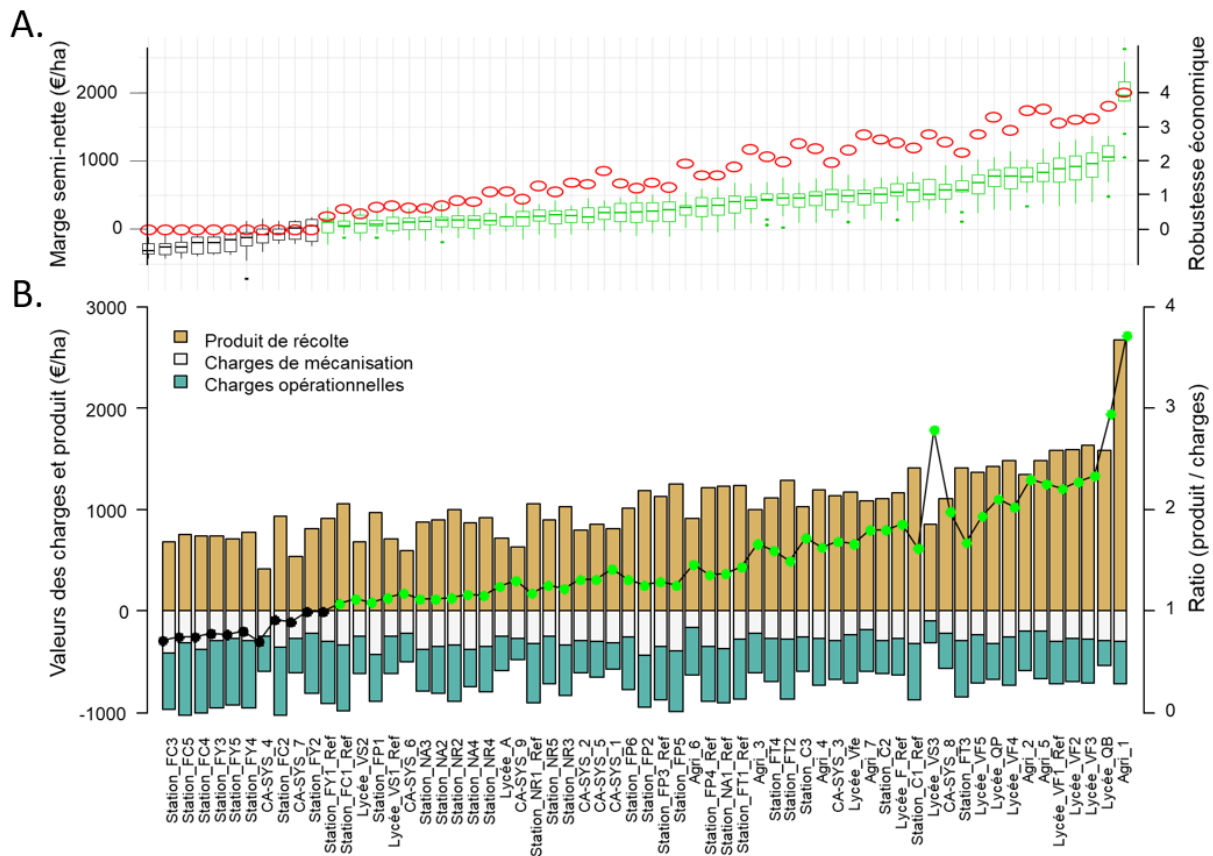


Figure 5 : Average semi-net margins (SNM) and economic robustness values for the 61 cropping systems of the network.

Figure 5 : Valeurs des marges semi-nettes et de robustesse économique pour les 61 systèmes de culture du réseau. Les SDC sont rangés par ordre croissant de leur MSN moyenne. A) Axe de gauche : gradient de diagrammes en boîte qui représentent la distribution des valeurs de MSN selon les scénarios de prix. Les boîtes vertes correspondent aux MSN positives et les boîtes noires, aux MSN négatives. Axe de droite : valeurs moyennes de la robustesse économique. La valeur de 0 a été attribuée pour tous les SDC avec une MSN moyenne négative. B) Axe de gauche : Diagramme en barres qui présente les valeurs moyennes des produits de récolte, des charges de mécanisation et des charges opérationnelles. Axe de droite : valeurs du ratio produit moyen / charges moyennes. Les points verts sont relatifs aux MSN positives et les points noirs, aux MSN négatives.

l'exploitation, à l'historique des parcelles (eg : accumulation de pathogènes due à des pratiques antérieures), mais aussi aux pratiques et à l'état des parcelles des exploitations voisines (eg : dispersion de graines adventices depuis un champ limitrophe).

La figure 4.B permet d'apprécier la variabilité de l'utilisation de PPP des SDC selon la parcelle et/ou la campagne culturale. Les SDC en rouge présentent une forte variabilité, ce qui suggère que l'utilisation de PPP dépend beaucoup de la parcelle, de la culture en place et/ou des aléas climatiques. Les SDC en vert varient peu et sont donc plus stables, ce qui peut s'expliquer soit par un plan de traitement préétabli, et donc peu raisonné en fonction des pressions de bioagresseurs, soit par une plus grande robustesse du SDC vis-à-vis des aléas.

3.1.1.2 Marge semi-nette et robustesse

La figure 5.A montre la distribution des valeurs de MSN selon les scénarios de prix d'achat et de vente ainsi que la valeur moyenne de la RE pour chaque SDC. Les valeurs de MSN moyennes vont de -283 €/ha à 1951 €/ha avec une moyenne de 313 €/ha. Le CV s'élève à 123% et traduit une très grande disparité entre les SDC. Pour les 11 systèmes en déficit (MSN < 0), les produits issus des récoltes sont inférieurs aux charges (ratio produit / charges < 1). Pour les six SDC aux MSN les plus faibles, cela est surtout dû à des charges opérationnelles élevées (1,4 fois supérieures à la moyenne) et donc à un recours aux intrants important. L'augmentation de la MSN moyenne en fonction des SDC est davantage liée à une augmentation des produits (CV = 33%) qu'à une diminution des charges (CV = 21%). Cependant, certains SDC tels que Agri_6 et Agri_3 ont des produits assez faibles (912 €/ha et 1005 €/ha, par rapport à la moyenne de 1062 €/ha) et parviennent quand même à de bonnes MSN (288 €/ha et 400 €/ha). Ces SDC sont plutôt efficaces, c'est-à-dire qu'ils produisent beaucoup avec peu de moyen. Cela est principalement dû à un faible recours aux intrants et à l'absence de travail de sol (Agri_6). Également, Lycée_VS3 apparaît comme un SDC très efficace : il présente les charges les plus faibles (2,5 fois inférieures à la moyenne) et une MSN élevée (546 €/ha soit 1,7 fois supérieure à la moyenne). Ces faibles charges s'expliquent par la présence d'une prairie temporaire dans la rotation, dont la conduite implique généralement des interventions peu coûteuses. Concernant les SDC rentables (MSN > 0), la variabilité des MSN entre SDC peut s'expliquer par les espèces cultivées et surtout par le type de récolte. L'annexe 4 permet de voir que les produits issus d'une valorisation en production de semences sont les plus élevés (en moyenne 4192 €/ha, soit presque 4 fois plus que ceux issus d'une valorisation en grain dont le produit moyen est 1086 €/ha). C'est notamment ce qui explique la très forte MSN de Agri_1 (6,2 fois supérieure à la moyenne) qui consacre en général 60% de sa surface à de la production de semences. Cependant, le calcul de la MSN ne prend pas en compte les charges spécifiques à cette activité (eg : la main d'œuvre nécessaire pour la castration du maïs), ce qui crée certainement un biais pour la performance économique de Agri_1.

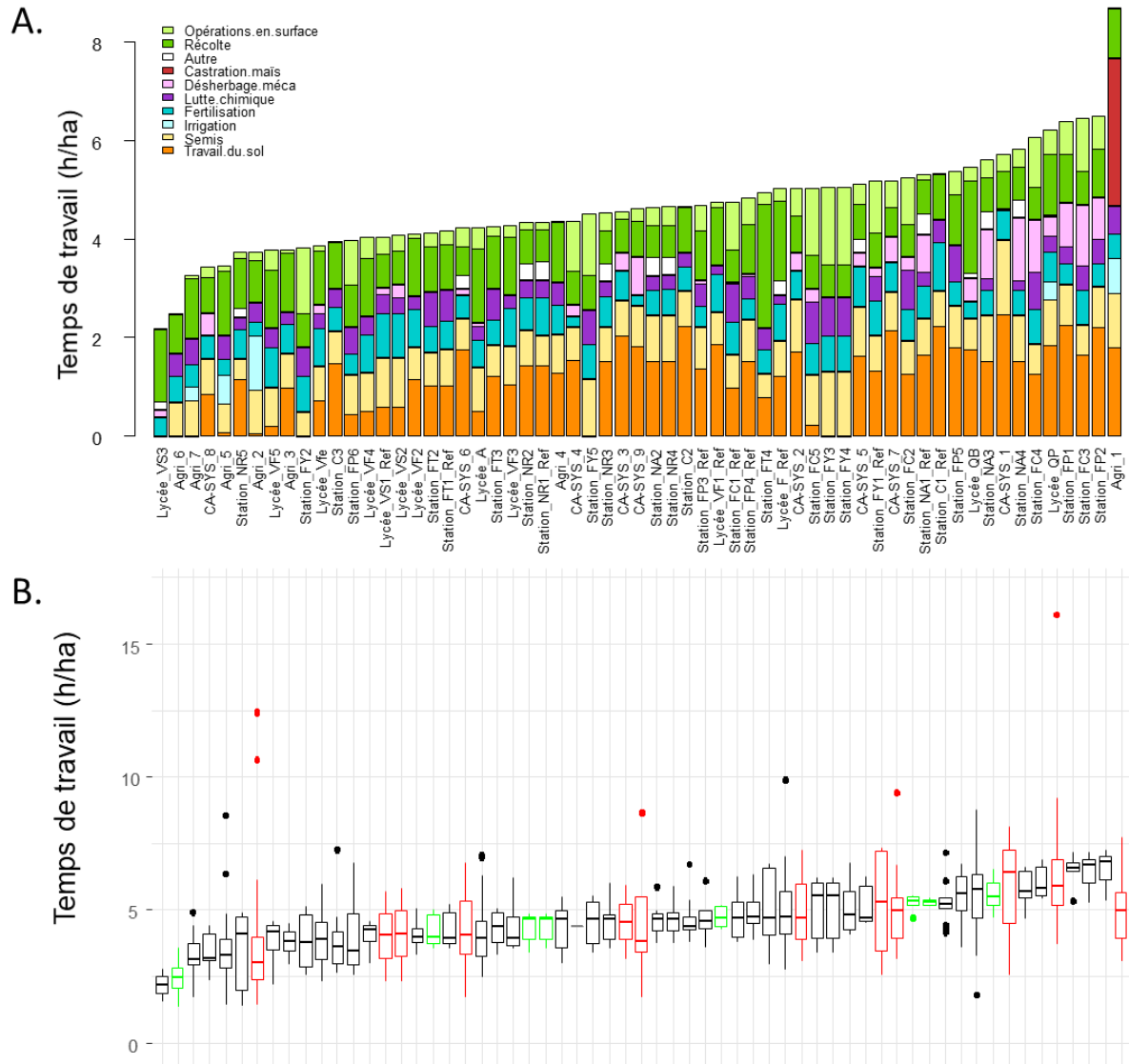


Figure 6 : Average working time values for the 61 cropping systems of the network.

Figure 6 : Valeurs de temps de travail moyen pour les 61 systèmes du réseau. Les SDC sont rangés par ordre croissant selon leur TT moyen. A) Diagramme en barres qui présente la valeur moyenne du TT total avec une distinction en couleur selon le type d'intervention ('Opérations en surface' comprend le broyage des résidus et le roulage, 'Autre' comprend le broyage de cailloux, l'éparage, le pâturage des animaux et la lutte biologique). B) Gradient de diagrammes en boîte qui représentent la distribution des valeurs du TT pour chaque SDC (en fonction des parcelles et des campagnes culturales). Les boîtes rouges correspondent à des écart-types supérieurs à 2 et les boîtes vertes, à des écart-types inférieurs à 0,5. Des valeurs extrêmes de Agri_1 ont été retirées afin de faciliter la lecture graphique (six valeurs : 24,4, 24,6, 24,7, 27,5, 28,5 et 33,8).

L'écart-type des MSN selon les scénarios de prix varie de 105 €/ha à 461 €/ha. Cela signifie que la MSN de certains SDC est plus sensible que d'autres aux fluctuations des prix du marché. Cependant, il est crucial de rapporter cette variation à la MSN moyenne du SDC : par exemple, une variation de 100 €/ha ne représente pas la même chose pour Station_NR2 (MSN moyenne à 115 €/ha) que pour Agri_1 (MSN moyenne 1951 €/ha). C'est ce qu'illustre l'indicateur RE : il varie de 0 à 4,2 avec une moyenne de 1,7 (les SDC avec une MSN négative ont par défaut une RE de 0 car il semble peu pertinent d'évaluer la robustesse d'un système en déficit). Le graphique suggère une corrélation positive forte entre RE et MSN, avec quelques variations qui permettent d'identifier les SDC les plus efficaces. Par exemple, Agri_6 a une RE plus élevée que ses voisins Station_FP5 et Station_FP4_Ref avec une MSN moyenne similaire. Cela est due à une plus grande efficacité de production (un ratio produit / charges plus élevé).

3.1.1.3 Temps de travail

La figure 6.A montre les valeurs de TT moyennes pour chaque SDC avec une distinction selon les interventions. Les valeurs s'étendent de 2,2 h/ha à 8,7 h/ha. En exceptant ces deux extrêmes, les valeurs sont peu dispersées (CV de 17%) et leur moyenne est de 4,7 h/ha. Dans un premier temps, il semble que les différences de TT entre SDC puissent s'expliquer par le temps consacré au travail du sol. En effet, d'après l'annexe 5, le TT relatif à ces opérations représente 25% du TT total et d'après la figure 6.A, il varie beaucoup entre les SDC (CV = 60%). Cependant, certains SDC (eg : Stations_FY2, FY3 et FY4) ne pratiquent aucun travail du sol mais implantent des couverts ; un TT supplémentaire, dû à la gestion de ces couverts (semis et 'Opérations en surface'), compense le TT épargné en travail de sol. La récolte représente aussi une part importante (20%, annexe 5) du TT total mais varie peu entre les SDC (CV = 20%). En effet, la plupart des SDC sont en grandes cultures et récoltent principalement du grain et de la paille avec une moissonneuse. Pour Station_FT4, qui présente des TT associés à la récolte plus élevés, cela est dû à la présence dans la rotation d'une prairie temporaire de 3 ans en luzerne, qui implique des opérations supplémentaires (fanage et andainage) et plusieurs récoltes par an. Pour les SDC aux TT compris entre 5 et 6 h/ha, il y a une part importante de désherbage mécanique en plus de la lutte chimique qui suggère une difficulté particulière pour à lutter contre les adventices.

La figure 6.B représente la variabilité du TT en fonction des parcelles et des campagnes culturales. Elle est surtout élevée pour Agri_1 (écart-type de 8,6), ce qui est dû aux pics de travaux lors de la castration du maïs. Elle est très stable pour les 8 SDC en vert (écart-types inférieurs à 0,5) qui correspondent en majorité à des stations expérimentales. Cette faible variabilité peut s'expliquer par la rigueur particulière dans la mise en œuvre des ITK expérimentaux, notamment si l'objectif est de comparer des pratiques AE toutes choses égales par ailleurs.

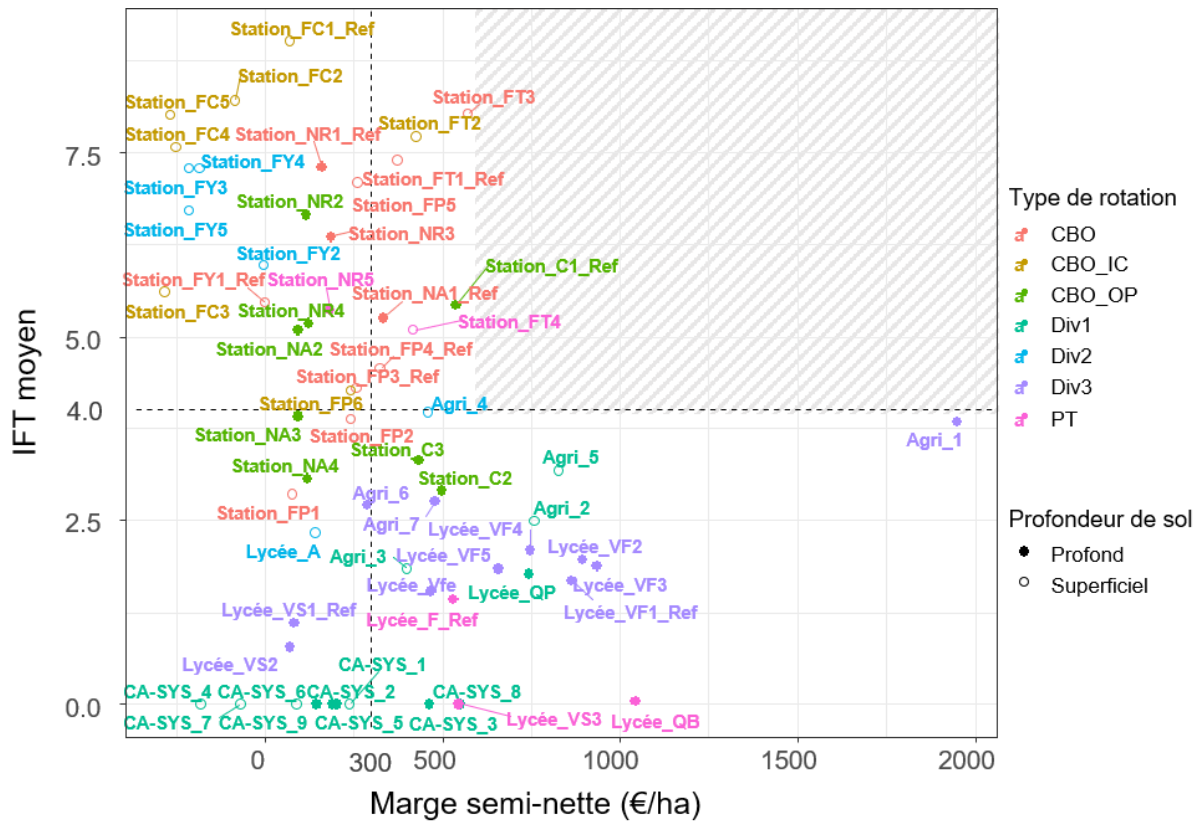


Figure 7 : Average TFI values according to the average semi-net margin values, with a distinction by colors according to the category of crop rotation and a distinction by shape according to the depth of soil.

Figure 7 : IFT moyen en fonction de la marge semi-nette moyenne avec une distinction par couleurs selon le type de rotation et une distinction par forme de point selon la profondeur de sol (supérieure ou inférieure à 50 cm). Les lignes pointillées indiquent les valeurs moyennes sur l'ensemble du réseau de l'IFT et de la MSN.

3.1.2. Etude des relations entre les indicateurs

Il s'agit maintenant d'étudier les relations entre ces indicateurs selon les performances des SDC du réseau. La RE a été volontairement écartée de la suite des analyses pour éviter une redondance avec la MSN et donner un poids plus important à la dimension économique.

3.1.2.1 Compromis entre IFT et marge semi-nette

La figure 7 montre l'IFT en fonction de la MSN pour chaque SDC. Exceptés les systèmes CA-SYS, tous les SDC avec une MSN négative ont des valeurs d'IFT élevées (6,9 en moyenne). De plus, il n'existe pas de SDC qui présente à la fois un IFT élevé et une MSN élevée (ie : aucun point dans la zone grise). Pour les SDC en sols profonds (profondeur supérieure à 50 cm), il semble que la diminution de l'IFT s'accompagne d'une augmentation de la MSN (ou du moins, d'une équivalence). C'est également ce qu'observe Deytieux (2017) en comparant la rentabilité et la dépendance aux pesticides à l'échelle du SDC. En effet, la diminution du recours aux PPP peut entraîner une baisse des rendements, due à une plus forte pression en bioagresseurs, mais elle entraîne aussi une baisse des charges opérationnelles. Une corrélation positive entre une diminution de l'IFT et une augmentation de la MSN peut s'expliquer par une faible baisse de rendement grâce à l'adoption de pratiques AE (qui favorisent la mobilisation des processus écologiques régulateurs de la pression en bioagresseurs). Les SDC en sols superficiels (profondeur inférieure à 50 cm) présentent, en moyenne, des MSN faibles (négative pour 11 d'entre eux) et des IFT élevés (supérieurs à 6 pour 11 d'entre eux). Le fort recours aux PPP peut s'expliquer par une plus forte pression en bioagresseurs pour ces SDC. L'augmentation concomitante des charges opérationnelle n'est cependant pas compensée par les produits. Il est probable que cela soit lié à leurs sols superficiels : le potentiel de rendement est plus faible dans les sols superficiels (la réserve en eau et en nutriments s'améliore avec la profondeur du sol, ce qui conditionne la croissance et la santé des plantes, Rajakaruna et al., 2019).

Les SDC qui n'utilisent aucun PPP (IFT nul) présentent des MSN plutôt faibles (inférieures à la moyenne, voire négatives). C'est le cas des systèmes CA-SYS. En effet, ces SDC sont en rupture forte avec les intrants chimiques et le travail du sol ; ils expérimentent des pratiques jusqu'à aujourd'hui très peu concluantes économiquement (eg : semis direct sous couvert sans herbicide). De plus, ils sont récents (2017) : ils manquent de recul et ne bénéficient certainement pas encore des processus biologiques qu'ils sont censés favoriser.

En s'intéressant aux types de rotation, on remarque que 75% des SDC type CBO (CBO, CBO_IC et CBO_OP), ont des IFT supérieurs à la moyenne (Figure 7). De plus, 70% de ces mêmes SDC ont des MSN inférieures à la moyenne. Cela suggère que les rotations courtes impliquent une plus forte pression en bioagresseurs et limitent à la fois les performances économiques. A l'inverse, tous les SDC avec des rotations type Div1 et Div3 ont des IFT inférieurs à la moyenne. Cela suggère que la diversification de la rotation permet de réduire le

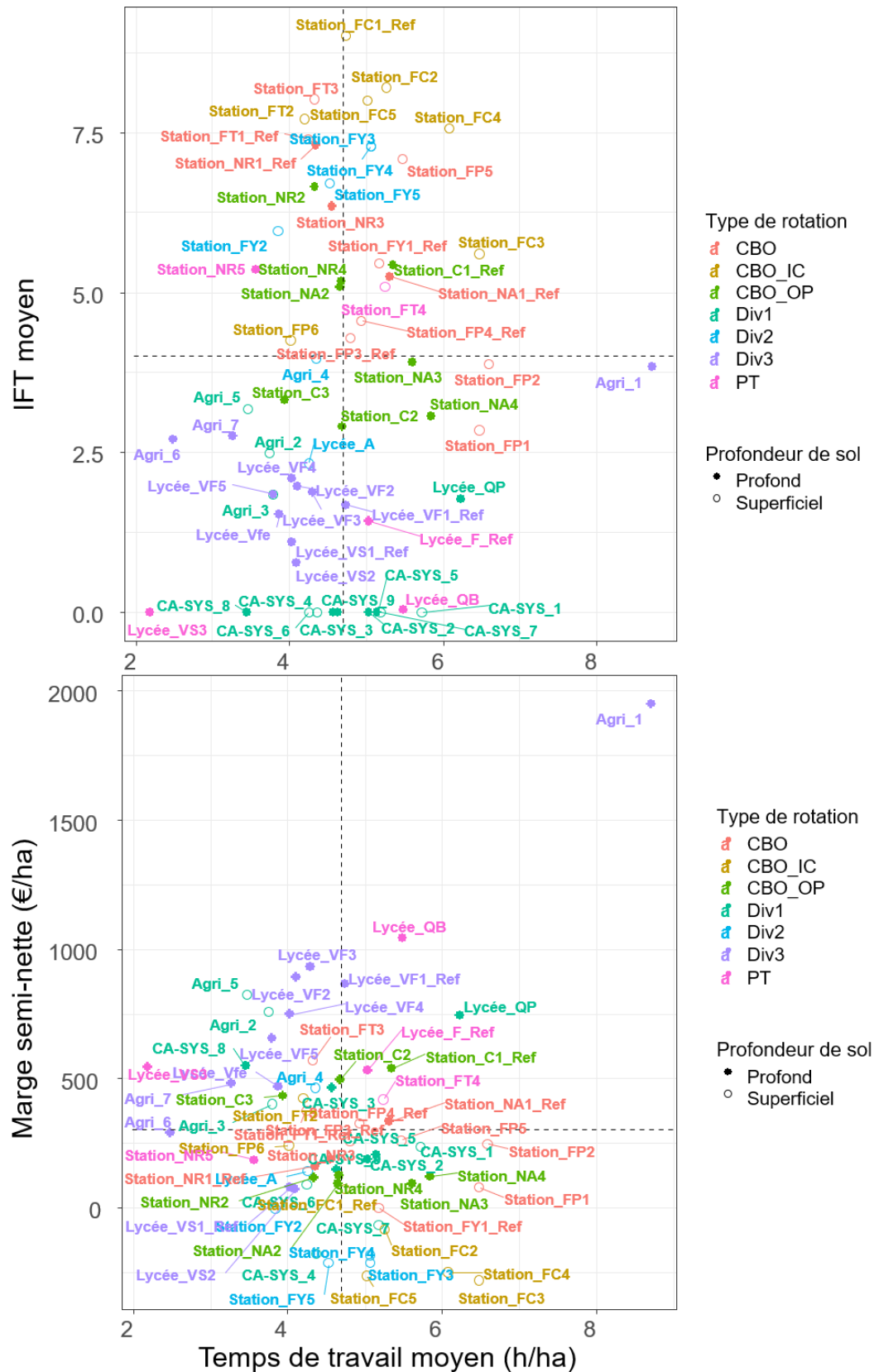


Figure 8 : Average work time values according to (A) average TFI values and (B) average semi-net margin, for the 61 cropping systems of the network.

Figure 8 : Temps de travail moyen en fonction de l'IFT moyen (A.) et de la marge semi-nette moyenne (B.) selon les performances des 61 systèmes de culture du réseau. L'IFT moyen correspond à l'IFT chimique hors traitement de semence.

recours aux PPP. De plus, 90% des SDC situés dans la zone inférieure droite (meilleures performances) ont des rotations diversifiées (Div1, Div3 et PT). En effet, il est reconnu que la diversification des rotations offre un environnement plus hétérogène dans l'espace et dans le temps. Cela permet de rompre le cycle des bioagresseurs, et donc notamment de limiter le développement des adventices, et de favoriser le développement de la biodiversité auxiliaire, ce qui améliore la résistance des systèmes face aux ravageurs (Lechenet et al., 2016). La diversification influence aussi la biogéochimie du sol : l'introduction de légumineuses contribue notamment à réduire l'utilisation des fertilisants azotés (Barot et al., 2017), ce qui peut encourager une diminution des charges opérationnelles et donc des meilleures MSN. La double performance semble donc en partie expliquée par le niveau de diversification de la rotation. Cependant, ce n'est pas le seul facteur puisque les SDC de type Div2 présentent des IFT disparates et plus élevés, avec en moyenne 6,8 pour les Station_FY2, _FY3, _FY4, _FY5.

Du point de vue de ces deux indicateurs (IFT et MSN), les SDC les plus performants se situent dans la partie inférieure droite, délimitée par les lignes pointillées : ce sont ceux qui maximisent la MSN tout en minimisant l'IFT. Parmi ces SDC il semble exister trois types de performance : celle de Agri_1 dont la MSN est extrêmement élevée (MSN = 1951 €/ha) et l'IFT est moyen (IFT = 3,8), celle de Lycée_QB dont l'IFT est quasi nul (IFT = 0,03) et la MSN est élevée (MSN = 1041 €/ha) et enfin, celle des Lycée_VF1, _VF2 et _VF3 qui semblent à l'entre-deux avec des MSN élevées (environ 900 €/ha) et des IFT faibles (environ 1,8).

3.1.2.2 Absence de relation entre le temps de travail et les autres indicateurs

D'après la figure 8 il n'y a pas de relation évidente entre le TT et les deux autres indicateurs. En effet, un IFT fort n'entraîne pas nécessairement un TT plus important. Cela n'est pas surprenant puisque l'IFT est lié au nombre de traitements appliqués mais pas au nombre de passages au champs (les produits peuvent être mélangés et distribués en une fois). De plus, les opérations de lutte chimique ne représentent que 8% du TT total (Annexe 5). Également, un TT plus important n'entraîne pas nécessairement une MSN plus importante (eg : Station_FP5 gagne 260 €/ha mais passe 2,2 fois plus de temps qu'Agri_6 qui gagne 288 €/ha). Cependant, il est intéressant de voir qu'il existe des SDC à MSN élevée et TT très faibles (eg : Agri_5 à 824 €/ha et 3.5 h/ha). Il est donc possible de concilier une bonne performance économique avec un faible TT, mais cela semble difficile à atteindre puisque d'autres SDC ont un TT très élevé pour une MSN faible voire négative (eg : Station_FC3 à -283 €/ha et 6.5 h/ha).

Concernant les types de SDC, on ne remarque pas non plus de corrélation particulière entre le TT et le type de rotation. En effet, l'annexe 3.B montre que la différence de TT moyen par culture n'est pas très importante et la variabilité pour une même culture est généralement forte. De plus, si la diversification peut réduire la pression des bioagresseurs et indirectement, réduire le nombre d'opérations de traitement et désherbage, cela a finalement très peu d'effet sur le TT (Annexe 5). Pourtant, on peut supposer que la gestion de conduites plus complexes (par

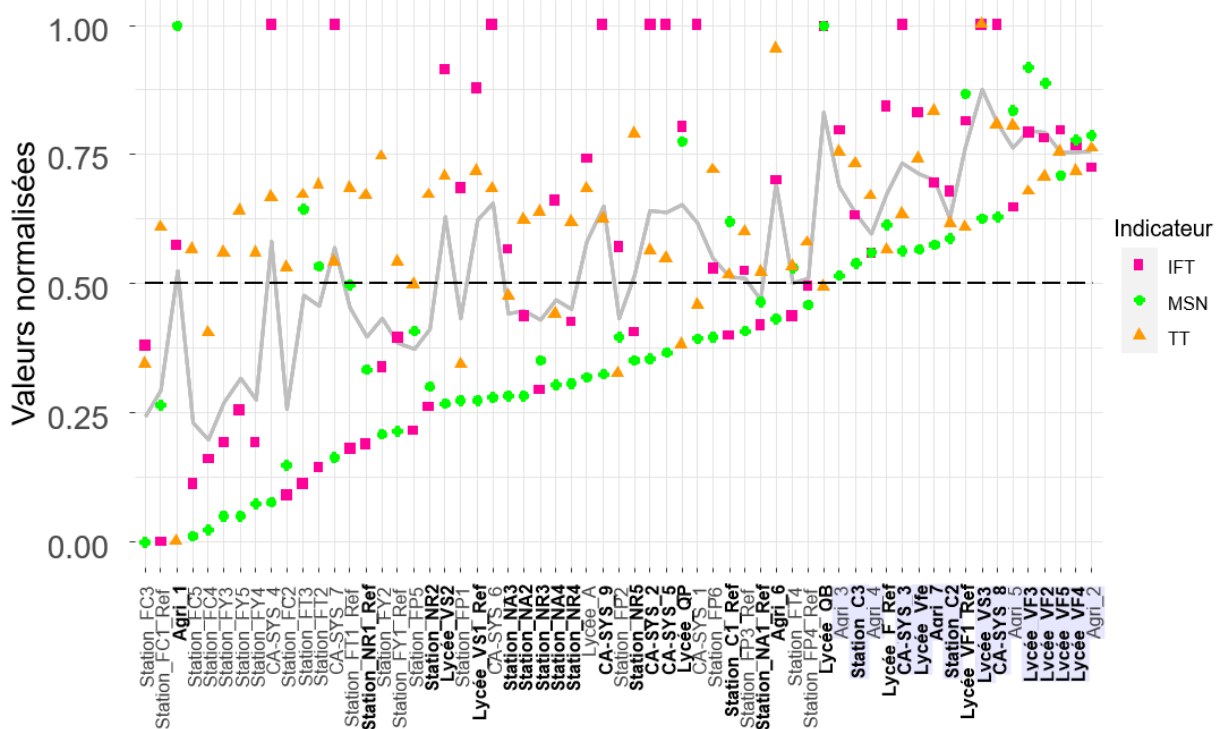


Figure 9 : Standardized indicator values for each of the 61 cropping system of the network.

Figure 9 : Valeurs normalisées des indicateurs pour chaque système de culture. Les SDC sont classés selon leur plus faible résultat sur les trois indicateurs. La courbe grise représente la valeur moyenne pour les trois indicateurs. Les noms en gras correspondent aux SDC sur sols profonds. Les noms sur fond gris correspondent aux SDC mis en évidence en Annexe 6.

Table 6 : Production situations and features of the 18 most successful cropping systems.

Tableau 6 : Conduites techniques et situations de production des 18 SDC les plus multi-performants (ceux dont la note du moins bon critère est supérieure à 0,5). Les cases rouges/vertes indiquent le plus mauvais/le meilleur critère de chaque SDC.

Système de culture	Note de performance				Caractéristiques de conduite et situations de production des systèmes de culture			
	IFT	MSN	TT	Moyenne	Type de rotation	Type de travail de sol	Profondeur de sol	Type de sol
Agri_2	0.72	0.79	0.76	0.76	Div1	Aucun	Superficiel	Type_3
Lycée_VF4	0.77	0.78	0.72	0.75	Div3	Sans labour	Profond	Type_2
Lycée_VF5	0.80	0.71	0.75	0.75	Div3	Sans labour	Profond	Type_2
Lycée_VF2	0.78	0.89	0.71	0.79	Div3	Sans labour	Profond	Type_2
Lycée_VF3	0.79	0.92	0.68	0.80	Div3	Sans labour	Profond	Type_2
Agri_5	0.65	0.84	0.80	0.76	Div1	Aucun	Superficiel	Type_1
CA-SYS_8	1.00	0.63	0.81	0.81	Div1	Sans labour	Profond	Type_2
Lycée_VS3	1.00	0.63	1.00	0.88	PT	Sans labour	Profond	Type_2
Lycée_VF1_Ref	0.81	0.87	0.61	0.76	Div3	Labour syst.	Profond	Type_2
Station_C2	0.68	0.59	0.62	0.63	CBO_OP	Labour syst.	Profond	NA
Agri_7	0.69	0.58	0.83	0.70	Div3	Aucun	Profond	Type_2
Lycée_Vfe	0.83	0.57	0.74	0.71	Div3	Sans labour	Profond	Type_2
CA-SYS_3	1.00	0.56	0.64	0.73	Div1	Labour occas.	Profond	Type_2
Lycée_F_Ref	0.84	0.62	0.56	0.67	PT	Labour occas.	Profond	Type_2
Agri_4	0.56	0.56	0.67	0.60	Div2	Sans labour	Superficiel	Type_3
Station_C3	0.63	0.54	0.73	0.63	CBO_OP	Labour occas.	Profond	NA
Agri_3	0.80	0.52	0.75	0.69	Div1	Sans labour	Superficiel	Type_1
Lycée_QB	1.00	1.00	0.49	0.83	PT	Labour occas.	Profond	Type_2

exemple, avec des rotations plus diversifiées) demande plus de temps d'observation (Lechenet et al., 2014). Cette absence de corrélation peut être due au fait que l'indicateur TT ne prend en compte que les opérations techniques et ne considère pas le temps consacré aux observations et à la réflexion.

3.1.3. Analyse globale des et identification des meilleurs systèmes de culture

3.1.3.1 Classement des systèmes selon leurs performances

La figure 9 présente les valeurs moyennes des indicateurs IFT, MSN et TT, après normalisation par redimensionnement, pour chaque SDC. Concernant la MSN, le deuxième meilleur résultat (Lycée_QB à 1041 €/ha) a été utilisé pour la normalisation. En effet, la valeur maximum (Agri_1 à 1951 €/ha) est au moins 1,9 fois plus élevée que les autres valeurs. Un tel écart risque de causer une distorsion de l'échelle (Nardo et al., 2005).

Les SDC sur sols profonds semblent obtenir un meilleur classement que les SDC sur sols superficiels, ce qui montre une nouvelle fois que c'est un élément qui conditionne fortement la performance des SDC. La MSN est le plus mauvais indicateur pour 64% des cas ; la performance économique est donc le facteur limitant pour la majorité des SDC. Cela suggère que les SDC tendent plutôt à maximiser les critères environnemental et social (l'IFT est le meilleur indicateur dans 41% des cas et le TT dans 48% des cas). Cela pourrait s'expliquer par la nature des pilotes : beaucoup de SDC sont mis en place dans des stations expérimentales dont on peut penser que l'objectif est davantage d'apporter des connaissances tangibles sur les pratiques AE. Ces SDC peuvent s'avérer économiquement plus risqués que ceux des agriculteurs, dont la pérennité de l'exploitation dépend des performances économiques.

Enfin, si l'on considère la note moyenne sur les trois indicateurs, on remarque que certains SDC avec pourtant une bonne moyenne, ne sont pas situés dans le haut du classement (eg : Lycée_A, CA-SYS 9). Ces SDC atteignent une bonne moyenne grâce à un effet de compensation : ils compensent une mauvaise performance obtenue sur un indicateur par une bonne performance obtenue sur un autre. Or, dans le cas de l'AE forte (et par extension de la durabilité forte), les composantes environnementales, économiques ou sociales ne sont pas substituables entre elles. L'annexe 6 met en évidence les SDC dont les résultats bruts sont supérieurs à la moyenne du réseau pour les trois indicateurs. Ces SDC (surlignés en bleu sur la figure 9) correspondent bien à ceux qui sont en tête du classement. Ainsi, considérer uniquement la note du plus mauvais indicateur pour le classement final semble très pertinent pour sélectionner les SDC qui répondent le mieux aux enjeux de la durabilité en conciliant toutes ses dimensions.

3.1.3.2 Description des meilleurs systèmes

Le tableau 6 présente les caractéristiques des 18 meilleurs SDC (plus mauvaise note supérieure à 0,5). La majorité d'entre eux présente des rotations diversifiées (Div 1, 2, 3 et PT) et seulement deux SDC sont de type CBO_OP. Diversifier la rotation apparaît alors comme

Table 7 : P-values resulting from permutation tests performed for 13 factors at 5 phylogenetic levels.

Tableau 7 : P-values résultantes des tests de permutation effectués pour 13 facteurs à 5 niveaux phylogénétiques. Les valeurs en vert correspondent à des p-values < 0.05 ; les valeurs en rouge, à des p-values > 0.05.

Facteur	Niveaux phylogénétiques				
	Phylum	Classe	Ordre	Famille	Genre
SDC	0.005	0.001	0.004	0.002	0.001
IN	0.041	0.013	0.019	0.013	0.001
PC	0.042	0.027	0.004	0.012	0.001
ROT	0.085	0.022	0.02	0.024	0.001
HE	0.109	0.016	0.03	0.046	0.001
M	0.169	0.057	0.006	0.002	0.001
FO	0.144	0.08	0.133	0.279	0.001
TS	0.158	0.06	0.259	0.212	0.001
NR	0.296	0.264	0.098	0.041	0.001
FE	0.163	0.11	0.116	0.139	0.001
PR	0.255	0.043	0.124	0.051	0.028
A	0.981	0.935	0.728	0.736	0.067
REP	0.609	0.595	0.621	0.667	0.837

}

Effet significatif pour une majorité de niveaux phylogénétiques

}

Effet significatif seulement au niveau du genre

}

Effet non significatif

un élément essentiel de la multi-performance. En causes, les bénéfices qu'elle apporte comme la résistance naturelle face aux bioagresseurs et la résilience économique. Quatre SDC sur sols superficiels parviennent quand même à de bonnes performances, alors que cela implique un désavantage important ; cela peut être lié à l'adoption de pratiques qui améliorent la fertilité du sol : l'implantation de légumineuses (Div 1), de couverts (Div 2) et le non-labour. Enfin, on remarque que trois SDC n'utilisent aucun PPP (CA-SYS_8, Lycée_VS3 et CA-SYS_3). Bien que leur point faible reste la rentabilité économique, ce résultat donne de bons espoirs quant à la possibilité d'atteindre une bonne performance économique sans utiliser de PPP. Particulièrement, le résultat de CA-SYS_8 est très encourageant puisqu'il est en non-labour.

Enfin, on peut dire qu'il n'y a pas de tendance vers la maximisation ou le délaissement d'un critère en particulier parmi ces SDC. Ce résultat illustre la diversité de trajectoires possibles des systèmes AE, qui est fondée à la fois sur la diversité des contextes de production et la diversité des points de vue. Cependant, d'après les notes très faibles de certains SDC (eg : Station_FC4 qui a la plus faible moyenne, Figure 9) la légitimité de leur qualification « agroécologique » est remise en question. En effet, il apparaît que la mise en œuvre de pratiques AE d'efficience ou de substitution n'est pas suffisant pour atteindre la durabilité et que la démarche AE est davantage intégrative.

Il s'agit maintenant de s'intéresser à la composition des CMB afin de voir s'il est possible de lier la présence de certains taxons bactériens aux caractéristiques de conduite et/ou à la situation de production des SDC.

3.2. Analyse des données de microbiologie des sols

3.2.1. Identification des facteurs impactant

Le tableau 7 résume les résultats des tests de permutation en indiquant la p-value pour chaque facteur et niveau phylogénétique. Pour les facteurs SDC, IN, PC, ROT, HE et M (Tableau 5), les p-values sont significatives pour presque tous les niveaux. On peut donc supposer qu'ils ont un effet important sur la composition des CMB et qu'ils vont révéler des présences différentes de taxons. Les facteurs FO, TS, NR, FE et PR présentent un effet significatif au niveau du genre seulement. Lors de l'assignation taxonomique, plus on va vers des niveaux phylogénétiques précis, plus le taux d'assignation diminue (au niveau du phylum, le taux est généralement de l'ordre de 90% de séquences assignées, tandis qu'au niveau du genre, il peut tomber à moins 50% des séquences exploitables). En effet, les bases de référence de gènes sont encore incomplètes et les résultats à ce niveau sont donc partiels. Il se peut aussi que les séquences ne soient pas assez divergentes et l'assignation taxonomique à un genre précis n'est pas possible. Enfin, on voit qu'il n'y a pas d'effet des répétitions (REP), ce qui permet de dire que les prélèvements sont homogènes pour un site et une campagne de prélèvement. Il n'y a pas non plus d'effet de l'année culturale, ce qui peut sembler surprenant car on aurait pu s'attendre à un effet de recrutement de la culture en place (céréale en 2018 puis pois en 2019).

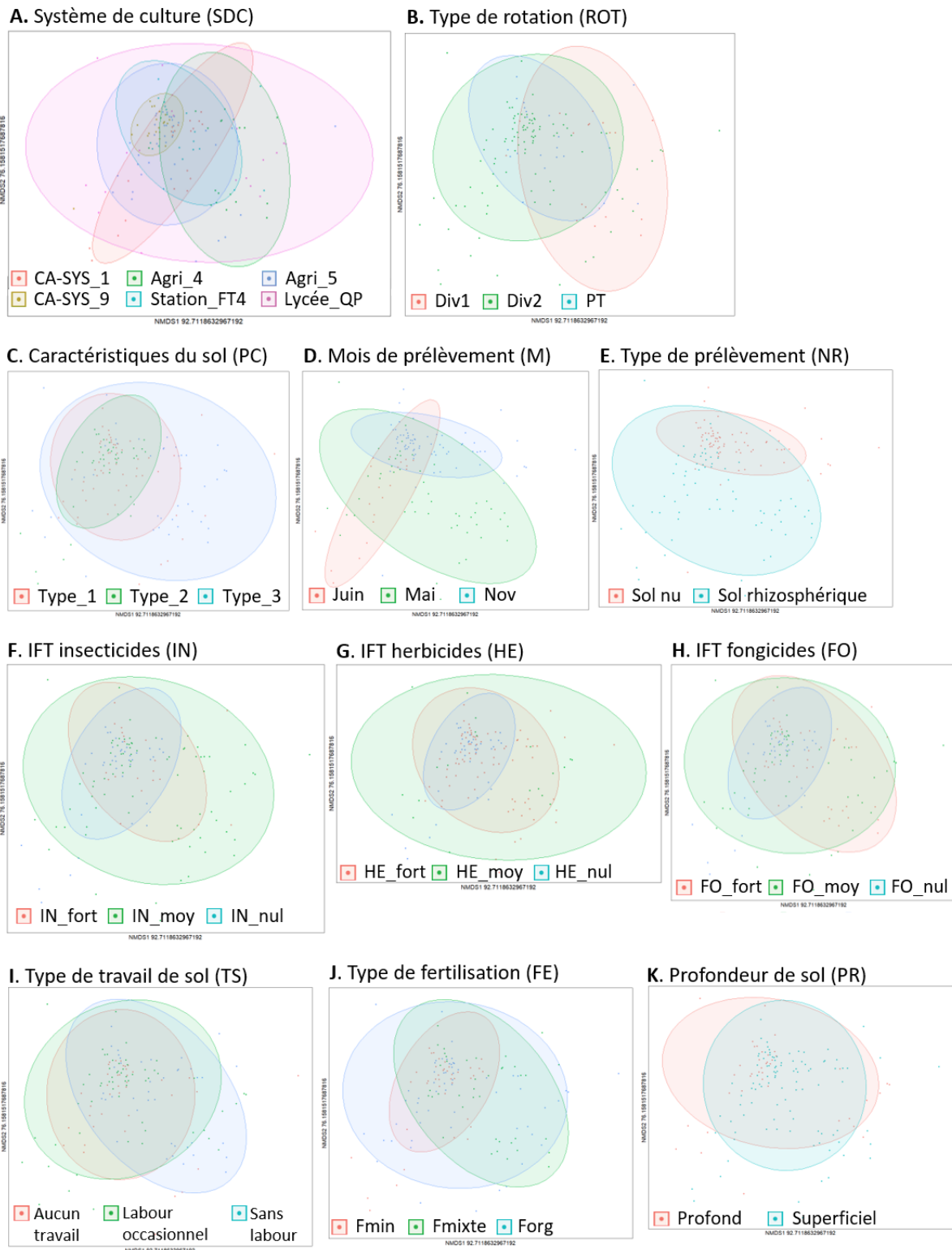


Figure 10 : Graphs of NMDS (Non-metric multi-dimensional scaling) analysis according to the Bray-Curtis distance, performed at the genus taxonomic level.

Figure 10 : Graphiques d'analyse NMDS (Non-metric multi-dimensional scaling) selon la distance de Bray-Curtis, réalisée au niveau taxonomique du genre. Pour chaque graphique, les échantillons sont groupés selon un facteurs de groupement différent (ellipses de confiance à 95%).

Cela peut être dû au fait que les prélèvements « sol nu » sont assez similaires car peu colonisés par des CMB, ou encore au fait que l'influence du SDC soit très importante. La figure 10 montre les nuages de points construits par analyse NMDS sur lesquels ont été projetés les modalités pour les facteurs dont l'effet était significatif au test de permutation. Malgré le caractère partiel des résultats au niveau du genre, c'est à ce niveau que les ellipses étaient les mieux distinguées et qu'il y a le plus grand nombre de facteurs significatifs. Dans tous les cas, les ellipses se recoupent et les points sont très dispersés, ce qui ne permet pas de tirer de conclusions claires quant à l'effet d'un facteur sur la composition des CMB. Cependant, le système CA-SYS_9 présente des points qui sont plus regroupés, ce qui laisse supposer une spécificité liée à ce système (Figure 10.a). D'après les autres graphs, cette particularité pourrait être due à l'absence de toute application de PPP (Figure 10.f, g, h), à ses valeurs de pH autour de 7.5 (Figure 10.c), ou encore à son type de rotation qui présente notamment des légumineuses (Figure 10.b). En effet, il a été montré que les CMB sont impactées par les paramètres biotiques et abiotiques du sol : le pH est reconnu comme le facteur le plus important (Lauber et al., 2009) ainsi que l'effet d'interaction avec les plantes en place (Ishaq, 2017).

Pour le facteur NR (Figure 10.i), les points « sol nu » se regroupent et se distinguent des points « sol rhizosphérique » qui eux, sont très dispersés. En effet, il est reconnu que les plantes peuvent avoir un effet de recrutement des microorganismes au niveau de la rhizosphère, qui diffère selon l'espèce/la variété de la plante considérée (Ishaq, 2017). Cependant, on voit aussi que les points « sol nu » correspondent aux points du mois de novembre (Figure 10.d). En effet, les prélèvements de ce type ont tous été faits au même moment ; on ne peut donc pas savoir si l'effet vient du « sol nu » ou d'une influence de la temporalité. De même, les systèmes CA-SYS sont les seuls à avoir été échantillonnés en juin. On peut donc suspecter une possible confusion d'effet entre l'effet 'site' et l'effet 'année'.

3.2.2. Identification des genres exprimés différemment

Les analyses DESeq ont été effectuées, elles aussi, au niveau du genre. Elles révèlent plusieurs centaines de genres différemment exprimés selon les modalités des facteurs. Puisqu'on cherche ici à identifier les taxons les plus impactants, seuls ceux avec les plus importantes abondances moyennes par échantillon ont été sélectionnés (plus de 50 séquences présentes). En effet, il est difficile de conclure sur l'influence d'un taxon qui est présent en très faible quantité dans les échantillons.

Les taxons les plus abondants sont *Pseudomonas*, *Janthinobacterium*, *Mucilaginibacter* et *Stenotrophomonas* (respectivement 476, 70, 56 et 53 séquences par échantillon en moyenne). D'après les résultats de la figure 11, il y a significativement plus de *Pseudomonas*, *Janthinobacterium*, *Mucilaginibacter* et *Stenotrophomonas* dans les échantillons prélevés au mois de mai que dans ceux prélevés au mois de novembre. Il est possible que cette différence soit due aux conditions météorologiques (eg : de plus fortes précipitations en automne et donc

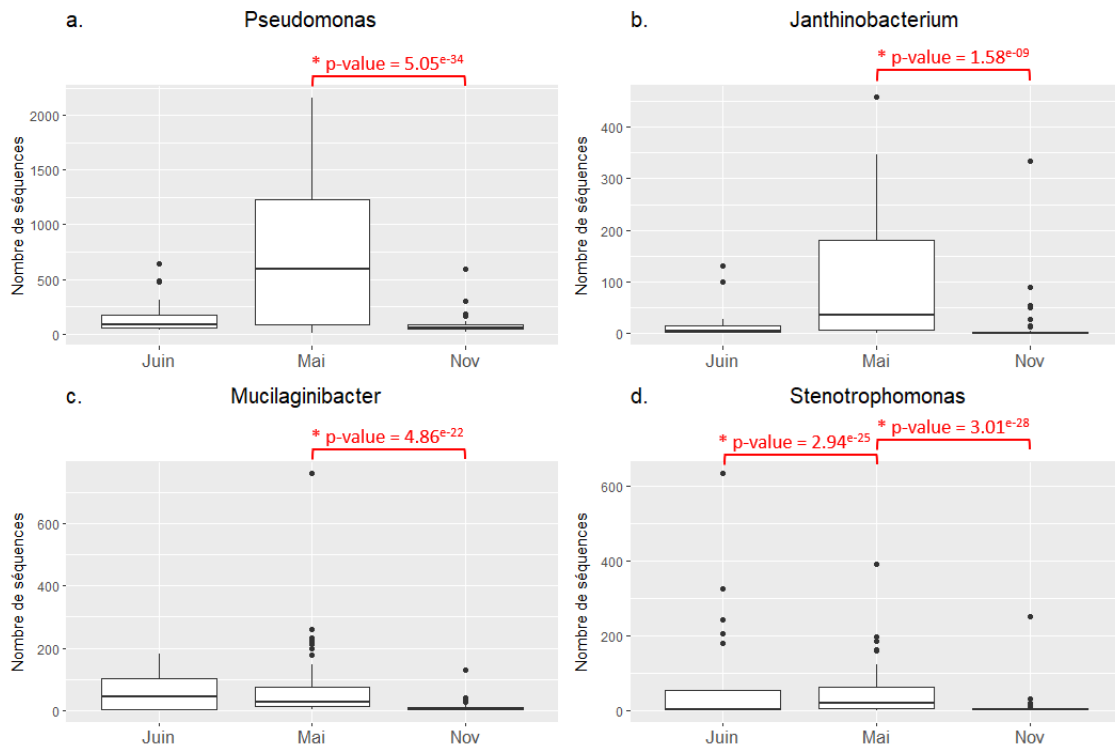


Figure 11 : Number of sequences for the genus a. *Pseudomonas*, b. *Janthionabacterium*, c. *Mucilaginibacter* et d. *Stenotrophomonas*, according to the sampling month.

Figure 11 : Nombre de séquences pour les genres a. *Pseudomonas*, b. *Janthionabacterium*, c. *Mucilaginibacter* et d. *Stenotrophomonas*, en fonction du mois de prélèvement (M). Les p-values sont celles obtenues après analyse DESeq.

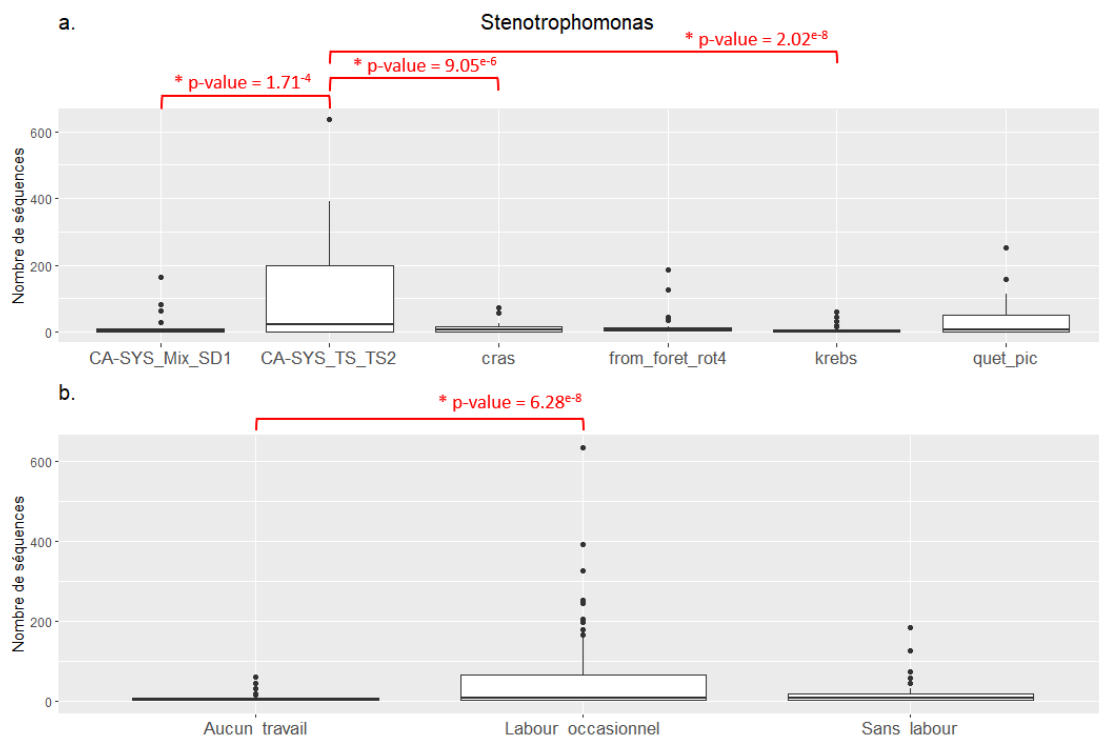


Figure 12 : Number of sequences for the genus *Stenotrophomonas*, according to a. the cropping systems and b. tillage.

Figure 12 : Nombre de séquences pour le genre *Stenotrophomonas* en fonction a. du système de culture (SDC) et du b. travail du sol (TS). Les p-values sont celles obtenues après analyse DESeq.

une potentielle humidité du sol plus élevée). Cependant, on sait aussi que les échantillons du mois de novembre correspondent uniquement à des échantillons de « sol nu » tandis que ceux de mai sont des « sol rhizosphérique ». Il est donc possible que la plus forte abondance de ces taxons en mai soit due à leur recrutement dans la rhizosphère de la culture en place. Néanmoins, pour les prélèvements du mois de juin, qui sont aussi des « sols rhizosphériques », seuls les *Stenotrophomonas* sont plus abondants. Cela peut être lié au fait que les prélèvements de juin sont uniquement des échantillons des systèmes CA-SYS et que ces derniers présentent une autre particularité qui favorise la présence de ce taxon. La figure 12 montre les résultats de l'effet du système de culture (SDC) et du travail du sol (TS) sur les *Stenotrophomonas*. On voit que ce taxon est plus abondant dans le système CA-SYS_9 et également plus abondant dans les systèmes qui pratiquent le labour occasionnel.

On sait que certaines souches de *Pseudomonas* sont des PGPR (Lemanceau, 1992) et elles sont donc liées à la présence de plantes puisqu'elles interagissent avec elles. Il semble alors cohérent de les associer aux sols rhizosphériques en supposant leur recrutement par les cultures. Il en est de même pour le genre *Stenotrophomonas* : certaines espèces (*S. maltophilia* et *S. rhizophila*) sont souvent abondantes dans les CMB. Elles colonisent la rhizosphère de nombreuses espèces végétales et leur apportent de nombreux bénéfices (Berg et al., 2010). De plus, Chen et al. (2020) montre un impact positif du labour sur l'abondance du genre *Stenotrophomonas*. Ce résultat corrobore le nôtre (Figure 12) et encourage l'idée qu'il serait intéressant d'utiliser la présence et/ou l'abondance de certains taxons comme indicateur d'impact des pratiques agricoles sur la qualité des sols.

4. Conclusion

Le calcul des indicateurs de performance environnementale, économique et sociale a permis de mettre en évidence la forte disparité entre des SDC qualifiés d'agroécologiques. C'est particulièrement le cas pour les valeurs d'IFT : elles dessinent un fort gradient et illustrent bien le fait que les SDC sont à différents « niveaux d'agroécologie ». En effet, l'un des enjeux majeurs de l'AE est justement de réduire le recours aux intrants chimiques et la contamination des milieux. De plus, on a montré que des IFT très élevés sont souvent liés à de mauvaises performances économiques. Cela suggère que les SDC à fort IFT rencontrent une impasse dans la lutte contre les bioagresseurs et présentent une vraie dépendance aux PPP. Cependant, des SDC aux IFT faibles, voire nuls, parviennent à atteindre de bonnes performances économiques et sociales. Ils se caractérisent par des rotations diversifiées (5 à 10 espèces, présence de légumineuses et d'oléoprotéagineux), un travail du sol restreint (non-labour, voire aucun travail de sol) et/ou une augmentation de la couverture du sol avec l'implantation de cultures intermédiaires (Div 2) ou de prairies temporaires (PT). Il semble donc que les meilleurs SDC (ie : considérés comme les mieux à même, au sein de ce réseau, de concilier les trois composantes de la durabilité) intègrent une démarche d'AE forte, en combinant un ensemble

de pratiques qui maximisent les processus écologiques. Ce résultat est cependant à nuancer car il s'agit également de SDC sur sols profonds, un avantage au développement des cultures.

Pour cette EMC, nous avons utilisé seulement trois indicateurs. L'avantage est l'analyse de leur ensemble de façon complète (pas de perte d'information due à une étape d'agrégation) et lisible (possibilité d'interpréter à partir de représentations graphiques simples). De plus, un poids égal a été accordé aux trois piliers de la durabilité, ce qui semble juste au regard des enjeux de l'AE. Par contre, trois indicateurs ne peuvent pas résumer à eux seuls la complexité de la multi-performance des SDC. Par exemple, en prenant l'IFT comme seul indicateur environnemental, les performances relatives à la biodiversité sont négligées, un élément pourtant majeur de la préservation des ressources naturelles. De même, en résumant la performance sociale au temps de travail, de nombreux autres aspects sont négligés comme la pénibilité des tâches ou la contribution à l'emploi rural. Ainsi, utiliser davantage d'indicateurs nous permettrait de nuancer le classement des SDC et ferait peut-être apparaître des limites chez les SDC identifiés comme les meilleurs. De plus, il serait intéressant d'accorder une plus grande considération aux SDP dans les analyses des résultats. Dans cette étude, le seul facteur différenciant et pertinent qui était disponible dans nos données était la profondeur de sol ; avec davantage de données, il serait possible, à la manière de Deytieux (2017), de construire des groupes de SDP et de comparer les performances au sein de ces groupes.

Les analyses microbiologiques ont permis de mettre en évidence un lien entre la présence de certains taxons et les pratiques des SDC. Cela encourage l'idée de pouvoir utiliser la composition des CMB comme indicateur d'impact des pratiques agricoles sur la qualité des sols (celle-ci étant liée au potentiel de rendement et donc à la multi-performance). Cependant, les mécanismes qui régissent les changements dans la composition des CMB sont encore très mal connus car leur dynamique est infiniment complexe. En effet, dans notre étude, les corrélations sont trop légères pour tirer des conclusions fiables et proposer des taxons particuliers comme indicateurs. Cela est certainement lié au faible nombre de SDC évalués et donc au faible nombre de répétitions par modalités (pratiques) testées. De plus, nous avons considéré uniquement les espèces les plus abondantes. Dans les sols, les CMB se composent généralement de quelques espèces dominantes qui coexistent avec un grand nombre d'espèces rares. Dans la majorité des études, les espèces dominantes sont étudiées en priorité, voire en exclusivité. Cependant, il émerge que les espèces rares ont des rôles cruciaux dans plusieurs processus écologiques (Jousset et al., 2017). Il pourrait donc être plus intéressant de procéder à une analyse complète des CMB en portant une attention particulière à la présence ou absence des espèces rares.

Bibliographie

AUBERTOT, Jean-Noël et ROBIN, Marie-Hélène, 2013. Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Crop Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and the Abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual Bases. *PLOS ONE*. 3 septembre 2013. Vol. 8, n° 9. DOI 10.1371/journal.pone.0073202.

BAROT, Sébastien, ALLARD, Vincent, CANTAREL, Amélie, ENJALBERT, Jérôme, GAUFFRETEAU, Arnaud, GOLDRINGER, Isabelle, LATA, Jean-Christophe, LE ROUX, Xavier, NIBOYET, Audrey et PORCHER, Emanuelle, 2017. Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 4 avril 2017. Vol. 37, n° 2, pp. 13. DOI 10.1007/s13593-017-0418-x.

BELLE, F., VÉLU, Alice, SQUIN, S. L. et MICHELS, Thierry, 2013. Utilisation de l'indicateur I-PHY comme outil d'aide à la décision en verger d'agrumes à la Réunion. Le cas de la lambda-cyhalothrine. *Innovations Agronomiques*. 2013. Vol. 31, pp. 61-73.

BERG, Gabriele, EGAMBERDIEVA, D., LUGTENBERG, B. et HAGEMANN, M., 2010. Symbiotic plant-microbe interactions: stress protection, plant growth promotion and biocontrol by *Stenotrophomonas*. *Symbioses and stress : joint ventures in biology*. 2010. Vol. 17, pp. 445-460. DOI 10.1007/978-90-481-9449-0_22.

BILL, Malick, CHIDAMBA, Lizyben, GOKUL, Jarishma K., LABUSCHAGNE, Nico et KORSTEN, Lise, 2021. Bacterial community dynamics and functional profiling of soils from conventional and organic cropping systems. *Applied Soil Ecology*. 1 janvier 2021. Vol. 157, pp. 103734. DOI 10.1016/j.apsoil.2020.103734.

BOCKSTALLER, Christian, GUICHARD, Laurence, KEICHINGER, Olivier, GIRARDIN, Philippe, GALAN, Marie-Béatrice et GAILLARD, Gérard, 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. . 1 mars 2009. Vol. 29, n° 1, pp. 223-235. DOI 10.1051/agro:2008058.

BOULANGER, P., 2004. Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique. In : *Séminaire Développement durable et économie de l'environnement*. Paris : Institut du développement durable et des relations internationales. 2004. pp. 22. 12.

BÜRGER, Jana, DE MOL, Friederike et GEROWITT, Bärbel, 2012. Influence of cropping system factors on pesticide use intensity – A multivariate analysis of on-farm data in North East Germany. *European Journal of Agronomy*. 1 juillet 2012. Vol. 40, pp. 54-63. DOI 10.1016/j.eja.2012.02.008.

BÜRGER, Jana, GÜNTHER, Astrid, DE MOL, Friederike et GEROWITT, Bärbel, 2012. Analysing the influence of crop management on pesticide use intensity while controlling for external sources of variability with Linear Mixed Effects Models. *Agricultural Systems*. 1 septembre 2012. Vol. 111, pp. 13-22. DOI 10.1016/j.agsy.2012.05.002.

CAQUET, Thierry, GASCUEL-ODOUX, Chantal, TIXIER-BOICHARD, Michele, DEDIEU, Benoit, DÉTANG-DESSENDRE, Cécile, DUPRAZ, Pierre, FAVERDIN, Philippe, HAZARD, Laurent, HINSINGER, Philippe, LITRICO-CHIARELLI, Isabelle, MÉDALE, Françoise, MONOD, Herve, PETIT, Sandrine, REBOUD, Xavier, THOMAS, Alban, LESCOURRET, Françoise, ROQUES, Lionel, VRIES, Hugo de et SOUSSANA, Jean-François, 2019. Réflexion prospective interdisciplinaire pour l'agroécologie. Rapport de synthèse. . 2019. pp. 108. DOI 10.15454/heimwa.

CASTOLDI, Nicola et BECHINI, Luca, 2010. Integrated sustainability assessment of cropping systems with agro-ecological and economic indicators in northern Italy. *European Journal of Agronomy*. 1 janvier 2010. Vol. 32, n° 1, pp. 59-72. DOI 10.1016/j.eja.2009.02.003.

CHEN, Huijie, ZHAO, Shuang, ZHAO, Jiamiao, ZHANG, Kaikai, JIANG, Jing, GUAN, Zhiyong, CHEN, Sumei, CHEN, Fadi et FANG, Weimin, 2020. Deep tillage combined with biofertilizer following soil fumigation improved chrysanthemum growth by regulating the soil microbiome. *MicrobiologyOpen*. 2020. Vol. 9, n° 7, pp. e1045. DOI 10.1002/mbo3.1045.

COLOMB, Bruno, CAROF, Matthieu, AVELINE, Anne et BERGEZ, Jacques-Eric, 2013. Stockless organic farming: strengths and weaknesses evidenced by a multicriteria sustainability assessment model. *Agronomy for Sustainable Development*. 1 juillet 2013. Vol. 33, n° 3, pp. 593-608. DOI 10.1007/s13593-012-0126-5.

DEYTIEUX, Violaine, 2017. *Performances de prototypes de systèmes de grandes cultures : analyse d'un réseau expérimental* [en ligne]. Sciences de l'environnement. Dijon : Université de Bourgogne. [Consulté le 25 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/tel-03191839>

DEYTIEUX, Violaine, MUNIER-JOLAIN, Nicolas et CANEILL, Jacques, 2016. Assessing the sustainability of cropping systems in single- and multi-site studies. A review of methods. *European Journal of Agronomy*. 1 janvier 2016. Vol. 72, pp. 107-126. DOI 10.1016/j.eja.2015.10.005.

DORÉ, Thierry et BELLON, Stéphane, 2019. *Les mondes de l'agroécologie*. 1ère édition. Editions Quae. Enjeux sciences. ISBN 978-2-7592-3002-0.

DORÉ, Thierry, MAKOWSKI, David, MALÉZIEUX, Eric, MUNIER-JOLAIN, Nathalie, TCHAMITCHIAN, Marc et TITTONELL, Pablo, 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy*. mai 2011. Vol. 34, n° 4, pp. 197-210. DOI 10.1016/j.eja.2011.02.006.

DURU, Michel, FARES, M'hand et THEROND, Olivier, 2014. Un cadre conceptuel pour penser maintenant (et organiser demain) la transition agroécologique de l'agriculture dans les territoires. *Cahiers Agricultures*. mars 2014. Vol. 23, n° 2, pp. 84-95. DOI 10.1684/agr.2014.0691.

DURU, Michel, THEROND, Olivier et FARES, M'hand, 2015. Designing agroecological transitions; A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 1 octobre 2015. Vol. 35, n° 4, pp. 1237-1257. DOI 10.1007/s13593-015-0318-x.

ESTEVEZ, Bernard, DOMON, Gérald et LUCAS, Eric, 2000. Le modèle ESR (efficacité-substitution-reconceptualisation), un modèle d'analyse pour l'évaluation de l'agriculture durable applicable à l'évaluation de la stratégie phytosanitaire au Québec. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*. octobre 2000. N° 41, pp. 97-104.

FALENTIN, Hélène, AUER, Lucas, MARIADASSOU, Mahendra, PASCAL, Géraldine, RUÉ, Olivier, DUGAT-BONY, ERIC, DELBES, Céline, NICOLAS, Aurélie, RIFA, Etienne, MONDY, Samuel, LE BOULCH, Malo, CAUQUIL, Laurent, HERNANDEZ RAQUET, Guillermina, TERRAT, Sébastien et ABRAHAM, Anne-Laure, 2019. Guide pratique à destination des biologistes, bioinformaticiens et statisticiens qui souhaitent s'initier aux analyses métabarcoding. *Cahiers des Techniques de l'INRA*. 2019. Vol. 2019, n° 97, pp. 1-23.

FAO, 2018. *Résultats du 2ème Symposium international sur l'agroécologie et voie à suivre : L'agroécologie au service des objectifs de développement durable - Passer à l'échelle supérieure*

[en ligne]. Rome. [Consulté le 3 août 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/about/meetings/second-international-agroecology-symposium/fr/>

FAO, 2020. Sustainable crop production and COVID-19. In : [en ligne]. Rome, Italy. 2020. pp. 6. ISBN 978-92-5-132516-2. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.4060/ca8807en>

FAO, 2021. Quarante-deuxième session : *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Transformation des systèmes agroalimentaires: de la stratégie à l'action.*

FIERER, Noah, 2017. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*. octobre 2017. Vol. 15, n° 10, pp. 579-590. DOI 10.1038/nrmicro.2017.87.

FUMAGALLI, Mattia, ACUTIS, Marco, MAZZETTO, Fabrizio, VIDOTTO, Francesco, SALI, Guido et BECHINI, Luca, 2012. A methodology for designing and evaluating alternative cropping systems: Application on dairy and arable farms. *Ecological Indicators*. 1 décembre 2012. Vol. 23, pp. 189-201. DOI 10.1016/j.ecolind.2012.03.028.

GABREL, Virginie et VANDERPOOTEN, Daniel, 2002. Enumeration and interactive selection of efficient paths in a multiple criteria graph for scheduling an earth observing satellite. *European Journal of Operational Research*. 16 juin 2002. Vol. 139, n° 3, pp. 533-542. DOI 10.1016/S0377-2217(01)00188-6.

GLIESSMAN, Steve, 2018. Defining Agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. 3 juillet 2018. Vol. 42, n° 6, pp. 599-600. DOI 10.1080/21683565.2018.1432329.

ISHAQ, Suzanne L., 2017. Plant-microbial interactions in agriculture and the use of farming systems to improve diversity and productivity. *AIMS Microbiology*. 11 mai 2017. Vol. 3, n° 2, pp. 335-353. DOI 10.3934/microbiol.2017.2.335.

JOUSSET, Alexandre, BIENHOLD, Christina, CHATZINOTAS, Antonis, GALLIEN, Laure, GOBET, Angélique, KURM, Viola, KÜSEL, Kirsten, RILLIG, Matthias C., RIVETT, Damian W., SALLES, Joana F., VAN DER HEIJDEN, Marcel G. A., YOUSSEF, Noha H., ZHANG, Xiaowei, WEI, Zhong et HOL, W. H. Gera, 2017. Where less may be more: how the rare biosphere pulls ecosystems strings. *The ISME Journal*. avril 2017. Vol. 11, n° 4, pp. 853-862. DOI 10.1038/ismej.2016.174.

LAIREZ, Juliette, FESCHET, Pauline, AUBIN, Joël, BOCKSTALLER, C. et BOUVAREL, Isabelle, 2015. *Agriculture et développement durable. Guide pour l'évaluation multicritère*. 1ère édition. Editions Quae. Sciences en partage. ISBN 978-2-7592-2439-5.

LAUBER, Christian L., HAMADY, Micah, KNIGHT, Rob et FIERER, Noah, 2009. Pyrosequencing-Based Assessment of Soil pH as a Predictor of Soil Bacterial Community Structure at the Continental Scale. *Applied and Environmental Microbiology*. 1 août 2009. Vol. 75, n° 15, pp. 5111-5120. DOI 10.1128/AEM.00335-09.

LECHENET, Martin, 2014. *Etude de la faisabilité de la réduction de l'usage des pesticides en grandes cultures par l'analyse d'un réseau nationale de ferme de démonstration ECOPHYTO* [en ligne]. Sciences de la vie. Bourgogne Franche-Comté. [Consulté le 3 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/s1014259>

LECHENET, Martin, BRETAGNOLLE, Vincent, BOCKSTALLER, Christian, BOISSINOT, François, PETIT, Marie-Sophie, PETIT, Sandrine et MUNIER-JOLAIN, Nicolas M, 2014. Reconciling pesticide reduction

with economic and environmental sustainability in arable farming. *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9, n° 6. DOI 10.1371/journal.pone.0097922.

LECHENET, Martin, MAKOWSKI, David, PY, Guillaume et MUNIER-JOLAIN, Nicolas, 2016. Profiling farming management strategies with contrasting pesticide use in France. *Agricultural Systems*. 2016. Vol. 149, pp. 40. DOI 10.1016/j.agsy.2016.08.005.

LEMANCEAU, P., 1992. Effets bénéfiques de rhizobactéries sur les plantes : exemple des *Pseudomonas* spp fluorescents. *Agronomie*. 1992. Vol. 12, n° 6, pp. 413-437. DOI 10.1051/agro:19920601.

LEVARD, L., BERTRAND, M. et MASSE, P., 2019. *Mémento pour l'évaluation de l'agroécologie. Méthode pour évaluer ses effets et les conditions de son développement*. 2019. Ed. GTAE-AgroParisTechCIRAD-IRD.

LUPATINI, Manoeli, KORTHALS, Gerard W., DE HOLLANDER, Mattias, JANSSENS, Thierry K. S. et KURAMAE, Eiko E., 2017. Soil Microbiome Is More Heterogeneous in Organic Than in Conventional Farming System. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 7. DOI 10.3389/fmicb.2016.02064.

MAGRINI, Marie-Benoît, MARTIN, Guillaume, MAGNE, Marie-Angéline, DURU, Michel, COUIX, Nathalie, HAZARD, Laurent et PLUMECOCQ, Gaël, 2019. Agroecological Transition from Farms to Territorialized Agri-Food Systems: Issues and Drivers. In : BERGEZ, Jacques-Eric, AUDOUIN, Elise et THEROND, Olivier (éd.), *Agroecological Transitions: From Theory to Practice in Local Participatory Design*. pp. 69-98. ISBN 978-3-030-01953-2.

MALÉZIEUX, Eric, 2012. Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development*. 1 janvier 2012. Vol. 32, n° 1, pp. 15-29. DOI 10.1007/s13593-011-0027-z.

MEYBECK, Alexandre et PINGAULT, Nathanaël, 2010. French environmental certification scheme: Co-construction of environmental performance indicators. In : *OECD Workshop on Agri-Environmental Indicators*. Leysin, Switzerland. 2010. pp. 13.

MEYNARD, Jean-Marc, DORÉ, Thierry et LUCAS, Philippe, 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *Comptes Rendus Biologies*. 1 janvier 2003. Vol. 326, n° 1, pp. 37-46. DOI 10.1016/S1631-0691(03)00006-4.

MÉZIÈRE, Delphine, COLBACH, Nathalie, DESSAINT, Fabrice et GRANGER, Sylvie, 2015. Which cropping systems to reconcile weed-related biodiversity and crop production in arable crops? An approach with simulation-based indicators. *European Journal of Agronomy*. 1 août 2015. Vol. 68, pp. 22-37. DOI 10.1016/j.eja.2015.04.004.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION, 2020. Atelier de calcul - IFT - Indicateur de Fréquence de Traitements phytopharmaceutiques. *IFT Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation* [en ligne]. 2020. [Consulté le 1 août 2021]. Disponible à l'adresse : [https://alim.agriculture.gouv.fr/ift/Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises / Service Compétitivité et performance environnementale / Sous-direction Performance environnementale et valorisation des territoires / Bureau Eau, sols et économie circulaire](https://alim.agriculture.gouv.fr/ift/Direction_générale_de_la_performance_économique_et_environmentale_des_entreprises/_Service_Compétitivité_et_performance_environmentale/_Sous-direction_Performance_environmentale_et_valorisation_des_territoires/_Bureau_Eau_sols_et_économie_circulaireLicence_ouverte_2.0)Licence ouverte 2.0

NARDO, Michela, SAISANA, M., SALTELLI, A. et TARANTOLA, S., 2005. *Tools for Composite Indicators Building*. European Communities, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen Econometrics and Statistical Support to Antifraud Unit I-21020 Ispra (VA) Italy.

OECD, Paris, 2001. *Multifunctionality: towards an analytical framework*. Paris. ISBN 978-92-64-19217-1.

PACINI, Cesare, WOSSINK, Ada, GIESEN, Gerard, VAZZANA, Concetta et HUIRNE, Ruud, 2003. Evaluation of sustainability of organic, integrated and conventional farming systems: a farm and field-scale analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 1 avril 2003. Vol. 95, n° 1, pp. 273-288. DOI 10.1016/S0167-8809(02)00091-9.

PANNELL, David J et GLENN, Nicole A, 2000. A framework for the economic evaluation and selection of sustainability indicators in agriculture. *Ecological Economics*. 1 avril 2000. Vol. 33, n° 1, pp. 135-149. DOI 10.1016/S0921-8009(99)00134-2.

PANNELL, David et SCHILIZZI, S., 1999. Sustainable Agriculture: A Matter of Ecology, Equity, Economic Efficiency of Expedience. *Journal of Sustainable Agriculture*. 1999. Vol. 13, n° 4, pp. 57-66. DOI 10.1300/J064v13n04_06.

PAPY, François, 2008. Le système de culture : un concept riche de sens pour penser le futur. *Cahiers Agricultures*. 1 mai 2008. Vol. 17, n° 3, pp. 263- 269 (1). DOI 10.1684/agr.2008.0201.

PARDO, G., RIRAVOLOLONA, M. et MUNIER-JOLAIN, N. M., 2010. Using a farming system model to evaluate cropping system prototypes: Are labour constraints and economic performances hampering the adoption of Integrated Weed Management? *European Journal of Agronomy*. 1 juillet 2010. Vol. 33, n° 1, pp. 24-32. DOI 10.1016/j.eja.2010.02.003.

PLUMECOCQ, Gael, DEBRIL, Thomas, DURU, Michel, MAGRINI, Marie-Benoît, SARTHOU, Jean Pierre et THEROND, Olivier, 2018. The plurality of values in sustainable agriculture models: diverse lock-in and coevolution patterns. *Ecology and Society*. 9 février 2018. Vol. 23, n° 1. DOI 10.5751/ES-09881-230121.

PRATO, Tony et HERATH, Gamini, 2007. Multiple-criteria decision analysis for integrated catchment management. *Ecological Economics*. 1 août 2007. Vol. 63, n° 2, pp. 627-632. DOI 10.1016/j.ecolecon.2007.01.003.

RAJAKARUNA, Nishanta et BOYD, Robert S., 2019. Edaphic Factor. In : FATH, Brian (éd.), *Encyclopedia of Ecology*. Second Edition. Elsevier. pp. 361-367. ISBN 978-0-444-64130-4.

RAO, Desiraju, 2007. Microbial Diversity, Soil Health and Sustainability. *J. Indian. Soc. Soil Science*. 1 janvier 2007. Vol. 55, pp. 392- 403.

SACCÁ, Maria Ludovica, BARRA CARACCILO, Anna, DI LENOLA, Martina et GRENNI, Paola, 2017. Ecosystem Services Provided By Soil Microorganisms. In : LUKAC, Martin, GRENNI, Paola et GAMBONI, Mauro (éd.), *Soil Biological Communities and Ecosystem Resilience*. Cham : Springer International Publishing. 2017. pp. 9-24. Sustainability in Plant and Crop Protection. ISBN 978-3-319-63336-7.

SADOK, Walid, ANGEVIN, Frédérique, BERGEZ, Jacques-Eric, BOCKSTALLER, Christian, COLOMB, Bruno, GUICHARD, Laurence, REAU, Raymond, MESSÉAN, Antoine et DORÉ, Thierry, 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*. 1 septembre 2009. Vol. 29, n° 3, pp. 447-461. DOI 10.1051/agro/2009006.

SAVOIS, Vincent et MUNIER-JOLAIN, Nicolas, 2003. *DECID'HERB - Application WEB d'aide au choix d'un programme de lutte contre les mauvaises herbes des champs cultivés, dans le cadre d'une*

agriculture respectueuse de l'environnement. 2003. INRA – UMR BIOLOGIE ET GESTION DES ADVENTICES – DIJON.

SCHÄRLIG, Alain, 1985. *Décider sur plusieurs critères: panorama de l'aide à la décision multicritère*. Suisse. ISBN 978-2-88074-073-3. EAN : 9782880740733

SCHAUB, A., TOUPET, Toupet, DEYTIEUX, V., TOQUÉ, C., PETIT, Petit, CADOUX, S., MINETTE, S., VIVIER, C., GELOEN, M., MASSOT, P., FONTENY, C. et REAU, R., 2016. *Décrire un système de culture expérimenté pour aider à son pilotage, faciliter son analyse et communiquer. Guide méthodologique du réseau expérimental du Réseau Mixte Technologique « Systèmes de culture innovants »*.

SEBILLOTTE, M., 1990. Some concepts for analysing framing and cropping systems and for understanding their different effects. In : *Proceedings of first congress of the European Society of Agronomy*. Paris. 1990.

TIBI, Anaïs et THEROND, Olivier, 2017. Évaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE. *INRA*. 2017. pp. 12. DOI hal-02990793.

TILMAN, David, CASSMAN, Kenneth G., MATSON, Pamela A., NAYLOR, Rosamond et POLASKY, Stephen, 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. août 2002. Vol. 418, n° 6898, pp. 671-677. DOI 10.1038/nature01014.

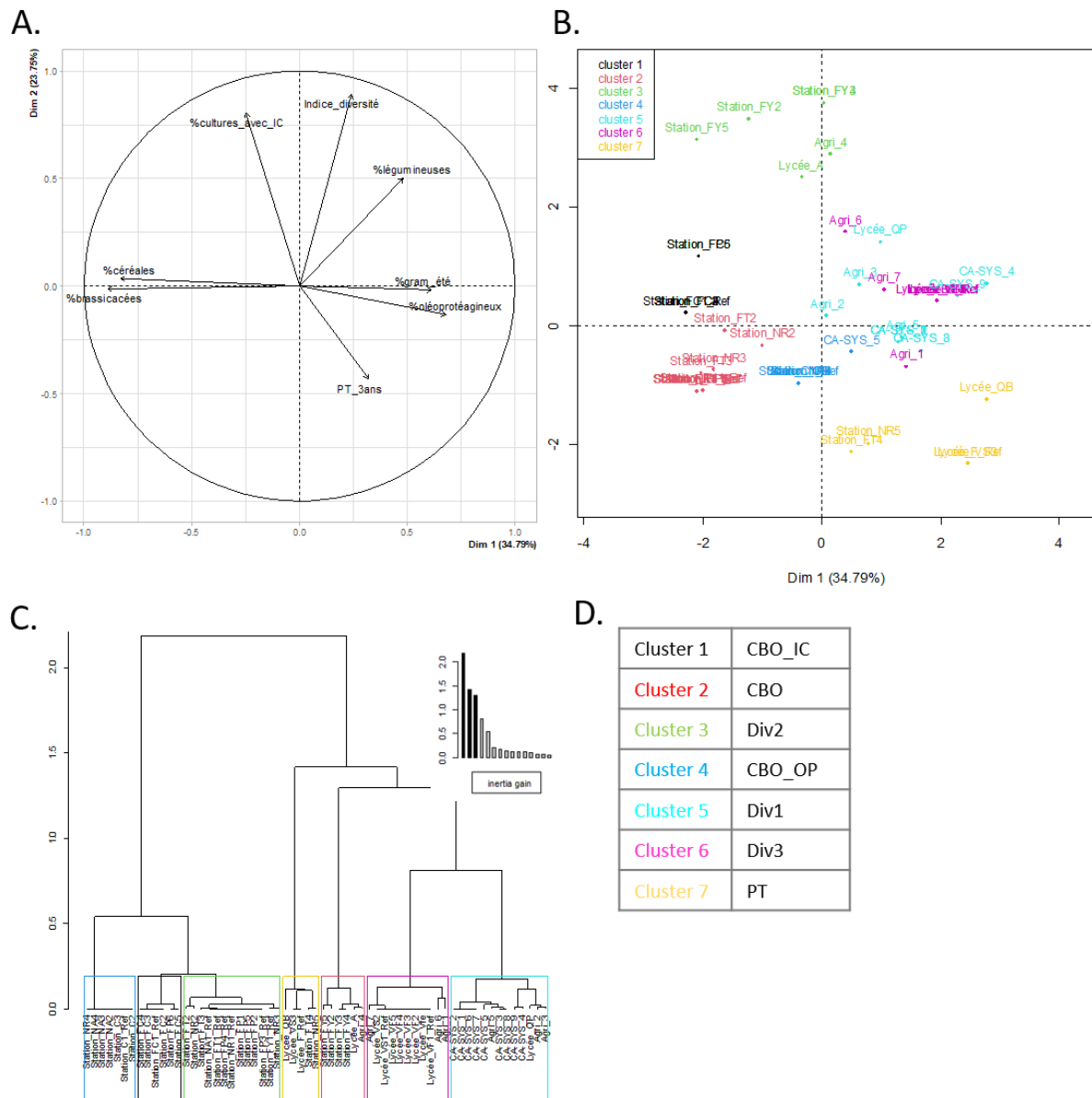
VASILEIADIS, V. P., MOONEN, A. C., SATTIN, M., OTTO, S., PONS, X., KUDSK, P., VERES, A., DORNER, Z., VAN DER WEIDE, R., MARRACCINI, E., PELZER, E., ANGEVIN, F. et KISS, J., 2013. Sustainability of European maize-based cropping systems: Economic, environmental and social assessment of current and proposed innovative IPM-based systems. *European Journal of Agronomy*. 1 juillet 2013. Vol. 48, pp. 1-11. DOI 10.1016/j.eja.2013.02.001.

WEZEL, A., BELLON, S., DORÉ, Thierry, FRANCIS, C., VALLOD, D. et DAVID, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2009. Vol. 29, n° 4, pp. 503-515. DOI 10.1051/agro/2009004. A1

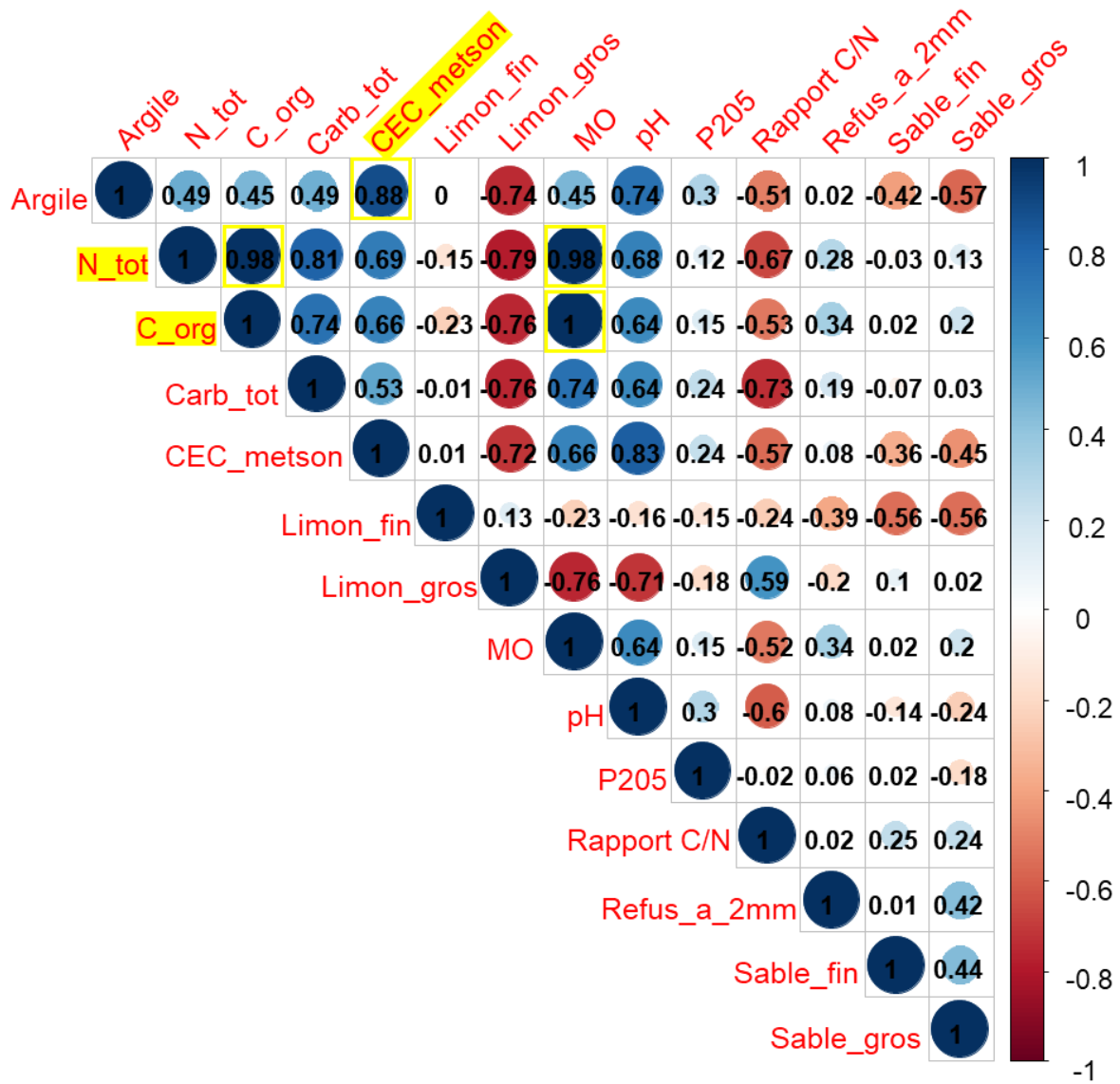
WOOD, Jennifer L., LIU, Wuxing, TANG, Caixian, FRANKS, Ashley E., WOOD, Jennifer L., LIU, Wuxing, TANG, Caixian et FRANKS, Ashley E., 2016. Microorganisms in heavy metal bioremediation: strategies for applying microbial-community engineering to remediate soils. *AIMS Bioengineering*. 2016. Vol. 3, n° 2, pp. 211-229. DOI 10.3934/bioeng.2016.2.211.

YANG, Tony, SIDDIQUE, Kadambot H. M. et LIU, Kui, 2020. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review. *Global Ecology and Conservation*. 1 septembre 2020. Vol. 23, pp. e01118. DOI 10.1016/j.gecco.2020.e01118.

Annexe 1 : Etapes de construction d'une typologie de type de rotation culturale. Graphique de corrélation des variables (A.) puis graphique des individus (B.) résultant de l'ACP, avec une coloration selon les groupes identifiés par la classification ascendante hiérarchique selon le critère de Ward (C.). Les noms attribués aux groupes sont présentés dans le tableau (D.).

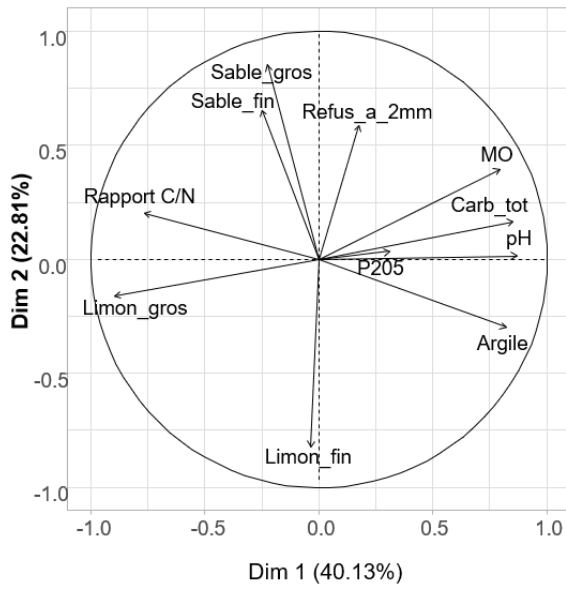


Annexe 2.1 : Matrice des corrélations entre les propriétés biologiques, physiques et chimiques des sols prélevés. Les variables surlignées en jaune ont été retirées (corrélation supérieure à 0.85 avec une autre variable).

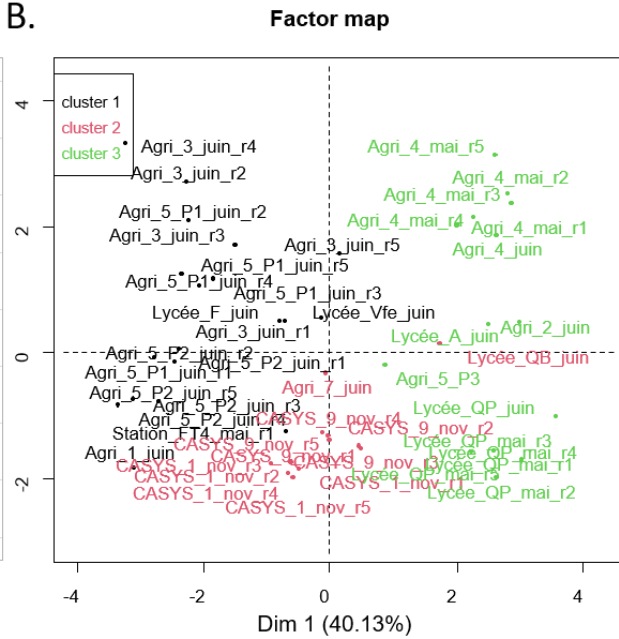


Annexe 2.2 : Etapes de construction d'une typologie de type de sol. Graphique de corrélation des variables (A.) puis graphique des individus (B.) résultant de l'ACP, avec une coloration selon les groupes identifiés par la classification ascendante hiérarchique selon le critère de Ward (C.). Les noms attribués aux groupes sont présentés dans le tableau (D.)

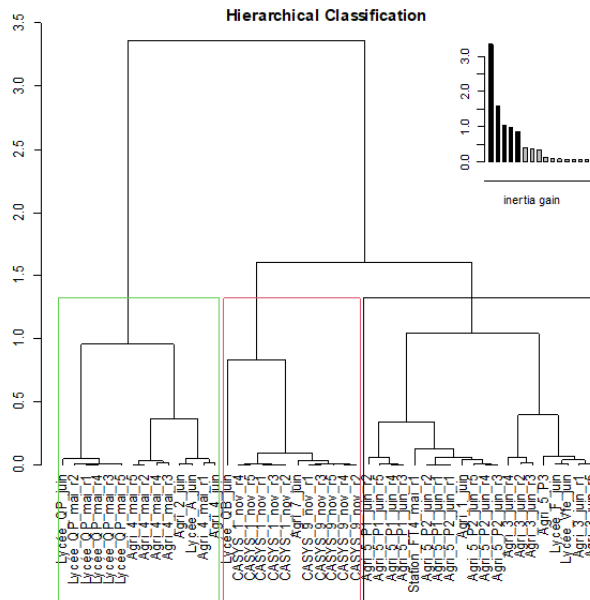
A.



B.



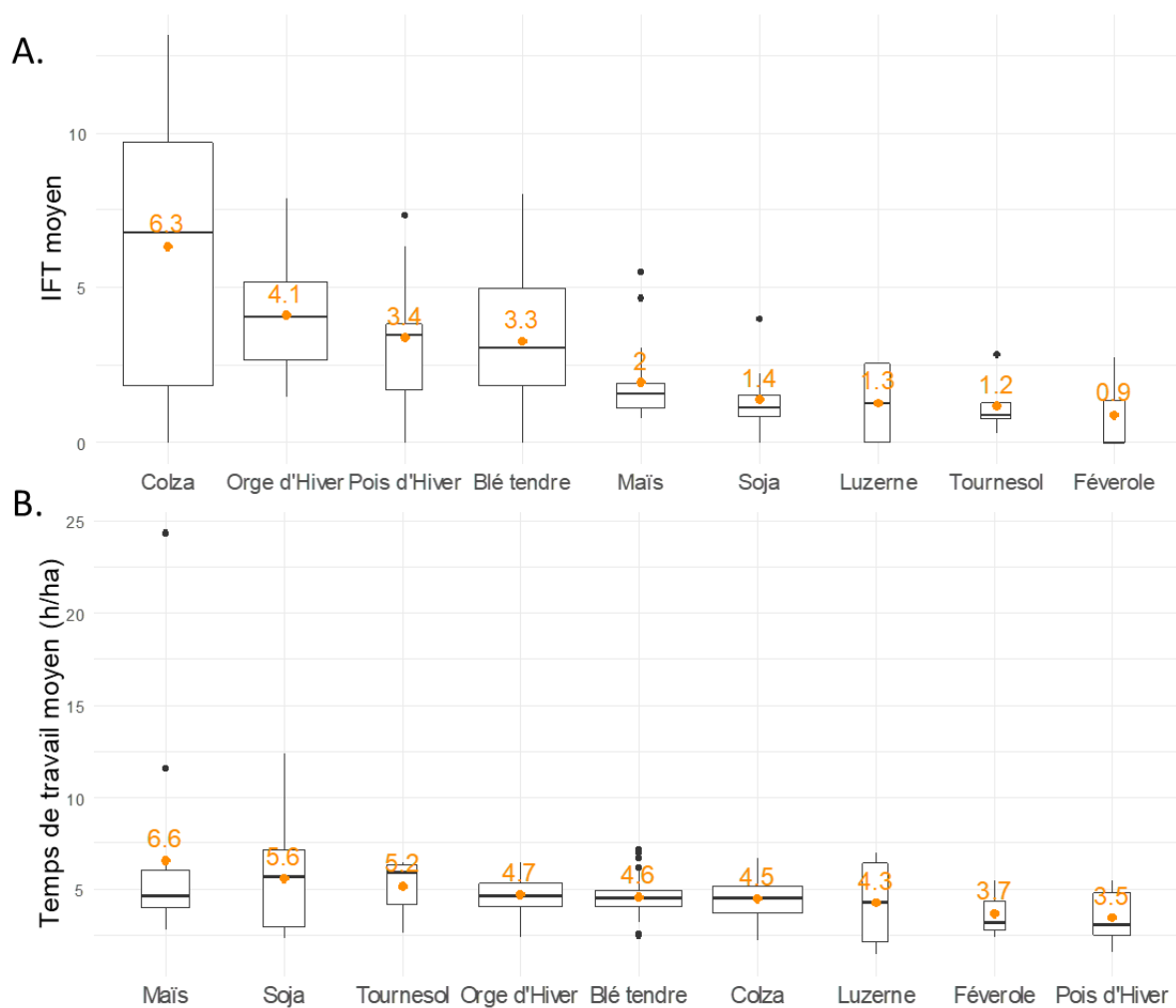
C.



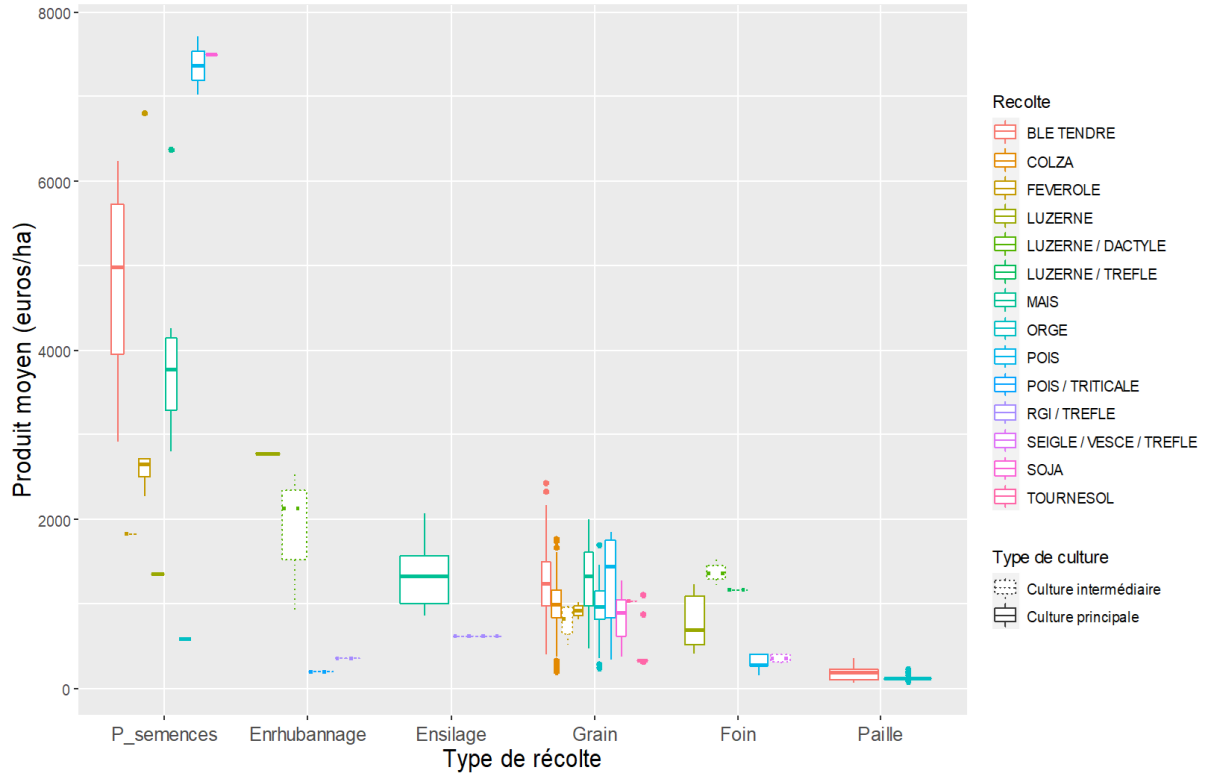
D.

Cluster 1	Type_3
Cluster 2	Type_2
Cluster 3	Type_1

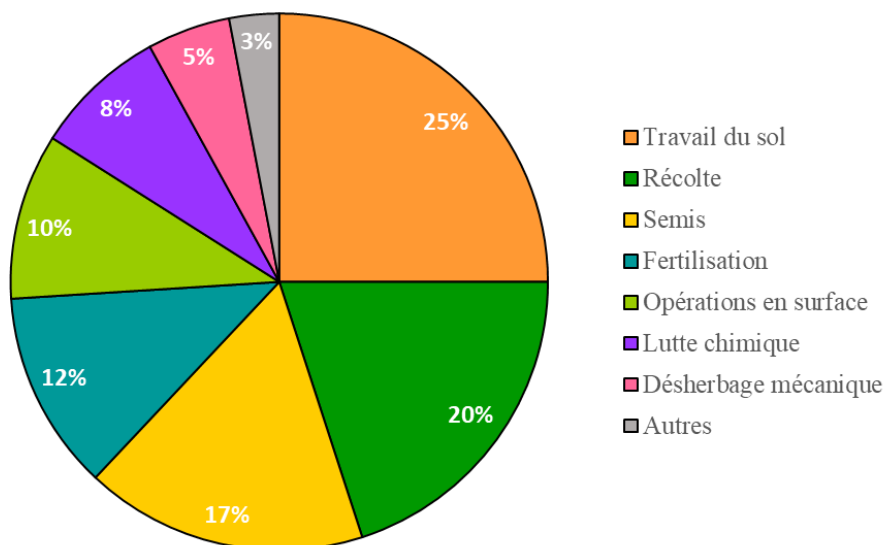
Annexe 3 : Diagrammes en boîte qui représentent la distribution des IFT chimique hors traitement de semences (A.) et du temps de travail (B.) pour les 9 cultures les plus représentées dans le réseau, tout SDC confondus. Pour chaque culture, la valeur en orange indique la moyenne et les cultures sont rangées par ordre décroissant selon cette valeur. La largeur des boîtes est corrélée au nombre de SDC qui cultivent l'espèce dans le réseau (colza : 53, orge : 46, pois d'hiver : 6, blé tendre : 51, maïs : 15, soja : 9, luzerne : 4, tournesol : 6, féverole : 3).



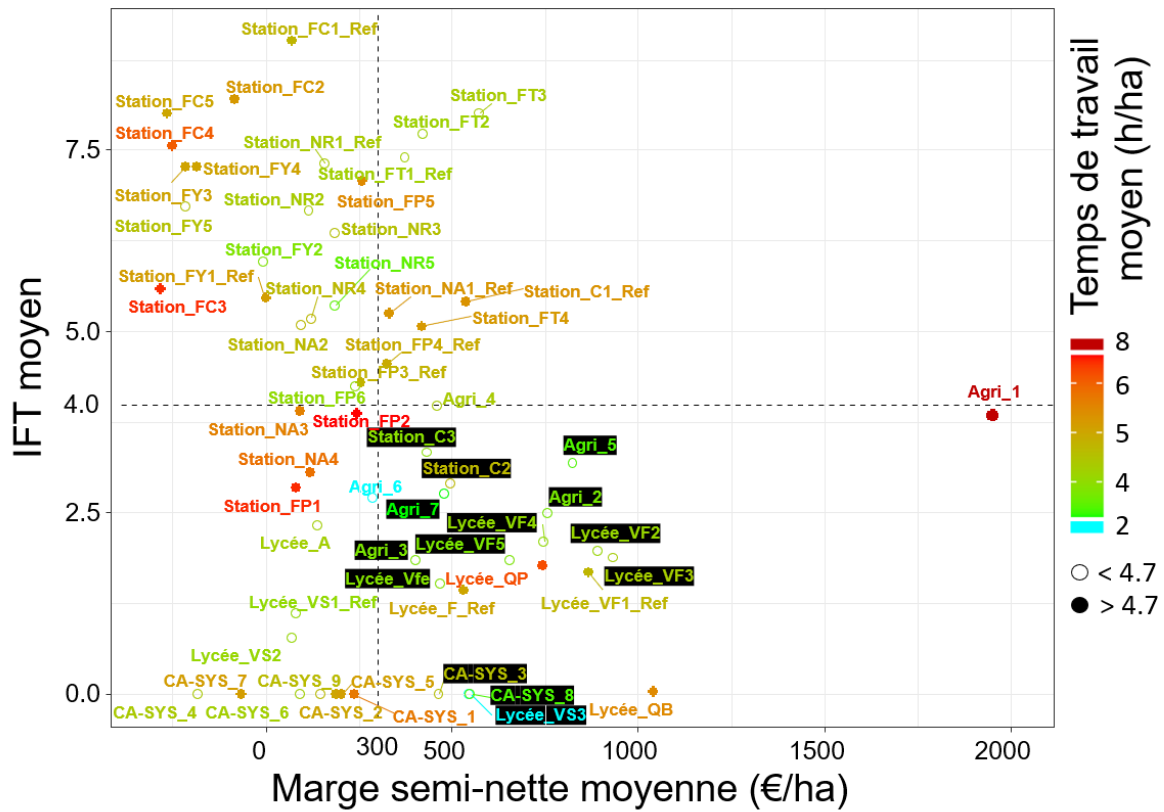
Annexe 4 : Diagrammes en boîte qui représentent la valeur du produit de récolte moyen, tout SDC confondu, pour tous les types de récolte présents dans le réseau. Les couleurs correspondent aux cultures et le type de trait permet de distinguer les valorisations de cultures intermédiaires. La largeur des boîtes n'a pas de signification.



Annexe 5 : Diagramme circulaire qui présente les proportions moyennes du temps de travail consacré à chaque activité agricole par rapport au temps de travail moyen total.



Annexe 6 : IFT moyen en fonction de la MSN moyenne pour les 61 systèmes du réseau avec une indication du temps de travail moyen selon un gradient de couleurs. Les lignes pointillées indiquent les valeurs moyennes de l'IFT et de la MSN ; le remplissage ou non des points indique le caractère supérieur ou inférieur à la moyenne de TT. Les SDC sur fond noir ont des IFT inférieur à 4, des MSN supérieures à 313 €/ha et des TT inférieurs à 4.7 h/ha).



Annexe 7 : Résumé en anglais

Context

The term ‘Agroecology’, created in the 1930s, has several definitions. Today, it means both a scientific discipline, a set of agricultural practices and a political or social movement. When considering the ‘practice’ aspect, two types of agroecology are distinguished : a weak one and a strong one. While the first one is based on substitution and efficiency principles only, that aim simply to optimize the current production systems and to reduce the negative impacts on the environment, the second one is more integrative and questions the current agricultural model entirely. Based on the valuation and mobilization of biological and ecological processes in order to provide ecosystem services, strong agroecology calls for a deep redesign of the agroecosystems. It is recognized as a relevant approach to meet the challenges of sustainable agriculture. However, agroecological systems are very diverse and there is still a need to gather more knowledge about its economic, social and environmental performances.

The issue of ‘sustainability’ is multi-dimensional. Thus, the sustainability assessment of an agrosystem requires a multi-criteria analysis. Indeed, multicriteria assessments (MCA) integrate several heterogeneous variables from different subject areas and allows an interpretation of the whole. MCAs rely on the calculation of indicators that measure a set of criteria. Since the 1990s, many sustainability evaluation methods have emerged but their modalities are still discussed. The most important ones are : the degree of consideration of the production situation, the scale of the study (eg: territory, landscape, farm), the nature and number of indicators to consider and finally, the way to analyze them and the choice to aggregate them into one final score. Those choices depend on the objective(s) of the MCA, the person(s) to whom it is dedicated and the type of system being assessed.

Agroecological systems can be defined as systems that implement practices whose goal is to value and mobilize ecological processes. To assess the effects of a combination of practices on the sustainability performances, the scale of the ‘cropping system’ (CS) seems to be appropriate. Indeed, a CS is defined by the technical operations implemented on the field, by the set of decision rules at its origin, and by the biophysical context that conditions the state of the field. It allows to analyze the consistency of the combination of techniques resulting from the management strategy. Moreover, this scale implies to integrate the production situation: it includes the biophysical and socio-economic features of the CS that guide farmer’s decisions. The main components of the production situation are: soil and climatic conditions, harvest quality requires according to the type of production, and the regulations.

Many sustainability indicators have been developed and approved by the scientific community. About the economic performance, gross margin and semi-net margin are often used because they allow to measure the efficiency of the system (eg: achieving high yields with few inputs).

The social dimension is mainly reduced to the workload, based on a sum of the working times per activity (that does not include the time spent for observations or administrative tasks). Concerning the environmental performances, they are more diverse. Two kind of criteria can be distinguished: those that quantify the amount of external resources used and those that account for the effects of agricultural practices on the environmental compartments. For the second one, soil quality is the most commonly assessed criterion and is frequently measured with organic matter content and erosion risk. Some studies are starting to look at the microbial parameters because they appear as good indicators for soil quality. To go further, it would be interesting to link the taxonomic composition of soil microbial community in order to identify particular taxa that could be used as soil quality indicators.

Finally, there is no universal method to analyze the range of sustainable indicators. It is possible to perform simple descriptive analysis with bar charts to compare the CS, with boxplots to assess the variability within one CS, with tradeoff curves to study the relationship between two indicators, etc. Other methods consist in aggregating all the indicators into a final score. This approach allows to obtain a clear result but in the same time, raises issues about the degree of consistency when associating indicators from different nature, and about the subjectivity when weighting each indicator.

The aim of this study is first to assess the sustainability of agroecological CSs within the region Bourgogne Franche-Comté and study the relationship between the indicators. Second, it is to analyze the composition of soil microbial communities to investigate a possible link between the abundance of taxa and CS features and agricultural practices.

Material and method

The aim of I-SITE ‘Agroecologie en Bourgogne Franche-Comté’ project is to study the multi-performance of agroecological systems within the area. It started in 2017 and lasted for three years. It is the result of a collaboration between ‘UMR Agroécologie’, the research unit from INRAE Dijon, ‘Dijon Céréales’, one of the main agricultural co-operative group of the region, and ‘AgrOnov’, a pole for innovation.

The main issue of this project is to determine if agroecological systems can conciliate the three components of sustainability, and to identify the best ones. To do so, two actions have been carried out. First, the design of the CA-SYS platform : a « hot spot » of agroecology implemented at the experimental station of INRAE at Bretenière. Its purpose is to maximize the biological and ecological processes to conciliate the economic and environmental performances within ten years. Since 2017, the system is pesticide-free and the plots are managed either with direct seedling (permanent or non-permanent) or superficial tillage (with or without fertilizers). Moreover, agroecological structures like flower strips and hedges have

been introduced. Those cropping systems are breaking strongly with the current agrosystems and allow to study the effect of a strong agroecology. In a second phase, a network of agroecological CSs have been build. It is composed of 61 CSs within the region, and belong to farmers (7), agricultural schools (4) and experimental stations from ARTEMIS (3). They have all been qualified as “agroecological” but they are not at the same level of agroecology (ie: they differ strongly in their level of reliance on ecological processes). They generally follow one to three guidelines among: the reduction of input use, the reduction of tillage, the maximization of soil covering and the improvement in protein autonomy.

Scientific teams have gathered information about technical management and features for all the CS. From these data, three performance indicators have been calculated. First, the **treatment frequency index (TFI)** that estimates the number of registered doses applied, for each pesticide, per hectare and per crop season. It is calculated for each pesticide application as the ratio ‘application rate’ / ‘registered dose’ multiplied by the proportion of the surface treated. This indicator summarizes the level of dependence on pesticides. It can be calculated for one particular pesticide type (eg: herbicides). Then, the **semi-net margin (SNM)** which is calculated as the gross product per hectare from which the input costs (fertilizers, pesticides, seeds, fuel, water) and mechanization costs are subtracted. This indicator expresses the production efficiency of the system but does not include the labor costs. Finally, the **working time (WT)**, which is the sum of the times per hectare for all the technical operations, has been calculated as an indicator of the workload. Price references for SNM calculation and work flow for WT calculation were extracted from the database of AGROSYST platform which gathers data directly uploaded by farmers.

Those three indicators were averaged over the CS as the mean of the values of all the plots and crop seasons. The performances of the CSs according to each indicator are first compared. Then, the relationship between the indicators are analyzed. Finally, the indicators are normalized with a re-scaling method and the CSs are rated according to their worst performance (ie: the value of the worst indicator become the final score for the CS). Moreover, two major elements that characterize the CSs are used to interpret the results: the level of diversification in crop rotations and the depth of soil.

For six CS, scientific teams also carried out soil sampling and performed microbiological analysis. The aim was to study soil bacterial communities. The samplings have been made over two years exclusively in plots with a grain crop (2018) followed by a pea crop (2019). Total community DNA was extracted from soil samples and 16s RNA genes were isolated and amplified. Those amplicons were sequenced and assigned to a taxonomic classification at three taxonomic levels : phyla, class, order, family and genus. Finally, the relative abundance of the taxa present in the samples were determined. From these data, permutation tests and differential

expression tests (*DESeq2*) were performed. They allow to identify which factors are impacting the microbial community and which taxa are mainly concerned.

Main results and discussions

TFI values are widely dispersed (values ranging from 0 to 9) among the CSs and they draw a strong gradient. This highlights a high dependency on pesticides for some CS, which is likely to be a consequence of a high pest pressure. Moreover, it appears that the lower the total TFI, the higher the proportion of TFI herbicides. This suggests a greater difficulty in decreasing the use of herbicides compared to the other pesticides. The great variation of TFI among CSs is likely to be linked with the types of crop within the rotation. Indeed, the average TFI varies a lot according to the crop (3 times higher for rapeseed than wheat).

SNM values are also widely dispersed, ranging from -300 to 2000 €/ha. 11 CSs have a negative margin which means that the outcome (from the harvest) do not compensate the production costs. Compared to the other CSs, they have a combination of high operational costs and low outcomes. This is likely to be linked with a high pest pressure combined with poor soil quality. On the contrary, there are very efficient CSs which manage to meet a high production with low input use. Those CSs probably rely on a strong mobilization of ecological processes. However, the type of crops in the rotation has to be taken into account: one of the most efficient CS includes a temporary grassland in its rotation, which often requires low-cost operations. Moreover, the selling prices are very different according to the price of production (eg: selling prices for seed production are 4 times higher than those for grain) which explains the very high margins of some CSs. However, the calculation of the SNM does not take into account any additional cost related to the quality requires in seed production.

WT values vary between 2 and 6 h/ha with one extreme value at 8 h/ha. The most explanatory factor of those disparities is the time dedicated to tillage (25% of the total working time in average). The introduction of cover crops implies supplementary operations and thus, higher working time, but for some CSs, it is compensated by a no-till strategy. Some CSs use mechanical weeding but in most cases, it is not compensated with a reduction of pesticide use; this highlights a great difficulty to control pests.

When studying the **relationship between TFI and SNM**, it seems that there is an antagonism between the TFI and the SNM, particularly for the CSs on deep soils (depth greater than 50 cm). Indeed, lower pesticide use can lead to a decrease in yields, due to a higher pest pressure, but it also leads to lower operational costs. A positive correlation between a decrease in TFI and an increase in NSM can be explained by a minimized decrease in yields due to the adoption of a combination of agroecological practices (which favor the mobilization of ecological processes that helps pest regulation). Moreover, all the CSs with low TFI combined with high SNM present diversified crop rotations (with 5 to 10 different species, presence of legumes,

oilseeds, grasslands and/or 40-75% of cover crops). These results confirm the positive effects (direct or indirect) of crop diversification for the performances of the CSs, which is mostly due to the disruption of pests cycles and the increase in auxiliaries' biodiversity.

By comparing the results with the normalized indicators, the economic performance appears to be the limiting factor for a majority of CSs, suggesting that they rather tend to maximize environmental and social criteria. This could be explained by a high proportion of CSs implemented in experimental stations. Those CSs may be more economically risky than those belonging to farmers, whose farm sustainability depends on economic performances.

The **ranking of the CSs** according to their worst performance allowed to select a set of 18 CSs considered as the best ones. The majority of them have diversified rotations and use reduced-till or no-till. Four of them have shallow soils but they seem to compensate this drawback with reduced or no-till which is likely to improve soil quality. Three CSs are pesticide-free which shows that it is possible to reach good economic and social performances without pesticides. Especially, one of them combines zero pesticide with direct seedling which is considered as a very risky technique (as tillage is an efficient way to reduce weed pressure).

Regarding the results of **microbiological analysis**, nine factors are significantly impacting on the composition of microbial communities: the CS, crop rotation type, soil characteristics, the month of the sampling, the type of sampling (soil with or without a crop), TFI, tillage type, fertilization type and soil depth. The effect of the presence of a crop is consistent with the capacity of plants to recruit soil microbes. Moreover, those results confirm that microbial communities can be shifted according to the features of the CS and its production situation. However, an effect of the sampling time may interfere.

When performing the differential presence analysis with *DESeq2*, we chose to focus on the most abundant taxa which were: *Pseudomonas*, *Janthinobacterium*, *Mucilaginibacter* et *Stenotrophomonas*. They are all more abundant in the samples collected in May than in those collected in June or November. May samples correspond only to soils with a crop, suggesting that there is an effect of the plant that modifies the habitat of the rhizosphere leading to a recruitment of particular taxa. It is not surprising for *Pseudomonas* and *Stenotrophomonas* that has been recognized as plant growth-promoting bacteria. Moreover, *Stenotrophomonas* is more abundant in CSs with occasional plowing, which is consistent with the literature.

Conclusion

There are strong disparities among the CSs when analysis their economic, social and environmental performances. It is particularly clear for TFI values that show a strong gradient and illustrate different "levels of agroecology". This results show the diversity of possible

trajectories for agroecological systems, which is based on both the diversity of production situations and the diversity of point of view. The ranking shows that the best performances were linked to the introduction of a combination of agroecological practices: diversified rotations (5 to 10 species, presence of legumes and oilseeds), limited tillage (no tillage or no tillage at all) and/or increased soil cover with the establishment of intermediate crops or temporary grasslands. Soil depth appeared as a strong driver of the performance, which is not surprising as deep soils are associated with a better yield potential. However, the good performances of some CSs with shallow soils show that agroecological practices help to offset this drawback.

To rank the CSs according to their worst performance seems to be a good approach to identify the best systems (as those whose reconcile all the dimensions of sustainability). It avoids to select CSs with a compensation effect of a bad performance by a good one. Indeed, according to sustainability and agroecological principles, the environmental, economic or social components are not exchangeable.

For this sustainability MCA, we used only three indicators. Obviously, it is not enough to summarize the whole complexity of CSs multi-performance and many aspects have been neglected. It would be wise to enrich this analysis with the addition of more indicators in order to temperate the results and maybe identify limits for the best CSs. Moreover, it would be more relevant to separate the CSs according to their situation production and compare like with like. Indeed, we showed here that soil depth is an important driver of the multi-performance.

Our results about the impact of CSs features on microbial communities confirm that microbial taxa could be used as indicators of soil quality (and by extension, of the environmental performance). But here, the number of CSs assessed (six) was not enough to come to any reliable conclusion. Moreover, we did not consider the rare species in the analysis, which is limiting because rare taxa are known to play important roles in several ecological processes.

 agriculture • alimentation • environnement 	Diplôme : Ingénieur Agronome Spécialisation / option : Agroécologie Enseignant référent : Matthieu CAROF
Auteur(s) : Solèmne SKORUPINSKI Date de naissance : 6 mars 1997 Nb pages : 26 Annexe(s) : 7 (14 pages) Année de soutenance : 2021	Organisme d'accueil : INRAE Dijon Adresse : 17 rue Sully, 21000 Dijon Maître de stage : Nicolas MUNIER-JOLAIN
Titre français : Evaluation multicritère de systèmes de culture agroécologiques en Bourgogne Franche-Comté Titre anglais : Multicriteria assessment of agroecological cropping systems from Bourgogne Franche-Comté	
Résumé : L'agroécologie est considérée comme une approche pertinente pour répondre aux enjeux du développement durable mais il est nécessaire d'apporter davantage de connaissances sur la multi-performance des systèmes agroécologiques. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet I-SITE dont l'objectif est d'évaluer si des systèmes agroécologiques peuvent concilier les trois composantes de la durabilité : environnementale, économique et sociale. Un réseau de 61 systèmes de culture a été constitué en Bourgogne Franche-Comté. Les conduites techniques et les caractéristiques de ces systèmes ont été renseignées, et des prélèvements de sol ont été réalisés pour analyser les communautés microbiennes. Grâce à ces données, nous avons réalisé 1) une évaluation multicritère, fondée sur le calcul de trois indicateurs de performance (IFT, marge semi-nette et temps de travail) puis, un classement des systèmes selon leur multi-performance. Les fortes disparités des performances au sein du réseau permettent d'identifier un gradient d'agroécologie selon les pratiques mises en place. Le classement révèle que les meilleurs systèmes sont caractérisés par la mise en place cohérente de pratiques agroécologiques telles que la diversification des rotations, la diminution du travail du sol et la maximisation de la couverture du sol. Puis, nous avons réalisé 2) une analyse de la composition des communautés microbiennes. Les résultats révèlent un lien entre une abondance plus importante dans les sols de bactéries PGPR, tels que <i>Pseudomonas</i> et <i>Stenotrophomonas</i> , et l'implantation d'une culture de céréale ou de pois.	
Abstract : Agroecology is now considered as a relevant approach to meet the challenges of sustainable development. Still, more knowledge is needed about the multi-performance of agroecological systems. The aim of I-SITE project is to determine the potential of agroecological systems to conciliate the three dimensions of sustainability : the economic, social and environmental. A network was built with 61 cropping systems in the region Bourgogne Franche-Comté. Technical management data and features of the cropping systems were collected, while soil sampling were carried out to analyse the microbial communities. First, we realized 1) a multicriteria assessment based on the calculation of three performance indicators (TFI, semi-net margin and working time), followed by a ranking of the cropping systems according to their multi-performance. The disparities of the performances among the cropping systems draw a gradient of agroecological levels, which can be linked to the practices used. According to the ranking, the best cropping systems are defined with a coherent introduction of agroecological practices such as crop diversification, reduction of tillage and soil covering. Then, we realized 2) a study of the microbial communities composition. The main results highlight a link with the abundance of PGPR, such as <i>Pseudomonas</i> and <i>Stenotrophomonas</i> , and the presence of a grain or pea crop.	
Mots-clés : Agroécologie, Système de culture, Evaluation multicritère, Durabilité, Multi-performance, Analyse microbiologique, Communauté microbienne Key words : Agroecology, Cropping system, Multicriteria assessment, Sustainability, Multi-performance, Microbiological analysis, Microbial community	