



HAL
open science

Quels antagonismes entre critères de performance agro-éco-environnementale? Analyse d'un réseau national de démonstration FERMEcophyto

Chloé Saglibene

► **To cite this version:**

Chloé Saglibene. Quels antagonismes entre critères de performance agro-éco-environnementale? Analyse d'un réseau national de démonstration FERMEcophyto. Sciences agricoles. 2016. dumas-01416270

HAL Id: dumas-01416270

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01416270>

Submitted on 14 Dec 2016

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

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

AGROCAMPUS
OUEST

- CFR Angers
 CFR Rennes



unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



agrosolutions



Année universitaire : 2015 – 2016

Spécialité : **Ingénieur Agronome**

Spécialisation : **Sciences et Productions
Végétales**

Option : **Ingénierie des Agrosystèmes**

Mémoire de Fin d'Études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
 de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
 d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Quels antagonismes entre critères de performance agro-éco-environnementale ?

Analyse d'un réseau national de démonstration FERMEcophyto

Par Chloé SAGLIBENE



Soutenu à Rennes, le 13 septembre 2016

Devant le jury composé de :

Président : Philippe LETERME

Maîtres de stage : Martin LECHENET
Guillaume PY

Enseignant référent : Matthieu CAROF

Autres membres du jury :

Anne LE RALEC (Agrocampus Ouest)

David BOUILLE (Chambre d'Agriculture d'Ille-et-Vilaine)

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité :

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible⁽¹⁾.

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant).

Date et signature du maître de stage⁽²⁾ : 18/08/2016

agrosolutions

83 avenue de la Grande Armée
75782 Paris cedex 16

www.agrosolutions.com

SIRET N° 532 260 379 00013

Droits d'auteur :

L'auteur⁽³⁾ autorise la diffusion de son travail

Oui Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

Date et signature de l'auteur :

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant :

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé

Oui Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement mes maîtres de stage, Martin Lechenet et Guillaume Py, qui m'ont donné l'opportunité de réaliser ce travail enrichissant. Je les remercie pour la qualité de leur encadrement, leur disponibilité et leurs précieux conseils qui m'ont permis d'avancer. Ça a été un réel épanouissement de travailler à leurs côtés.

Je remercie également les différents membres de «l'équipe DEPHY» de l'INRA de Dijon, pour leur accueil, suivi et soutien, plus particulièrement Nicolas Munier-Jolain, pour ses bons conseils et ses remarques constructives.

Merci à toute l'équipe de l'UMR Agroécologie (INRA de Dijon), qui a permis la réalisation de ce stage dans les meilleures conditions qui soient et avec laquelle ça a été un réel plaisir de partager ces six mois.

Un grand merci à Laure Mamy (INRA de Grignon), de s'être rendue disponible si rapidement, et pour ses précieux éclaircissements sur le fonctionnement du modèle MACRO.

Je remercie les différents membres de ma famille, qui ont toujours été présents à mes côtés. Plus particulièrement mes grands-parents et mes parents pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de mes études.

Table des matières

I.	Introduction	1
II.	Matériels et méthodes	4
1.	Le réseau FERMEcophyto	4
2.	Méthodes employées	5
i.	Agrégation des données à l'échelle système de culture	5
ii.	Détermination des situations de production	5
iii.	Calcul des indicateurs de performance	6
iv.	Etude de la relation entre les critères de performance	8
III.	Résultats	9
1.	Etude des relations entre le niveau d'usage de pesticides et les différents piliers de la durabilité	9
i.	Peut-on concilier un faible usage de pesticides et une bonne rentabilité ?	9
ii.	Peut-on concilier un faible usage de pesticides et une bonne productivité ?	10
iii.	Un faible usage de pesticides est-il lié à une forte charge de travail ?	12
iv.	Un faible usage de pesticides est-il associé à un faible impact sur l'environnement ?	13
2.	Etude de la faisabilité des SdC à faible impact environnemental	14
i.	Peut-on concilier une bonne rentabilité et un faible impact environnemental ?	14
ii.	Une forte rentabilité est-elle associée à une forte charge de travail ?	16
3.	Existe-t-il des conflits entre performances environnementales ?	17
i.	Etude de la relation entre pertes d'azote par lessivage et émissions de GES	17
ii.	Etude de la relation entre émissions de GES et fuites de matières actives	19
iii.	Etude de la relation entre pertes d'azote par lessivage et fuites de m.a.	19
IV.	Discussions et limites	20
1.	Discussion des résultats	20
i.	Recherche de systèmes conciliant durabilité et faibles usage de pesticides	20
ii.	Faisabilité économique de la préservation de l'environnement	22
iii.	Conciliation des performances environnementales	23
2.	Limites de l'étude	24
i.	Analyse sociale de la durabilité	24
ii.	Analyse économique de la durabilité	24
iii.	Analyse environnementale de la durabilité	25
V.	Conclusion	25
	Bibliographie	27
	Sitographie	30

Liste des illustrations

Figure 1 : Localisation des SdC en Grandes Cultures et Polyculture-élevage engagés dans le réseau FERMEcophyto	4
Figure 2 : Localisation des SdC selon la relation entre IFT et rentabilité	9
Figure 3 : Distributions de la rentabilité et de l'IFT de chaque groupe	10
Figure 4 : Localisation des SdC selon leur relation entre IFT et productivité	11
Figure 5 : Distributions de la productivité et de l'IFT selon les groupes	11
Figure 6 : Localisation des SdC selon l'effet de l'IFT sur la charge de travail	12
Figure 7 : Distributions de la charge de travail et de l'IFT de chaque groupe.....	12
Figure 8 : Localisation des SdC selon l'effet de l'IFT sur les fuites de m.a. dans les eaux souterraines	13
Figure 9 : Distributions de l'IFT et des fuites de m.a. dans les eaux souterraines selon les groupes ...	13
Figure 10 : Localisation des SdC selon la relation entre émissions de GES et rentabilité	14
Figure 11 : Distributions des rentabilités et des émissions de GES selon les groupes.....	14
Figure 12 : Localisation des SdC selon leur relation entre rentabilité et quantité d'azote lessivé	15
Figure 13 : Distributions de la rentabilité et de la quantité d'azote lessivé selon la relation entre ces deux critères.....	15
Figure 14 : Localisation des SdC selon la précision de l'estimation de la relation entre rentabilité et fuites de m.a.....	16
Figure 15 : La rentabilité des SdC en fonction de la concentration en m.a. des eaux souterraines	16
Figure 16 : Localisation des SdC selon l'effet de la charge de travail sur la rentabilité	16
Figure 17 : Distributions de la rentabilité et de la charge de travail de chaque groupe.....	17
Figure 18: Localisation des SdC selon leur relation entre émissions de GES et azote lessivé.....	17
Figure 19 : Distributions des émissions de GES et de la quantité d'azote lessivé de chaque groupe ..	18
Figure 20 : Localisation des SdC selon leur relation entre émissions de GES et fuites de m.a.	19
Figure 21 : Localisation des SdC selon leur relation entre quantité d'azote lessivé et fuites de m.a. ...	19
Figure 22 : Distribution de la quantité d'azote lessivé en fonction du groupe	20
Tableau 1 : Tableau récapitulatif des résultats	20

Liste des annexes

Annexe 1 : Détermination des zones vulnérables sur le territoire national	I
Annexe 2 : Définition des zones de production spécifiques	I
Annexe 3 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre l'IFT et la rentabilité	II
Annexe 4 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre l'IFT et la productivité.....	III
Annexe 5 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre l'IFT et la charge de travail	IV
Annexe 6 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre l'IFT et la concentration en m.a. des eaux souterraines.....	V
Annexe 7 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre les émissions de GES et la rentabilité.....	VI
Annexe 8 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre quantité d'azote lessivé et rentabilité....	VII
Annexe 9 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre la charge de travail et la rentabilité	VIII
Annexe 10 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre émissions de GES et quantité d'azote lessivé	IX
Annexe 11 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre quantité d'azote lessivé et concentration en m.a. dans les eaux souterraines	X
Annexe 12 : Violin plot des rentabilités (a1) et des IFT (a2) pour une sélection de cultures du réseau FERMEcophyto	XI
Annexe 13 : Répartition des émissions de GES par poste (moyenne des SdC du réseau)	XII
Annexe 14 : Comparaison des concentrations en matières actives dans les eaux souterraines (en µg/L) des SdC du réseau FERMEcophyto (a1) avec les mesures nationales (a2)	XIII

Glossaire

APCA : Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture

Diversité culturelle : Nombre de classes culturales différentes (Céréales à paille, légumineuses à graines, prairies temporaires, cultures à débouchés spécifiques, Maïs/sorgho/tournesol), dont la proportion dans l'assolement est supérieure à 10%

Diversité des périodes de semis : Nombre de périodes de semis différentes de cultures dont la proportion dans l'assolement est supérieure à 10% (Période 1 : entre le 1^{er} août et le 15 septembre ; Période 2 : entre le 15 septembre et le 1^{er} novembre ; Période 3 : entre le 1^{er} novembre et le 1^{er} février ; Période 4 : entre le 1^{er} février et le 1^{er} avril ; Période 5 : entre le 1^{er} avril et le 1^{er} août)

GES : Gaz à effet de serre

IFT : Indice de Fréquence de Traitement

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

LASSO : Least absolute shrinkage and selection operator

m.a. : Matière active

MO : Matière organique

RU : Réserve utile

SAU : Surface agricole utile

SdC : Système de culture (SdC)

I. INTRODUCTION

Les pesticides dans l'agriculture : d'hier à aujourd'hui.

L'évolution des pratiques agricoles depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle a permis d'accroître la production de denrées alimentaires afin de subvenir aux besoins d'une population mondiale croissante. De concert avec le développement des machines agricoles, l'utilisation de fertilisants de synthèse, d'eau d'irrigation, ainsi que l'amélioration génétique des variétés cultivées, le recours aux pesticides a généré une hausse considérable des rendements, avec notamment un gain de plus de 30 q/ha pour le blé tendre entre 1950 et 1980 (Soltner, 2005).

Néanmoins, la transition de l'agriculture vers un mode de production de plus en plus dépendant des pesticides s'est accompagnée de fortes présomptions des effets nocifs des pesticides sur la santé humaine et d'impacts négatifs sur l'environnement et la biodiversité (Tilman *et al.*, 2002). Parmi ceux-ci, peuvent être cités la contamination des sols et des ressources en eau, le risque sanitaire pour les applicateurs et les effets nocifs sur des organismes non ciblés tels que les pollinisateurs, les poissons et les oiseaux (Lamichhane *et al.*, 2016).

L'évolution des pratiques agricoles s'est accompagnée d'une spécialisation régionale des productions agricoles, d'une simplification des systèmes de culture avec une diminution de la diversité cultivée et de ce fait d'une homogénéisation des paysages agricoles. A un recours de plus en plus systématique à la lutte chimique pour gérer les pressions croissantes des bioagresseurs s'est ajoutée une restriction de la gamme de pesticides autorisés, 73% des matières actives disponibles ayant été retirées entre 1993 et 2010 (Barzman *et al.*, 2015). La conjonction de ces facteurs a conduit à une augmentation de la fréquence d'apparition des résistances aux principales molécules chimiques utilisées (Lamichhane *et al.*, 2016).

Ces constats ont conduit à une remise en question des modes de production agricole et à l'émergence d'une volonté d'adopter des leviers autres que chimiques. Cette mouvance vers une agriculture plus durable soulève de nouveaux défis pour l'agriculture d'aujourd'hui : assurer une production stable et de qualité tout en préservant l'environnement et le bien-être des communautés rurales (Davis *et al.*, 2012 ; Deytieux *et al.*, 2012).

Un contexte de réduction d'usage de produits phytosanitaires.

En France, avec la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement en 2008, s'affiche une forte volonté publique et politique de mettre en place des plans d'action visant à assurer un développement durable sur le territoire français (Le Grenelle de l'environnement, 2007).

A la suite du Grenelle de l'environnement, le plan ECOPHYTO a été lancé en 2008 avec l'objectif notamment de réduire de 50% l'utilisation de produits phytosanitaires dans un délai de 10 ans, si possible (Plan écophyto 2018, 2008).

Ce plan est piloté par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt et s'inscrit également dans le cadre de la directive européenne adoptée en 2009 (Directive 2009/128/EC) qui demande à ce que « *les Etats membres aient recours à des plans d'actions nationaux visant à fixer des objectifs quantitatifs, des cibles, des mesures, des calendriers et des indicateurs en vue de réduire les risques et les effets de l'utilisation des pesticides sur la santé humaine et l'environnement et à encourager le développement et l'introduction de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures et de méthodes ou de techniques de substitution en vue de réduire la dépendance à l'égard de l'utilisation des pesticides* ».

Cet objectif de réduction sera loin d'être atteint en 2018, l'utilisation de pesticides ayant au contraire augmenté ces dernières années (Lamichhane *et al.*, 2016). Une nouvelle version, le plan ECOPHYTO II, a vu le jour en 2015, réaffirmant un objectif de diminution du recours aux produits phytosanitaires de 50% mais selon une trajectoire en deux temps : une réduction de 25% à l'horizon 2020 reposant sur l'optimisation des systèmes de production et une réduction supplémentaire de 25% à l'horizon 2025, reposant sur des modifications profondes des systèmes de production et des filières (Plan Ecophyto II, 2015).

La réalisation de l'objectif de diminution de l'utilisation des pesticides de 50% et les conséquences d'une telle réduction sur l'économie agricole sont toujours sujettes au débat (Jacquet *et al.*, 2011 ; Lechenet *et al.*, 2016b)

Réduire l'usage des pesticides en grandes cultures.

Dans le secteur des grandes cultures, l'utilisation de produits phytosanitaires par hectare est plus faible que dans des secteurs tels que l'arboriculture ou la viticulture, mais la surface nationale consacrée aux grandes cultures est la plus importante et représente plus de la moitié de la superficie agricole nationale (Agreste, 2012). C'est donc un secteur incontournable lorsqu'il s'agit de réduire la dépendance du pays aux pesticides (Jacquet *et al.*, 2011). Les marges de progrès aujourd'hui accessibles pour réduire l'usage de pesticides sont susceptibles de varier suivant le type de bioagresseur considéré. Si une réduction de l'usage des fongicides et insecticides est déjà observée, il apparaît plus délicat de réduire l'usage d'herbicides, qui sont les pesticides les plus utilisés pour un grand nombre de cultures (Boissinot *et al.*, 2011 ; Cooper and Dobson, 2007 ; Deytieux *et al.*, 2012). De plus, réduire drastiquement la dépendance aux pesticides impliquera sans doute une reconception des systèmes de culture existants afin qu'ils combinent avec cohérence des leviers agronomiques pour une maîtrise des bioagresseurs autrement que par le recours au levier chimique (Barzman *et al.*, 2015).

Les impacts de l'agriculture sur l'environnement.

L'utilisation des produits phytosanitaires engendre des pollutions potentiellement néfastes pour l'Homme et les autres organismes vivants (Mami *et al.*, 2008). De plus en plus d'études s'intéressent aux impacts des pesticides sur l'environnement et sur la santé humaine. Un enjeu important est la compréhension des flux de pesticides dans les sols principalement à l'origine de leur présence dans les eaux souterraines (Younes and Galal-Gorchev, 2000). En 2013, 7% de la population française a été exposée, au moins une fois, à une eau du robinet non conforme aux limites de qualité sur sa teneur en pesticides (Direction générale de la santé, 2015). La directive européenne (Directive 91/414 CEE) rend obligatoire l'évaluation des risques des pesticides pour l'applicateur, le consommateur et l'environnement (Mami *et al.*, 2008).

Un autre enjeu environnemental fort est lié à la fertilisation des parcelles, et plus spécifiquement au transfert des composés azotés vers le sol, l'air et l'eau. Ces transferts ont des conséquences sur l'équilibre des écosystèmes (COMIFER, 2013). La compréhension de la dynamique des flux entre les différents compartiments de l'environnement et de l'effet des pratiques agricoles sur ces flux est un élément clef pour optimiser les bilans azotés des systèmes de culture. La directive européenne 91/676/CEE dite « Directive nitrates » s'est traduite par la définition de zones vulnérables où sont imposées des pratiques agricoles particulières pour limiter les risques de pollution. Environ 55% de la surface agricole française est classée en zone vulnérable (Annexe 1, Directive Nitrates, 2015).

Un troisième enjeu environnemental important est la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'agriculture est l'un des principaux secteurs émetteurs de GES, responsable de 20% des émissions nationales (Gac *et al.*, 2011). L'agriculture est ainsi appelée à contribuer à l'effort général

de réduction des émissions de GES pour atteindre les objectifs fixés aux niveaux national et mondial (division par 4 des émissions d'ici 2050 par rapport aux émissions en 1990, Pellerin *et al.*, 2014).

Mise en place de réseaux de démonstration à l'échelle nationale.

Dans le cadre du plan Ecophyto, le réseau de fermes de démonstration, DEPHY FERME, a été lancé en 2011. Ce réseau regroupe à ce jour environ 1900 exploitations agricoles engagées dans une démarche de réduction d'usage de pesticides. Il a pour objectifs l'accompagnement des agriculteurs des fermes du réseau, la production de connaissances et la communication vers le monde agricole. En parallèle a été lancé en 2011 le réseau FERMEcophyto animé par Agrosolutions, filiale expertise-conseil en agroenvironnement d'In-Vivo, en association avec ses coopératives partenaires. Ce réseau est issu de la volonté des coopératives d'aller au-delà de la réduction de l'usage des produits phytosanitaires en cherchant à améliorer également la compétitivité des exploitations sur plusieurs plans. Ainsi, en plus de la réduction d'usage des pesticides, est visée la conciliation de faibles impacts des pratiques agricoles sur la qualité de l'air, de l'eau et sur la biodiversité, avec les objectifs économiques des exploitations engagées (Poupart, 2014).

Ces réseaux, ainsi que diverses expérimentations mises en place, servent de support à de nombreuses études ayant pour objectifs (i) l'évaluation de la faisabilité d'une réduction importante de l'usage de produits phytosanitaires, (ii) ses conséquences sur les performances économiques et environnementales des exploitations agricoles et (iii) l'identification de combinaisons de leviers d'action utilisables pour la conception de systèmes de culture durables.

La recherche de systèmes de culture durables.

Un système de culture est dit durable lorsqu'il parvient à concilier les performances économiques, sociales et environnementales sur le long terme. L'évaluation de la durabilité est complexe car (i) elle met en jeu un ensemble d'indicateurs issus de domaines différents et (ii) elle dépend des objectifs visés par l'agriculteur. L'évaluation de la durabilité nécessite d'avoir une approche multicritère afin de prendre en compte simultanément ses différentes composantes (Deytieux *et al.*, 2015). De nombreuses méthodes d'évaluation de la durabilité ont été développées au cours des dernières décennies (Bockstaller *et al.*, 2009). Une des difficultés rencontrées dans ces différentes méthodes est l'importance relative à donner à chaque indicateur de performance (Allen *et al.*, 1991). Une autre difficulté est liée au fait que peuvent se révéler des antagonismes entre critères de performance agro-éco-environnementale. Dans ce cas, concilier les trois piliers de la durabilité nécessite de trouver des compromis dans l'optimisation des différentes facettes de la performance.

L'existence de ces conflits potentiels entre les différents aspects de la durabilité soulève de nombreuses questions : par exemple, une diminution d'usage de pesticides est-elle envisageable sans impacter la rentabilité et/ou la productivité des systèmes ? La réduction d'usage d'herbicides est-elle compatible avec une réduction d'utilisation d'énergie fossile et des émissions des GES ? Peut-on réduire l'impact environnemental d'un système de culture sans alourdir la charge de travail qui lui est associée ?

L'objectif de ce travail est d'analyser les relations entre critères de performance dans le cadre d'une analyse multicritère des systèmes de culture du réseau de fermes FERMEcophyto. La problématique associée à cette étude est la suivante :

Quelles sont les relations entre critères de performance agro-éco-environnementale?

Existe-t-il des antagonismes entre ces critères ?

Pour répondre à cette problématique, nous sommes tout d'abord parti du postulat que les stratégies de production sont influencées par le contexte dans lequel elles sont mises en œuvre et sont donc potentiellement différentes d'une région à une autre (Aouadi *et al.*, 2015).

La situation de production a été définie comme les aspects physiques, biochimiques, paysagers et socio-économiques caractérisant ce contexte de production et ayant un impact sur les décisions prises par l'agriculteur et les performances du système de culture qu'il met en œuvre (Aubertot et Robin, 2013). Elle reflète donc les opportunités et les contraintes auxquelles est confronté chaque agriculteur.

Dans cette étude, nous avons émis l'hypothèse que la situation de production influence la relation entre les critères de performance.

Notre travail a donc initialement consisté en la caractérisation des facteurs de la situation de production associés à chaque système de culture du réseau. L'analyse des relations entre performances agro-éco-environnementales intègrera l'effet de ces facteurs.

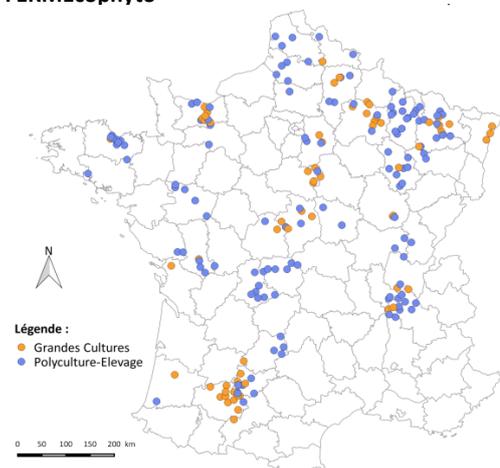
La relation entre les critères de performances est étudiée par couple d'indicateurs. Dans un premier temps, nous chercherons à analyser les relations entre le niveau d'usage de pesticides et différents aspects de la durabilité. Puis, nous analyserons la faisabilité économique des systèmes à moindre impact sur l'environnement. Pour terminer, nous étudierons la possibilité de concilier des performances environnementales.

II. MATERIELS ET METHODES

1. Le réseau FERMEcophyto

Le réseau FERMEcophyto a été lancé en 2011 en association avec 34 coopératives partenaires issues de toute la France et impliquant près de 300 agriculteurs. Ce réseau regroupe 5 filières que sont les grandes cultures, la polyculture-élevage, la culture légumière, la viticulture et l'arboriculture. La majorité des agriculteurs n'engagent qu'une partie de leur exploitation dans le réseau. Les caractéristiques de chaque parcelle engagée (surface, type de sol, pente...) sont répertoriées dans la base de données. A chaque campagne l'ensemble des pratiques culturales mises en œuvre par les agriculteurs sont collectées par les conseillers des coopératives et enregistrées dans une base de données. A partir de ces données, de nombreux indicateurs de performance sont calculés par Agrosolutions, dont certains seront utilisés dans cette étude.

Figure 1 : Localisation des SdC en Grandes Cultures et Polyculture-élevage engagés dans le réseau FERMEcophyto



La base de données utilisée pour ce travail répertorie 205 adhérents, appartenant aux filières polyculture-élevage ou grandes cultures et tous présents au moins deux années au sein du réseau. Au total, les caractéristiques et résultats de plus de 12 000 parcelles, réparties sur 5 campagnes (de 2011 à 2015), correspondant à environ 14 000 ha/an, sont analysés. L'échantillon d'exploitations étudié (Figure 1) offre un large panel de situations de production (e.g. diversité climatique et de type de sol) et de stratégies de gestion (e.g. diversité de successions culturales, de stratégies de travail du sol) à l'échelle du territoire national.

2. Méthodes employées

i. Agrégation des données à l'échelle système de culture

L'étude de la performance est réalisée à l'échelle du système de culture. Sur une exploitation donnée, un système de culture (SdC) correspond à l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre de façon homogène sur des parcelles conduites en vue des mêmes objectifs. Il est caractérisé par (i) une succession culturale, (ii) la conduite technique associée à chacune des cultures (Sebillotte, 1978). Mesurer une performance à l'échelle du SdC permet d'intégrer l'effet des interactions entre pratiques ainsi que les effets cumulatifs qui opèrent à une échelle pluriannuelle (effet précédent, effets cumulatifs sur les bioagresseurs endocycliques). Cette performance calculée à l'échelle du SdC reflète donc la cohérence des combinaisons de pratiques mises en œuvre par l'agriculteur (Lechenet *et al.*, 2016).

Etant donné que dans le réseau FERMEcophyto les données sont récoltées à l'échelle parcellaire, les performances calculées doivent être agrégées pour être exprimées à l'échelle du système de culture. Pour ce faire, les variables calculées à l'échelle parcellaire sont pondérées selon la part des parcelles dans l'assolement l'année *n*, donnant ainsi un poids plus fort aux parcelles plus grandes.

ii. Détermination des situations de production

Au total 25 variables ont été retenues pour caractériser le contexte biophysique (facteurs pédologiques, climatiques et paysagers) et socio-économique (e.g. présence d'élevage, accès aux débouchés) des exploitations du réseau.

Les variables climatiques :

Les variables climatiques ont été fournies par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) et sont issues de la base de données SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie). Elles correspondent à une moyenne sur dix ans (entre 2002 et 2011) des données climatiques journalières à l'échelle de 8*8 km.

L'étude des corrélations entre les variables disponibles nous a permis de sélectionner celles caractérisant au mieux les différents aspects du climat, tout en évitant la redondance de l'information. Ces variables sont : le volume de précipitations annuelles, la température moyenne annuelle, le nombre de jour de gel, l'évapotranspiration estivale, la vitesse moyenne du vent, le nombre de jours de pluie annuel ainsi que l'intensité des périodes de sécheresse (nombre annuel maximum de jours consécutifs sans précipitations).

Les variables pédologiques :

10 variables, disponibles dans la base de données et bien renseignées, ont été utilisées pour décrire les caractéristiques pédologiques des parcelles : le pH du sol, la réserve utile (RU), la teneur en cailloux du sol et du sous-sol, la teneur en matière organique (MO), la profondeur d'enracinement, le type de sol et de sous-sol (texture, ...) et enfin les phénomènes d'hydromorphie et la présence de dispositif de drainage dans les parcelles pour rendre compte de l'exposition de certaines parcelles à des excès d'eau.

Les variables paysagères, topographiques et d'opportunité :

Pour décrire le paysage dans lequel sont ancrées les parcelles, trois variables ont été déterminées. Le pourcentage de parcelles d'un SdC aux abords d'un cours d'eau permet de rendre compte d'un risque accru de pollution des eaux de surface et peut conditionner des pratiques spécifiques pour limiter ces pollutions. La longueur de haies par hectare a été déterminée pour caractériser le niveau de présence de ce type d'infrastructure agroécologique sur les parcelles. Enfin, la pente a été caractérisée suivant 4 niveaux et permet d'estimer le risque de ruissellement et d'érosion sur chaque

parcelle ainsi que la difficulté pour réaliser certaines interventions mécanisées. L'accès à l'irrigation est renseigné et détermine un levier éventuel pour certains agriculteurs face à des contraintes climatiques.

Les variables du contexte socio-économique :

Ces variables permettent de décrire la présence de débouchés potentiels pour certaines cultures, mais également la présence d'élevage ou le fait que les parcelles soient situées dans des zones sujettes à des réglementations environnementales.

Certaines cultures ne peuvent être adoptées par les agriculteurs sans considération des filières auxquelles ils ont accès. C'est le cas par exemple de la betterave sucrière, pour laquelle l'implantation n'est envisageable sans présence d'une sucrerie aux environs de l'exploitation agricole. Pour prendre en compte la possibilité d'implanter de telles cultures, une variable caractérise la présence ou non de débouchés pour ces cultures spécifiques.

Une variable caractérisant la présence d'élevage sur l'exploitation a également été retenue, car elle conditionne la possibilité d'implanter certaines cultures (cultures fourragères) et d'avoir recours à la fertilisation organique.

La part de l'assolement située dans une zone sujette à une réglementation environnementale a été calculée pour chaque SdC. Ces zones correspondent aux bassins de captage, zones vulnérables et zones d'actions complémentaires (Annexe 2). Ces zones ont été retenues car elles engendrent une gestion particulière des parcelles, du fait des contraintes spécifiques qui y sont associées.

Comme l'étude porte sur un SdC déclaré par exploitation, et non pas sur l'exploitation entière, la surface agricole utile (SAU) totale de l'exploitation est considérée ici comme une variable permettant de décrire le contexte socio-économique. En fonction de la taille de l'exploitation les enjeux reportés sur le système de culture considéré peuvent potentiellement varier.

iii. Calcul des indicateurs de performance

a. Marge semi-nette

La performance économique des SdC est un aspect important de la durabilité des systèmes de culture (Davis *et al.*, 2012). L'indicateur utilisé pour évaluer cette performance est la marge semi-nette, également appelée rentabilité :

$$\text{Rentabilité} = \text{Produit brut} - \text{Charges de mécanisation} - \text{Charges opérationnelles}$$

Le produit brut prend en compte le rendement obtenu pour la culture de l'année n et le prix de vente de celle-ci. Les charges opérationnelles prennent en compte les coûts des semences ou d'implantation de la culture, de fertilisation, des traitements phytosanitaires, de la consommation de carburant et de l'irrigation.

Cette rentabilité a été calculée pour chaque SdC suivant des coûts et des prix de vente standardisés à l'échelle nationale. Le contexte de prix étant très volatile, nous avons déterminé 10 scénarios contrastés de prix agricoles. Ces scénarios sont issus d'une base de données nationale relatant les variations mensuelles des prix d'achat et de vente des produits agricoles entre 2005 et 2015 (INSEE, 2015). Les dix scénarios de prix considérés dans cette étude sont issus d'une analyse en composante principale suivie d'une classification ascendante hiérarchique des prix mensuels (ces scénarios sont issus de : Lechenet *et al.*, 2016b). La rentabilité couvre ainsi bien la variabilité des contextes de prix.

Dans le but de s'affranchir de l'effet « taille des exploitations », qui influence fortement le dimensionnement du matériel utilisé, les charges de mécanisation ont été calculées pour un matériel et une exploitation standardisés (données issues de l'APCA, 2013). Le parc matériel standard utilisé a

été défini sur la base d'une exploitation de référence de 120 ha. Ainsi, les charges de mécanisation sont calculées à l'échelle du SdC avec les mêmes contraintes d'exploitation et peuvent donc être comparées entre elles. Elles tiennent compte du niveau d'utilisation du matériel sur chaque SdC en fonction de la durée d'amortissement qui lui est associée.

Pour le calcul du coût de fertilisation, il nous a fallu considérer les fertilisants minéraux et les amendements organiques, qui ont été considérés comme un coproduit de l'élevage. Or, s'il existe des références de prix et de leur fluctuation pour les fertilisants minéraux (INSEE, 2015), ce n'est pas le cas pour les organiques. Les coûts des fertilisants organiques ont donc été fixés à 50% du coût des unités de fertilisants minéraux.

b. Productivité

Pour pouvoir comparer la productivité de SdC impliquant des cultures différentes, la productivité est exprimée en quantité d'énergie récoltée par hectare et par an. Les rendements des cultures ont été convertis en énergie produite en se basant sur l'énergie contenue dans les parties récoltées, calculée à partir du pouvoir calorifique supérieur (Feedipedia, 2015).

c. Charge de travail

La charge de travail est exprimée en heure par hectare et est calculée sur la base du débit de chantier pour chaque opération mécanisée (APCA, 2013). Elle ne prend pas en compte le temps dédié au transport, à l'entretien du matériel, et au suivi des cultures.

d. Indice de fréquence de traitement

L'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) a été utilisé comme indicateur du niveau d'usage de pesticides. L'IFT mesure le nombre de doses de référence appliquées pour chaque produit phytosanitaire par saison culturale. Il est calculé de la façon suivante pour chaque intervention :

$$IFT = \frac{Dose\ appliquée * Surface\ traitée}{Dose\ de\ référence * Surface\ de\ la\ parcelle}$$

L'IFT d'une culture est la somme des IFT de chaque intervention. Pour chaque couple culture-pesticide, la dose de référence correspond à la plus petite dose homologuée du produit.

e. Emissions de gaz à effet de serre

La quantité de gaz à effet de serre (GES) émise est calculée *via* le guide GES'TIM (guide réalisé par les instituts techniques agricoles, Gac *et al.*, 2011) et suit la méthodologie d'analyse de cycle de vie de la partie amont agricole. Les émissions de GES (en g équivalent CO₂/ha) prennent en compte les émissions directes (au champ) et/ou indirectes (lors de la production) issues des fertilisations organiques et minérales, des produits phytosanitaires, des semences et du fioul.

f. Quantité d'azote lessivé

L'impact environnemental lié à la fertilisation des cultures a été estimé par la quantité d'azote lessivé par hectare au cours de l'hiver chaque année. Les flux de nitrates dans les sols sont modélisés *via* Epiclès, modèle développé par Agrosolutions. Ce modèle est un outil de plan de fumure qui se base sur la méthode du COMIFER (COMIFER, 2013). La quantité d'azote lessivé est calculée à partir du reliquat azoté entrée drainage et de la fraction de lessivage hivernal, tous deux estimés par Epiclès (Burns, 1976).

g. Fuites de matières actives dans les eaux souterraines

L'impact de l'utilisation de produits phytosanitaires sur l'environnement a été estimé *via* la concentration en matières actives (m.a.) retrouvées dans les eaux souterraines rechargeant la nappe. Cette concentration est estimée par le modèle MACRO 5.2 (Larsbo and Jarvis, 2003) adapté par

Agrosolutions. Ce modèle est un modèle mécaniste de simulation des flux d'eau et du devenir des pesticides dans les sols. Il prend en compte les conditions climatiques, les propriétés du sol, les cycles culturaux et itinéraires techniques associés et les propriétés chimiques des m.a. La sortie du modèle s'exprime en µg/L et peut être rapprochée du seuil de potabilité de 0.5 µg/L pour la somme des matières actives issu de la réglementation nationale.

Une des particularités de l'adaptation de MACRO par Agrosolutions est la confrontation des conditions d'application à 10 années climatiques. Ceci permet de s'affranchir de l'effet climatique annuel et d'offrir une sortie reflétant la combinaison entre les pratiques lors de l'application, les propriétés des m.a. appliquées et la sensibilité des parcelles à l'écoulement des m.a.

iv. Etude de la relation entre les critères de performance

L'étude de la relation entre critères de performance est réalisée par couple d'indicateurs. Cette approche permet de quantifier la relation entre deux critères de performance et d'identifier un éventuel antagonisme. Les variables caractérisant la situation de production sont insérées dans le modèle pour prendre en compte la situation de production lors de l'estimation de la relation entre les critères de performance.

C'est la méthode LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) qui est utilisée dans cette étude car c'est une méthode de régression avec pénalisation qui permet de gérer un nombre important de variables en cherchant un compromis entre le nombre de variables explicatives retenues dans le modèle et le pouvoir explicatif de celui-ci (Tibshirani, 1996). L'objectif de l'utilisation d'un modèle de régression est ici de déterminer l'effet marginal d'un critère sur un autre, en tenant compte des facteurs caractérisant la situation de production. Par exemple, pour l'étude de la relation entre rentabilité et IFT, le modèle s'écrit :

$$\text{Rentabilité} = \beta_1 \cdot \text{IFT} + \sum_{j=1}^n \beta_{j+1} \cdot \text{SP}_j + \sum_{k=n+1}^{2n} \beta_{k+1} \cdot \text{SP}_k \cdot \text{IFT} + \beta_0$$

où $\text{SP}_j, j \in [1, n]$, correspond aux n variables caractérisant la situation de production et $\beta_i, i \in [0, 2n+1]$ aux paramètres estimés. Ce modèle prend bien en compte en plus de l'IFT (en orange), les variables de situations de production (en vert) et l'interaction entre ces dernières et l'IFT (en bleu). L'étude de l'effet marginal de l'IFT sur la rentabilité se résume alors à la relation suivante (Lechenet *et al.*, 2016b) :

$$\text{Effet marginal de l'IFT} = \beta_1 + \sum_{k=n+1}^{2n} \beta_{k+1} \cdot \text{SP}_k$$

Cette méthode permet de calculer l'effet marginal qui correspond à la pente entre les deux indicateurs étudiés par SdC, chaque SdC ayant une situation de production particulière (e.g. une combinaison des variables qui lui est propre). Les coefficients de régression sont estimés en minimisant l'erreur quadratique résiduelle, sous une contrainte de la somme des valeurs absolues des coefficients. Cette contrainte est réalisée *via* le paramètre lambda ($\lambda \geq 0$) qui contrôle la complexité du modèle, de sorte que plus λ est grand, moins il y a de variables retenues dans le modèle (Avalos, 2009). L'introduction de la pénalisation réduit la variabilité de l'estimation et améliore ainsi la précision de la prédiction.

Le paramètre de régularisation λ est sélectionné par la méthode du « leave-one-out » de la validation croisée, qui consiste en un ré-échantillonnage de la base de données initiale en enlevant une observation à chaque itération et en mesurant la capacité du modèle à bien ré-estimer l'observation manquante. Le λ sélectionné est celui minimisant l'erreur de validation croisée. La sélection du λ aboutit à un ensemble de coefficients de régression ($\beta_i, i \in [1, 2n+1]$) permettant le calcul de la pente de la relation entre deux indicateurs, pour chaque SdC du réseau. La robustesse des pentes estimées en chaque site est évaluée par la méthode du bootstrap qui permet de déterminer un intervalle de confiance à 95% pour chaque pente estimée. Le bootstrap consiste à

effectuer 1000 tirages aléatoires avec remise parmi les observations, à appliquer 1000 fois la méthode LASSO, et donc à estimer pour chacune des 1000 itérations la pente de tous les SdC. La précision de l'estimation de la pente pour chaque SdC a été définie comme l'inverse de la variance de l'ensemble des estimations issues du bootstrap. L'effet marginal de l'indicateur regardé a été considéré comme positif (ou négatif) lorsque l'intervalle de confiance était strictement positif (ou négatif respectivement). Le LASSO a été réalisé avec la fonction `cv.glmnet` du package « `glmnet` » sous R v3.2.4.

Des cartes ont été réalisées pour illustrer les résultats obtenus par couple d'indicateurs de performance étudiés. Elles permettent de cartographier les valeurs de pente de chaque SdC. La couleur des points distingue les SdC suivant la relation dans laquelle ils s'inscrivent pour le couple d'indicateur étudié (pente négative, positive ou absence de pente significative), et la taille des points est proportionnelle à la précision de l'estimation de la relation. Les cartes ont toutes été réalisées avec QGIS, version 2.14.3-Essen.

Pour chaque relation, les SdC ont été divisés en trois groupes selon l'effet marginal de l'indicateur regardé (négatif, nul ou positif). Les différents groupes ont été comparés entre eux en utilisant la fonction `kruskal` du package « `agricolae` » et la méthode d'ajustement de la p-value de Benjamini & Hochberg. Les corrélations étudiées au sein de chaque sous-groupe ont été réalisées avec la fonction `cor.test` du package « `stats` » en appliquant la méthode de Spearman.

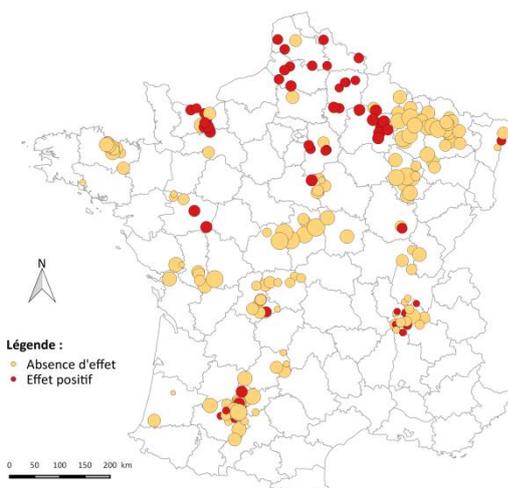
III. RESULTATS

1. Etude des relations entre le niveau d'usage de pesticides et les différents piliers de la durabilité

i. Peut-on concilier un faible usage de pesticides et une bonne rentabilité ?

L'étude de la relation entre IFT et rentabilité permet d'identifier deux groupes de situations de production (Figure 2).

Figure 2 : Localisation des SdC selon la relation entre IFT et rentabilité



Un premier groupe réunit des situations de production principalement localisées au Nord (29% des SdC), pour lesquelles la relation entre l'IFT et la rentabilité est positive (groupe rouge, Figure 2). Dans ce groupe, les SdC avec un plus faible IFT ont également une rentabilité plus faible.

Le second groupe de situations (71% des SdC) se caractérise par une absence de relation entre la rentabilité et le niveau d'usage de pesticides (groupe beige). Dans ce groupe, les SdC les moins dépendants des produits phytosanitaires n'ont pas nécessairement une rentabilité plus faible.

Le groupe beige réunit plus de SdC en polyculture-élevage que le groupe rouge (71% vs. 59%, Annexe 3).

Les deux groupes recouvrent des situations avec une grande variabilité de types de sols, mais dans le groupe rouge, les sols ont tendance à être plus profonds (92 cm vs. 76 cm) et à plus forte RU (138 mm vs. 104 mm).

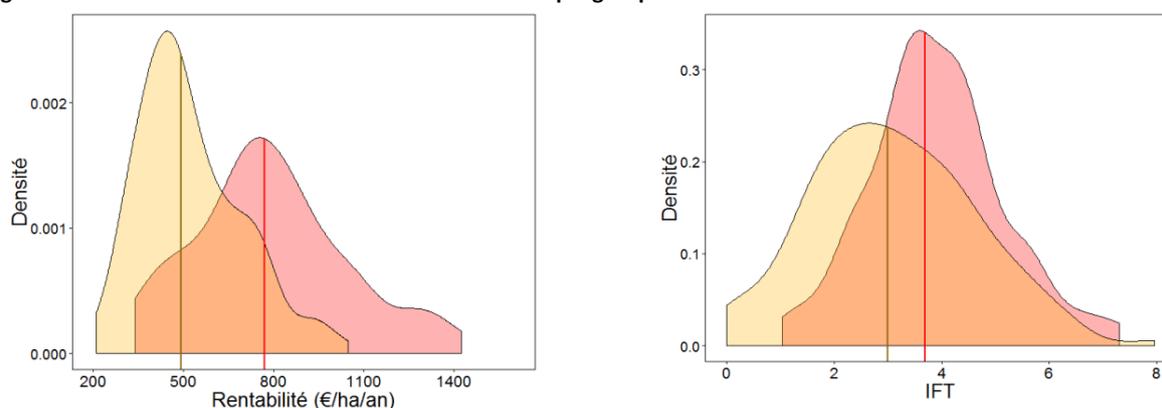
Les assolements des deux groupes sont majoritairement composés de céréales à paille (50-52%) et comportent les mêmes proportions de crucifères-oléagineuses (11-13%) et de prairies temporaires (5-9%).

Le groupe rouge se distingue principalement par la présence de cultures s'inscrivant dans des débouchés spécifiques (betterave et pomme-de-terre (10%), maïs-semence (4%)), qui sont absentes dans le groupe beige. Et également par ses proportions significativement plus faibles en orge d'hiver (4 vs. 11%) et en cultures d'été (16 vs. 22%).

Les SdC appartenant au groupe rouge ont tendance à avoir une rentabilité et un IFT plus élevés (respectivement +52% et +26%) par rapport à ceux du groupe beige (Figure 3).

Néanmoins, on remarque qu'au sein d'un même groupe, les niveaux de rentabilité et d'IFT sont très variables d'un SdC à un autre.

Figure 3 : Distributions de la rentabilité et de l'IFT de chaque groupe



NB : Les barres verticales correspondent aux valeurs médianes de chaque groupe.

Dans le groupe rouge, le taux de betterave et de pomme-de-terre dans l'assolement est positivement corrélé à l'IFT ($\rho=0.53$, $p\text{-value}=1.79 \times 10^{-5}$) et à la rentabilité ($\rho=0.36$, $p\text{-value}=4.60 \times 10^{-3}$). A l'inverse, le taux de cultures d'été est négativement corrélé à l'IFT ($\rho=-0.55$, $p\text{-value}=7.97 \times 10^{-6}$) et à la rentabilité ($\rho=-0.27$, $p\text{-value}=3.60 \times 10^{-2}$).

Dans le groupe beige, le taux de cultures d'été dans l'assolement est négativement corrélé à l'IFT ($\rho=-0.53$, $p\text{-value}=4.63 \times 10^{-12}$) et positivement corrélé à la rentabilité ($\rho=0.33$, $p\text{-value}=4.35 \times 10^{-5}$). Les taux de crucifères-oléagineuses et céréales à paille sont positivement corrélés à l'IFT ($\rho=0.77$, $p\text{-value}=2.43 \times 10^{-29}$ et $\rho=0.53$, $p\text{-value}=4.02 \times 10^{-12}$), sans être corrélés à la rentabilité. Le taux de prairies temporaires dans l'assolement est négativement corrélé à l'IFT ($\rho=-0.39$, $p\text{-value}=1.59 \times 10^{-6}$), et à la rentabilité ($\rho=-0.17$, $p\text{-value}=3.64 \times 10^{-2}$).

ii. Peut-on concilier un faible usage de pesticides et une bonne productivité ?

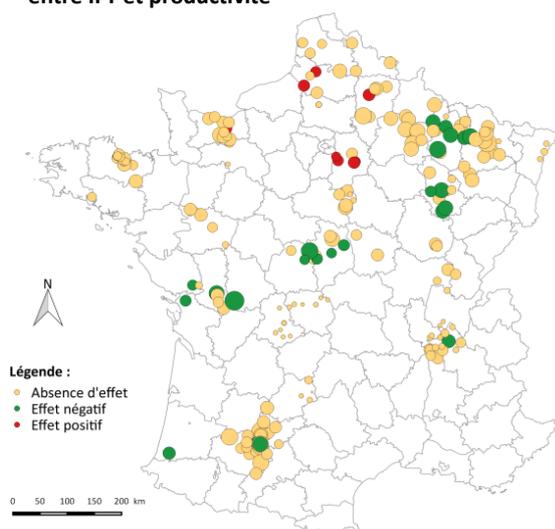
L'étude de la relation entre IFT et productivité permet d'identifier trois groupes de situations de production.

Un premier groupe réunissant 84% des SdC répartis sur toute la France et pour lequel il y a une absence de relation entre IFT et productivité (groupe beige, Figure 4). Dans ce groupe, les SdC avec les plus faibles IFT n'ont pas une productivité inférieure aux SdC à fort IFT.

Un deuxième groupe, localisé au Nord de la France (groupe rouge), qui réunit 4% des SdC et pour lequel la relation entre IFT et productivité est positive, i.e. dans ce groupe les SdC avec des IFT plus faibles ont également une productivité plus faible.

Un troisième groupe, contenant 12% des SdC (groupe vert) où la relation entre IFT et productivité est négative, i.e. les SdC avec les plus faibles IFT ont une productivité plus importante.

Figure 4 : Localisation des SdC selon leur relation entre IFT et productivité



Le groupe vert réunit des situations où les sols sont majoritairement argilo-calcaire superficiels (64% des SdC, Annexe 4). En comparaison avec les deux autres groupes, dans le groupe vert, les sols ont en moyenne des profondeurs et RU plus faibles (62 cm et 70 mm) et un taux de cailloux supérieur (14%). La proportion en céréales à paille n'est pas significativement différente (51-54%), mais avec moins de blé tendre d'hiver (30%) et plus d'orge d'hiver (12%). La proportion en crucifères-oléagineuses est supérieure (19%). Les proportions en cultures d'été, légumineuses à graines et prairies temporaires ne sont pas significativement différentes entre les groupes (respectivement 8-22%, 3-7% et 5-9%).

Le groupe rouge se distingue des deux autres groupes par des sols à 100% de type limono-argileux, et de la présence de betterave et de pomme-de-terre dans les assolements (15% en moyenne).

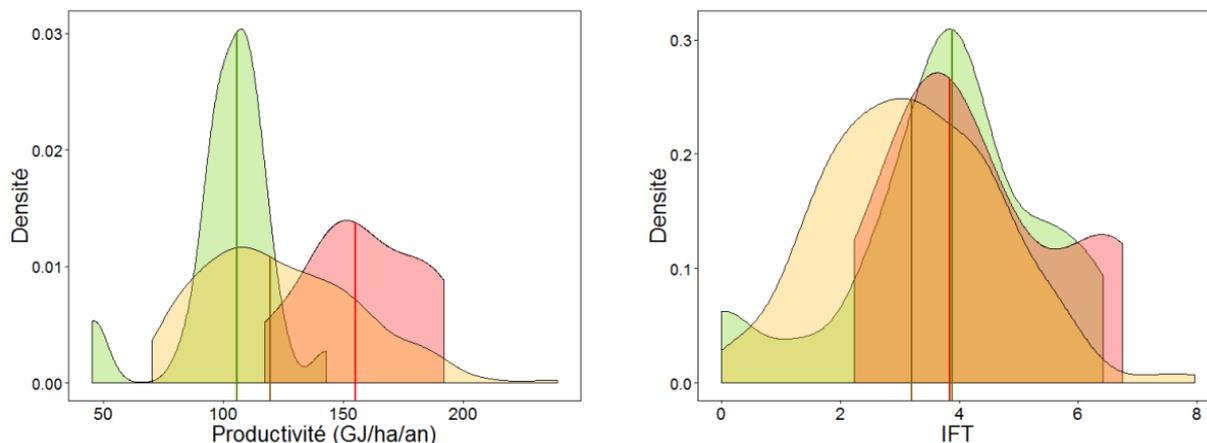
Dans le groupe rouge, les SdC ont tendance à être plus productifs, +28% par rapport au groupe beige et +56% par rapport au groupe vert, pour des niveaux d'usage de pesticides semblables (Figure 5).

Au sein d'un même groupe, on observe de la variabilité entre SdC sur les niveaux de productivité et d'IFT (Figure 5).

Dans le groupe rouge, la proportion en betterave et pomme-de-terre dans l'assolement est positivement corrélée à l'IFT ($\rho=0.86$, $p\text{-value}=1.07 \times 10^{-2}$) et la proportion en prairies temporaires négativement corrélée à l'IFT ($\rho=-0.74$, $p\text{-value}=3.75 \times 10^{-2}$) sans être toutes deux corrélées à la productivité. Le taux de légumineuses à graines est négativement corrélé à la productivité ($\rho=-0.81$, $p\text{-value}=1.59 \times 10^{-2}$), sans présenter de corrélation avec l'IFT.

Dans le groupe vert, la proportion de cultures d'été dans l'assolement est positivement corrélée à la productivité ($\rho=0.59$, $p\text{-value}=1.92 \times 10^{-3}$) et négativement corrélée à l'IFT ($\rho=-0.52$, $p\text{-value}=7.64 \times 10^{-3}$). Les taux de céréales à paille et crucifères-oléagineuses sont positivement corrélés à l'IFT ($\rho=0.68$, $p\text{-value}=1.84 \times 10^{-4}$ et $\rho=0.68$, $p\text{-value}=1.62 \times 10^{-4}$) sans être corrélés à la productivité.

Figure 5 : Distributions de la productivité et de l'IFT selon les groupes

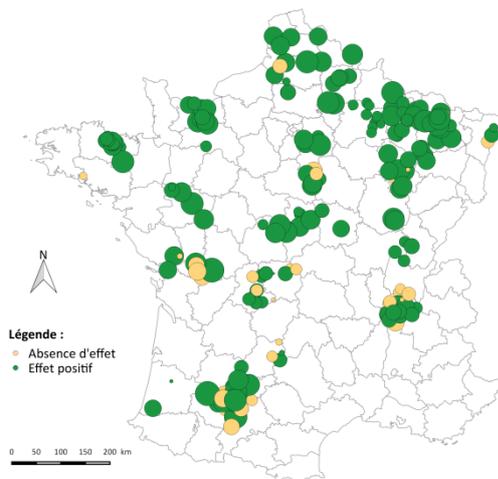


iii. Un faible usage de pesticides est-il lié à une forte charge de travail ?

L'étude de la relation entre l'IFT et la charge de travail (en H/ha) met en évidence deux groupes de situations de production distincts.

Un premier groupe, qui réunit la majorité des SdC (83%) où la relation entre l'IFT et la charge de travail est positive, i.e. les SdC présentant des IFT plus faibles ont également une plus faible charge de travail (groupe vert, Figure 6). Un deuxième groupe, réunissant des situations principalement localisées dans la moitié Sud de la métropole où il n'y a pas de relation entre l'IFT et la charge de travail (17% des SdC, groupe beige). Dans ce groupe, les SdC avec les plus faibles IFT ne présentent pas une charge de travail supérieure aux SdC ayant de plus forts IFT.

Figure 6 : Localisation des SdC selon l'effet de l'IFT sur la charge de travail



Dans le groupe beige, les SdC s'inscrivent dans des exploitations agricoles à SAU plus faible (139 vs. 188 ha, Annexe 5). Les sols ont tendance à avoir une RU moins importante (98 vs. 117mm) et un plus grand nombre de SdC ont accès à l'irrigation (47 vs. 2%).

Les assolements du groupe beige sont constitués principalement de céréales à paille, mais en moindre proportion (43 vs. 53%). Les taux de cultures d'été (29 vs. 19%), notamment de maïs (22 vs. 14%) y sont plus élevés, ainsi que le taux de légumineuses à graines (5% vs. 3%).

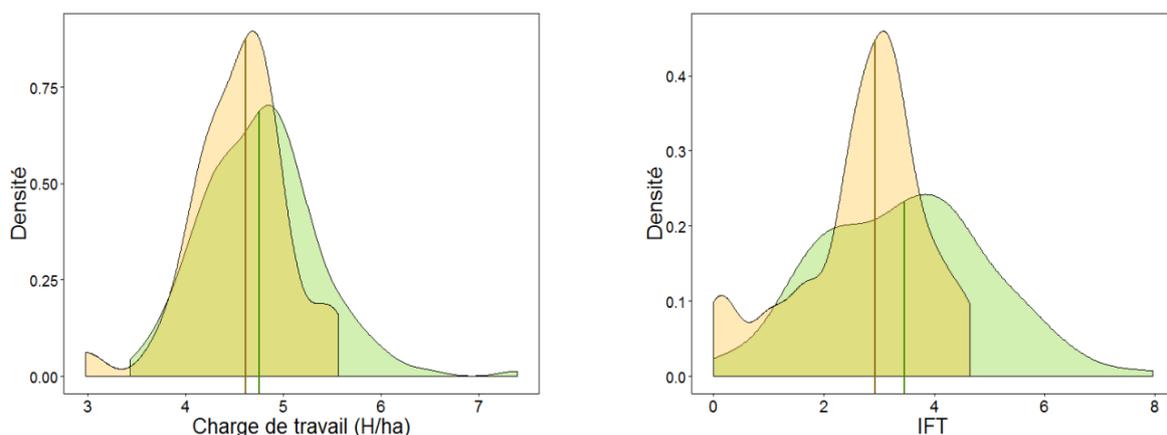
Dans les deux groupes, les taux de prairies temporaires (7-12%) ne sont pas significativement différents.

Les SdC du groupe beige ont tendance à avoir un IFT significativement plus faible (-22%), pour une charge de travail équivalente (Figure 7).

Dans le groupe vert, la proportion de cultures d'été dans l'assolement est négativement corrélée à l'IFT ($\rho=-0.60$, $p\text{-value}=4.28 \times 10^{-18}$) et à la charge de travail ($\rho=-0.31$, $p\text{-value}=4.68 \times 10^{-5}$). A l'inverse, les proportions en céréales à paille et en betterave et pomme-de-terre sont positivement corrélées à l'IFT ($\rho=0.46$, $p\text{-value}=3.13 \times 10^{-10}$ et $\rho=0.34$, $p\text{-value}=4.57 \times 10^{-6}$) et à la charge de travail ($\rho=0.23$, $p\text{-value}=2.75 \times 10^{-3}$ et $\rho=0.30$, $p\text{-value}=7.12 \times 10^{-5}$). Le taux de prairies temporaires est négativement corrélé à l'IFT ($\rho=-0.31$, $p\text{-value}=4.80 \times 10^{-5}$), sans être corrélé à la charge de travail.

Dans le groupe beige, la proportion en prairies temporaires est négativement corrélée à l'IFT ($\rho=-0.56$, $p\text{-value}=5.57 \times 10^{-4}$) et la proportion de légumineuses à graines est positivement corrélée à l'IFT ($\rho=0.47$, $p\text{-value}=4.70 \times 10^{-3}$) sans être toutes deux corrélées à la charge de travail.

Figure 7 : Distributions de la charge de travail et de l'IFT de chaque groupe



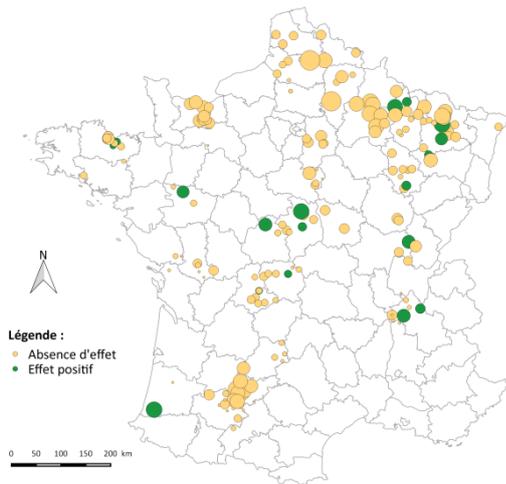
iv. Un faible usage de pesticides est-il associé à un faible impact sur l'environnement ?

L'étude de la relation entre l'IFT et la concentration en matières actives retrouvée dans les eaux souterraines a mis en évidence deux groupes de situations.

Un premier groupe, qui réunit 90% des SdC (groupe beige, Figure 8) et pour lequel il n'y a pas de relation entre IFT et concentration en m.a. dans les eaux souterraines. Dans ce groupe, les SdC avec un plus faible IFT ne sont pas nécessairement ceux avec le moins de fuites de m.a.

Un deuxième groupe où il y a une relation positive entre l'IFT et la concentration en m.a. dans les eaux souterraines, i.e. où les SdC avec les plus faibles IFT sont également ceux avec la plus faible concentration en m.a. dans les eaux souterraines (groupe vert). Ce groupe réunit 10% des SdC.

Figure 8 : Localisation des SdC selon l'effet de l'IFT sur les fuites de m.a. dans les eaux souterraines



Les SdC du groupe vert appartiennent tous à la filière polyculture-élevage, contre 64% des SdC dans le groupe beige (Annexe 6). Les deux groupes se distinguent principalement par le type de sol, qui est plutôt limono-sableux dans le groupe vert (33 vs. 14%) et limono-argileux dans le groupe beige (21% vs. 0%).

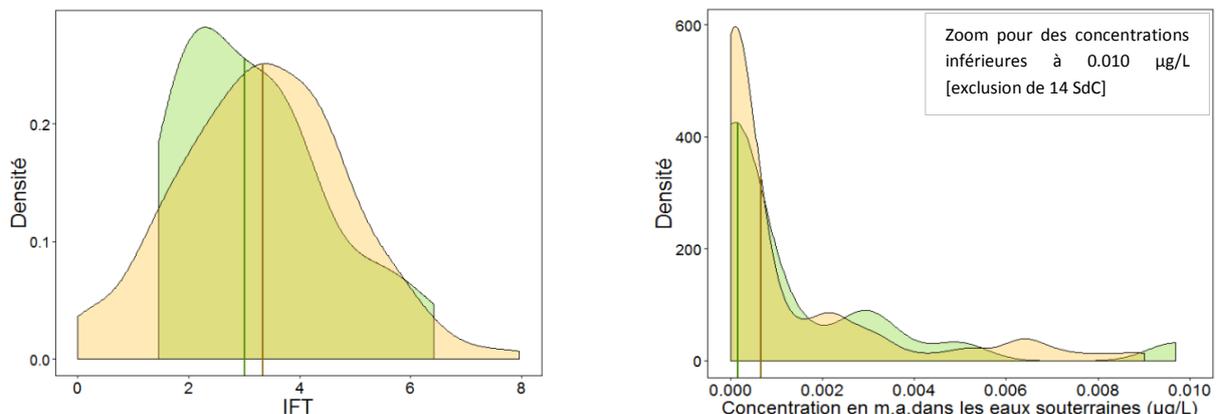
Les assolements des deux groupes présentent les mêmes proportions de céréales à paille (51-53%), de cultures d'été (20-25%), de crucifères-oléagineuses (12%) et de prairies temporaires (8%). L'assolement du groupe beige se distingue par la présence de betterave et de pomme-de-terre, cultures absentes dans le groupe vert.

Les IFT et concentrations en m.a. dans les eaux souterraines ne sont pas significativement différentes entre les 2 groupes (Figure 9). Au sein de chaque groupe, ces deux indicateurs présentent une grande variabilité selon les SdC.

Dans le groupe beige, la proportion en prairies temporaires dans l'assolement est négativement corrélée à l'IFT ($\rho=-0.33$, $p\text{-value}=3.92 \times 10^{-6}$) et positivement à la concentration en m.a. ($\rho=0.19$, $p\text{-value}=9.85 \times 10^{-3}$). La présence de haies en bordure de parcelle est négativement corrélée à l'IFT ($\rho=-0.23$, $p\text{-value}=1.85 \times 10^{-3}$), sans être corrélée à la concentration en m.a.

Dans le groupe vert, la proportion en céréales à paille et en crucifères-oléagineuses dans l'assolement sont positivement corrélées à l'IFT ($\rho=0.47$, $p\text{-value}=3.46 \times 10^{-2}$ et $\rho=0.86$, $p\text{-value}=5.36 \times 10^{-7}$) sans être corrélées à la concentration en m.a. dans les eaux souterraines.

Figure 9 : Distributions de l'IFT et des fuites de m.a. dans les eaux souterraines selon les groupes



2. Etude de la faisabilité des SdC à faible impact environnemental

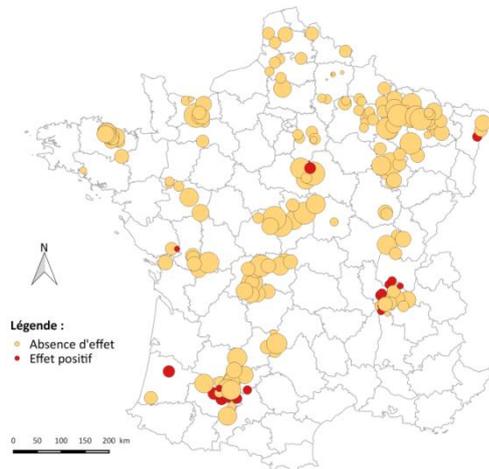
i. Peut-on concilier une bonne rentabilité et un faible impact environnemental ?

a. Etude de la relation entre rentabilité et émissions de GES

L'étude de la relation entre émissions de GES et rentabilité met en évidence deux groupes de situations de production différents (Figure 10).

Un premier groupe qui réunit la majorité des SdC (91%) et pour lequel il n'y a pas de relation entre les émissions de GES des SdC et leur rentabilité (groupe beige, Figure 10). Dans ce groupe, les SdC présentant le moins d'émissions de GES n'ont pas une rentabilité inférieure aux SdC à plus fort impact sur la qualité de l'air.

Figure 10 : Localisation des SdC selon la relation entre émissions de GES et rentabilité

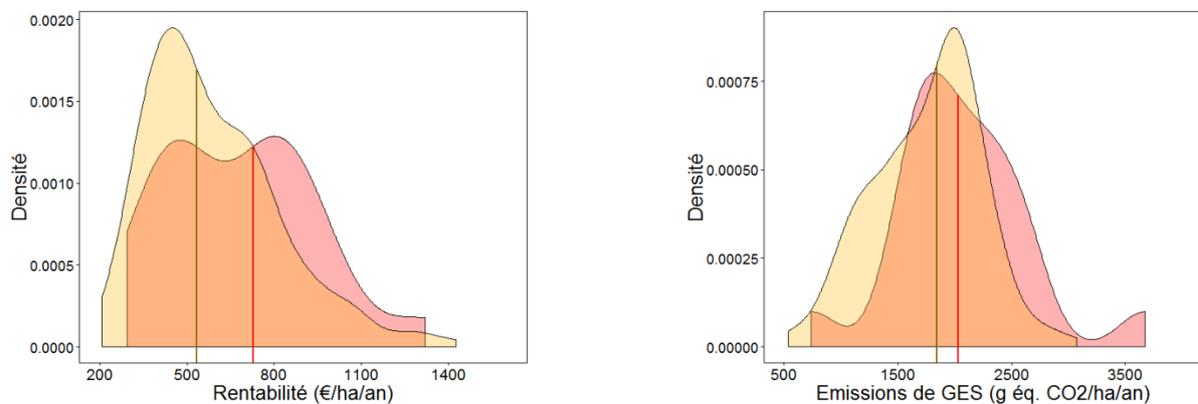


Un second groupe, constitué de situations principalement localisées en Rhône-Alpes et Midi-Pyrénées (groupe rouge), pour lequel il y a une relation positive entre émissions de GES et rentabilité, i.e. les SdC présentant les plus fortes émissions de GES ont également une rentabilité supérieure (9% des SdC).

Le groupe rouge réunit des SdC principalement en grandes cultures (56% des SdC) contre 30% dans le groupe beige (Annexe 7). Les deux groupes recourent à une grande variabilité de types de sol, avec une profondeur et RU non significativement différentes. Dans le groupe rouge, les cultures d'été sont plus présentes (48% vs. 18%) et sont ainsi les cultures dominantes de l'assolement. La proportion en maïs-semence y est plus élevée (7% vs. 1%). Dans le groupe beige, ce sont les céréales à paille qui occupent la majorité de l'assolement (53% vs. 37%), avec une part plus importante d'orge d'hiver (9 vs. 4%). Les proportions en crucifères-oléagineuses (13 vs. 7%) et prairies temporaires (9 vs. 2%) y sont également plus élevées.

Les SdC appartenant au groupe rouge ont des émissions de GES supérieures (+17%) pour des rentabilités non significativement différentes de celles du groupe beige (Figure 11). Néanmoins, on constate une importante variabilité pour les deux indicateurs au sein d'un même groupe (Figure 11).

Figure 11 : Distributions des rentabilités et des émissions de GES selon les groupes



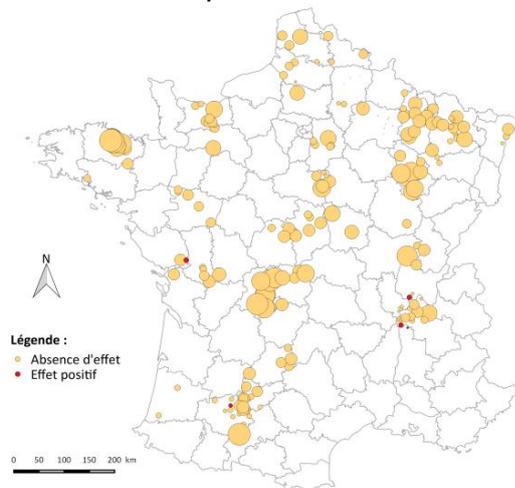
Dans le groupe beige, la proportion de prairies temporaires dans l'assolement est négativement corrélée aux émissions de GES ($\rho=-0.41$, $p\text{-value}=8.12 \times 10^{-9}$) et à la rentabilité ($\rho=-0.20$, $p\text{-value}=5.69 \times 10^{-3}$). La proportion en blé tendre d'hiver est positivement corrélée à la rentabilité et aux émissions

de GES ($\rho=0.39$, $p\text{-value}=3.16 \times 10^{-8}$ et $\rho=0.28$, $p\text{-value}=8.40 \times 10^{-5}$). La proportion en orge d'hiver est négativement corrélée à la rentabilité ($\rho=-0.38$, $p\text{-value}=8.27 \times 10^{-8}$) sans être corrélée aux émissions de GES. De plus, le taux de maïs est négativement corrélé aux émissions de GES, alors que celui de maïs-semence est positivement corrélé ($\rho=-0.26$, $p\text{-value}=2.51 \times 10^{-4}$ et $\rho=0.16$, $p\text{-value}=2.70 \times 10^{-2}$). Tous deux ne sont pas corrélés avec la rentabilité.

Dans le groupe rouge, le taux de prairies temporaires et de légumineuses à graines sont uniquement négativement corrélés aux émissions de GES ($\rho=-0.52$, $p\text{-value}=2.66 \times 10^{-2}$ et $\rho=-0.51$, $p\text{-value}=3.3 \times 10^{-2}$). La proportion en maïs est positivement corrélée à la rentabilité ($\rho=0.72$, $p\text{-value}=7.60 \times 10^{-4}$) et à l'inverse, la proportion en tournesol est négativement corrélée à la rentabilité ($\rho=-0.55$, $p\text{-value}=1.81 \times 10^{-2}$), sans être corrélées aux émissions de GES.

b. Etude de la relation entre rentabilité et quantité d'azote lessivé

Figure 12 : Localisation des SdC selon leur relation entre rentabilité et quantité d'azote lessivé



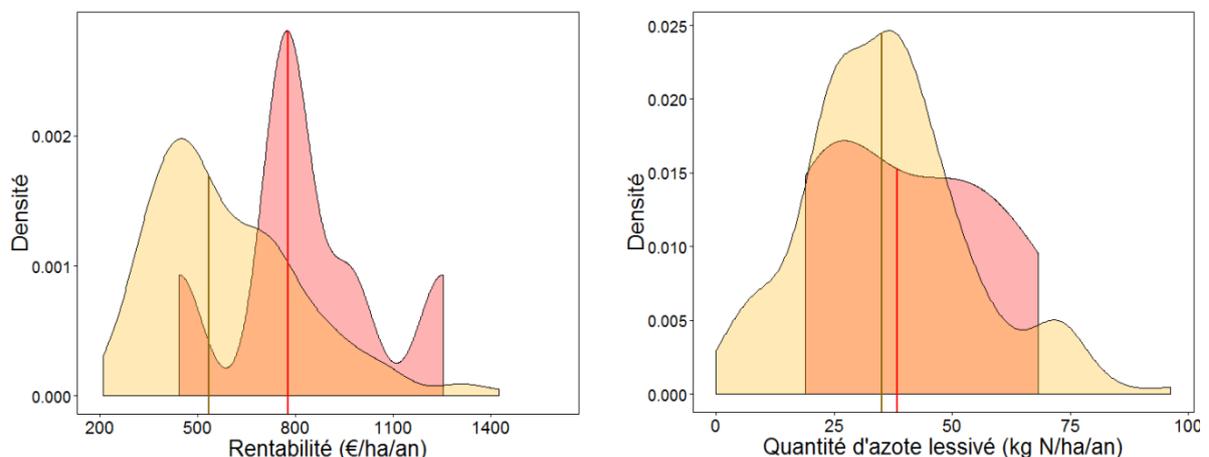
L'analyse de la relation entre rentabilité et quantité d'azote lessivé met en évidence un groupe majoritaire, qui réunit 97% des SdC et qui se caractérise par une absence de relation entre quantité d'azote lessivé et rentabilité (groupe beige, Figure 12). Dans ce groupe, les SdC ayant le moins de pertes azotées n'ont pas une rentabilité inférieure aux autres SdC.

Un second groupe, marginal (3% des SdC), réunit des situations de production localisées dans la moitié Sud de la métropole pour lesquelles il y a une relation positive entre la quantité d'azote lessivé et la rentabilité (groupe rouge). Dans ce groupe, les SdC avec une plus forte rentabilité présentent également une plus grande quantité d'azote lessivé.

Le groupe rouge se distingue du groupe beige (Annexe 8) du fait de ses sols principalement de types limoneux (33 vs. 10%) et argilo-limoneux (33 vs. 11%), à plus faible teneur en MO (23 vs. 30g/kg), et de la proportion plus importante en cultures d'été de ses assolements (44 vs. 20%).

Les SdC appartenant au groupe rouge ont tendance à avoir une rentabilité supérieure (+40%) pour des pertes en azote non significativement différentes (Figure 13).

Figure 13 : Distributions de la rentabilité et de la quantité d'azote lessivé selon la relation entre ces deux critères



Dans le groupe rouge, aucune corrélation n'est ressortie comme significative, ce qui peut être lié au faible nombre d'individus et également à la plus faible précision de l'estimation de la relation dans ce groupe.

c. Etude de la relation entre rentabilité et fuite de m.a. dans les eaux souterraines

L'étude de la relation entre les concentrations en m.a. dans les eaux souterraines et la rentabilité des SdC met en évidence un unique groupe, pour lequel il y a absence de relation. Les SdC avec le moins de fuites de m.a. vers les eaux souterraines ne sont pas systématiquement associés à une plus faible rentabilité. Selon les SdC, cette absence de relation est issue d'une estimation peu précise, ou résulte d'une réelle absence de relation entre ces deux critères (Figure 14).

Figure 14 : Localisation des SdC selon la précision de l'estimation de la relation entre rentabilité et fuites de m.a.

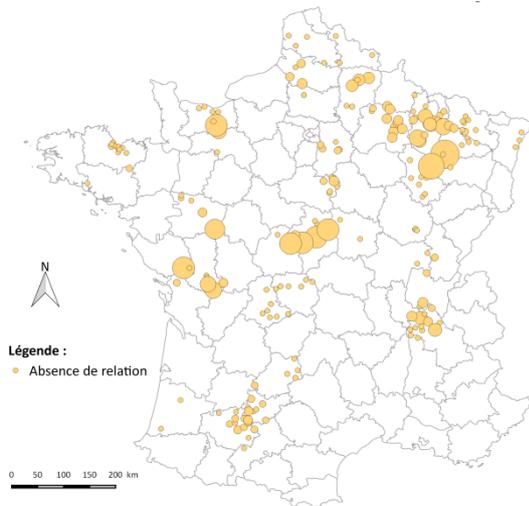
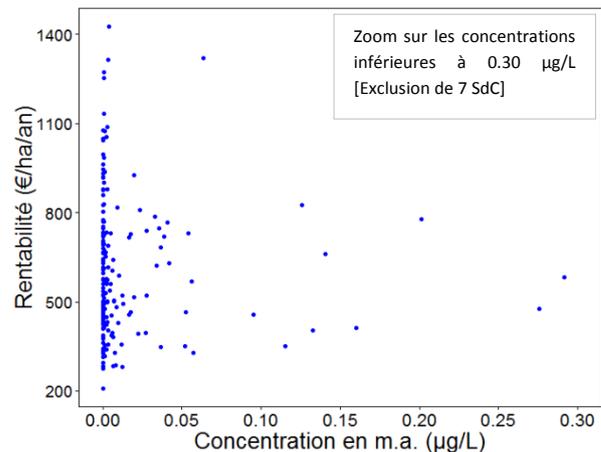


Figure 15 : La rentabilité des SdC en fonction de la concentration en m.a. des eaux souterraines

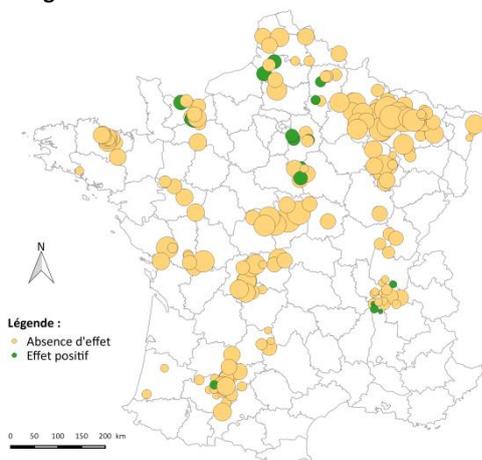


L'imprécision observée dans ce cas est liée à la faible discrimination des SdC sur l'indicateur de concentration en m.a. des eaux souterraines (Figure 15).

ii. Une forte rentabilité est-elle associée à une forte charge de travail ?

L'étude de la relation entre la charge de travail et la rentabilité met en avant deux groupes de situations de production.

Figure 16 : Localisation des SdC selon l'effet de la charge de travail sur la rentabilité



Un premier groupe réunissant 92% des SdC pour lequel il n'y a pas de relation entre la charge de travail et la rentabilité (groupe beige, Figure 16). Dans ce groupe, les SdC nécessitant une charge de travail plus conséquente ne présentent pas une rentabilité inférieure aux SdC demandant moins temps de travail.

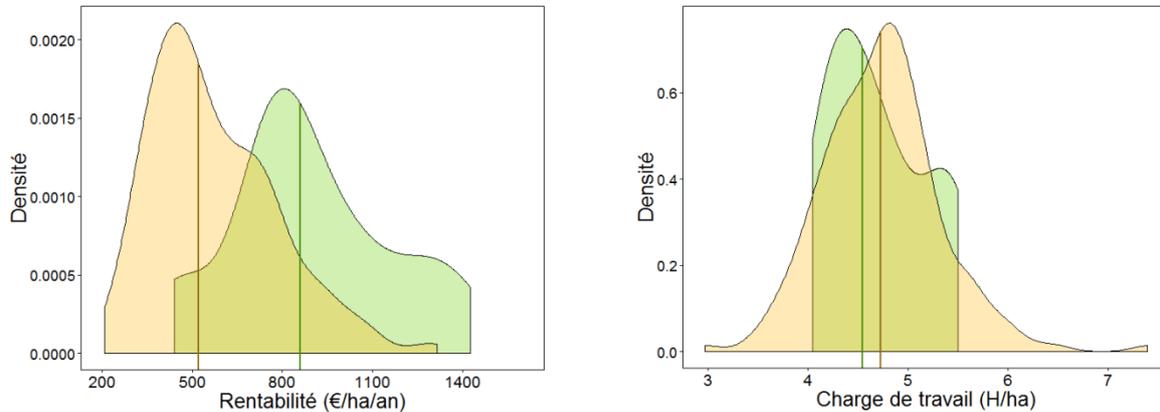
Un groupe qui réunit 8% des SdC, appartenant à des situations de production éclatées sur le territoire français (groupe vert) pour lequel il y a une relation positive entre la charge de travail et la rentabilité. Dans ce groupe, les SdC avec une charge de travail plus importante ont également une meilleure rentabilité.

Les SdC du groupe vert appartiennent plutôt à la filière grandes cultures (53% vs. 31%, Annexe 9), avec une présence accrue de filières de valorisation des cultures à débouchés spécifiques à proximité des exploitations (82 vs. 28%). Dans le groupe vert, les

sols et sous-sols limono-argileux sont dominants (53% et 59%), et ont tendance à être plus profonds (99 vs. 79 cm) et à plus forte RU (169 vs. 109mm).

Dans les deux groupes les céréales à paille représentent 50% de l'assolement, avec 20% de cultures d'été, 11% de crucifères-oléagineuses, 5% de légumineuses à graines et 4% de prairies temporaires. Les assolements du groupe vert comportent plus de blé tendre d'hiver (43 vs. 35%), également plus de betterave et de pomme-de-terre (9 vs. 2%) et de maïs-semence (8% vs. 0%).

Figure 17 : Distributions de la rentabilité et de la charge de travail de chaque groupe



Les SdC du groupe vert ont tendance à avoir une rentabilité supérieure (+56%), pour une charge de travail non significativement différente du groupe beige (Figure 17).

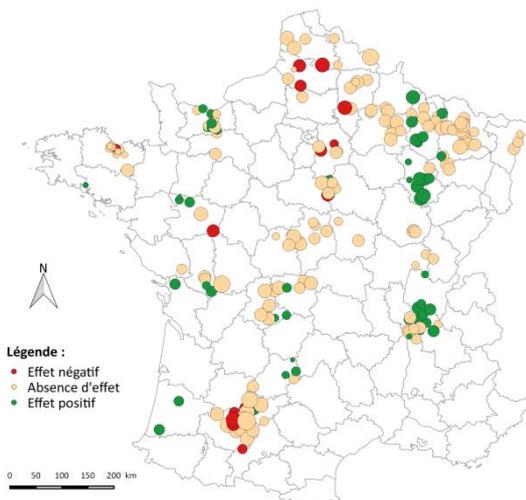
Dans le groupe beige, la proportion de betterave et de pomme-de-terre dans l'assolement est corrélée positivement à la rentabilité et à la charge de travail ($\rho=0.48$, $p\text{-value}=3.60 \times 10^{-12}$ et $\rho=0.31$, $p\text{-value}=1.95 \times 10^{-5}$). La proportion de cultures d'été est corrélée négativement à la charge de travail ($\rho=-0.30$, $p\text{-value}=3.61 \times 10^{-5}$) et celle de crucifères-oléagineuses est corrélée positivement à la charge de travail ($\rho=0.32$, $p\text{-value}=7.18 \times 10^{-6}$) sans être toutes deux corrélées à la rentabilité.

Dans le groupe vert, la proportion de betterave et de pomme-de-terre dans l'assolement est également corrélée positivement à la rentabilité ($\rho=0.53$, $p\text{-value}=3.02 \times 10^{-2}$). Aucune autre corrélation significative n'a été identifiée dans ce groupe.

3. Existe-t-il des conflits entre performances environnementales ?

i. Etude de la relation entre pertes d'azote par lessivage et émissions de GES

Figure 18: Localisation des SdC selon leur relation entre émissions de GES et azote lessivé



L'étude de la relation entre la quantité d'azote lessivé au cours de l'hiver et la quantité de GES émis met en évidence 3 groupes de situations contrastées.

Un groupe réunissant des situations de production réparties sur toute la France, pour lesquelles il y a une relation positive entre les émissions de GES et les pertes d'azote par lessivage (groupe vert, Figure 18). Dans ce groupe (25% des SdC), les SdC avec de plus faibles émissions de GES ont également moins de pertes azotées.

A l'opposé, un groupe dans lequel les SdC avec de plus faibles émissions de GES ont de plus fortes

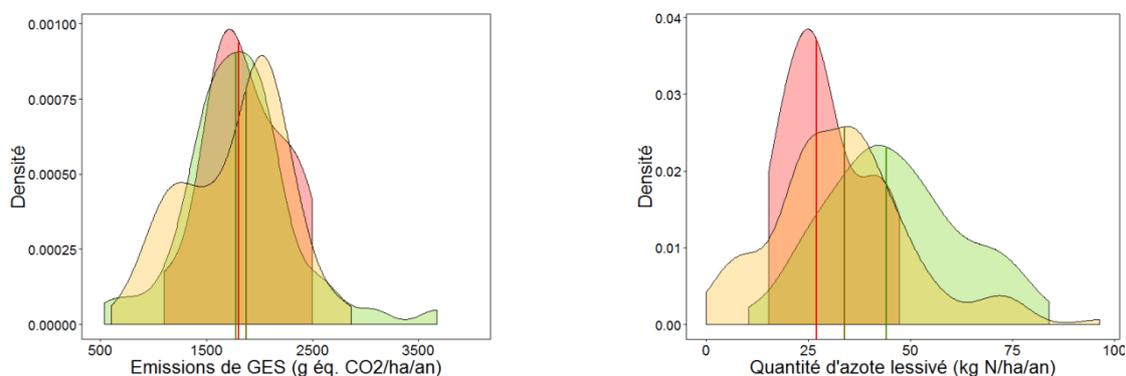
pertes en azote (relation négative, groupe rouge). Il regroupe 7% des SdC qui sont principalement localisés en Midi-Pyrénées et Picardie.

Un dernier groupe qui réunit 68% des SdC et pour lequel il n'y a pas de relation entre les deux critères d'impacts environnementaux considérés (groupe beige). Dans ce groupe, les SdC avec de plus faibles émissions de GES ne présentent pas de pertes d'azote par lessivage plus importantes.

En comparaison avec les deux autres groupes, le groupe vert est celui où la filière polyculture-élevage est la plus représentée (77% des SdC, Annexe 10). Il regroupe des SdC soumis à un climat plus humide (903 mm de précipitations annuelles) et plus froid (44 jours de gel/an). Ce groupe recouvre une importante diversité de types de sol, les sols limoneux étant dominants (33%), avec des taux de cailloux plus importants (11% et 32% en sous-sol). Les sols du groupe vert ont tendance à avoir une teneur en MO supérieure (33 g/kg) et une profondeur et RU moins importantes (74 cm et 100 mm) par rapport aux deux autres groupes. Dans les 3 groupes, les cultures dominantes de l'assolement sont les céréales à paille, mais en proportion significativement inférieure dans le groupe vert (44%), avec une proportion en blé tendre d'hiver moindre (28%). Dans le groupe vert, la présence de prairies temporaires dans l'assolement est plus importante (12%). Dans les 3 groupes, les proportions en cultures d'été (18-25%), crucifères-oléagineuses (10-13%) et légumineuses à graines (4-6%) ne sont pas significativement différentes.

Le groupe rouge se distingue du groupe vert du fait de la dominance de sols argilo-limoneux (36%) et de la présence des cultures de betterave et de pomme-de-terre dans son assolement (8% vs. 1%), le groupe beige étant intermédiaire (3%).

Figure 19 : Distributions des émissions de GES et de la quantité d'azote lessivé de chaque groupe



Dans le groupe vert, la quantité d'azote lessivé est plus importante comparé aux groupes beige (+38%) et rouge (+57%). Les quantités de GES émis ne sont pas significativement différentes entre les 3 groupes (Figure 19).

Dans le groupe rouge, la pluviométrie annuelle et la proportion en crucifères-oléagineuses sont corrélées positivement à la quantité d'azote lessivé ($\rho=0.67$, $p\text{-value}=1.15 \times 10^{-2}$ et $\rho=0.57$, $p\text{-value}=3.38 \times 10^{-2}$), sans être corrélées aux émissions de GES.

Dans le groupe vert, les taux de céréales à paille et de crucifères-oléagineuses dans l'assolement sont positivement corrélés aux émissions de GES ($\rho=0.31$, $p\text{-value}=2.37 \times 10^{-2}$ et $\rho=0.44$, $p\text{-value}=1.14 \times 10^{-3}$), sans être corrélés à la quantité d'azote lessivé. La proportion de prairies temporaires dans l'assolement est négativement corrélée à la quantité d'azote lessivé ($\rho=-0.28$, $p\text{-value}=4.67 \times 10^{-2}$) et aux émissions de GES ($\rho=-0.61$, $p\text{-value}=1.92 \times 10^{-6}$).

Dans le groupe beige, la proportion en crucifères-oléagineuses dans l'assolement est négativement corrélée à la quantité d'azote lessivé ($\rho=-0.23$, $p\text{-value}=7.59 \times 10^{-3}$) et positivement aux émissions de GES ($\rho=0.41$, $p\text{-value}=6.15 \times 10^{-7}$). La proportion en cultures d'été est uniquement positivement corrélée à la quantité d'azote lessivé ($\rho=0.45$, $p\text{-value}=3.85 \times 10^{-8}$) et celle en prairies temporaires est négativement corrélée aux émissions de GES ($\rho=-0.37$, $p\text{-value}=7.96 \times 10^{-6}$), sans être corrélée à la quantité d'azote lessivé.

ii. Etude de la relation entre émissions de GES et fuites de matières actives

L'étude de la relation entre concentration en matières actives dans les eaux souterraines et émissions de GES nous indique que quelle que soit la situation de production et les stratégies de production mises en place, il n'y a pas de relation entre ces deux critères (Figure 20). Ce résultat souligne le fait qu'il n'y a pas de conflit pour concilier cette double performance environnementale.

Figure 20 : Localisation des SdC selon leur relation entre émissions de GES et fuites de m.a.

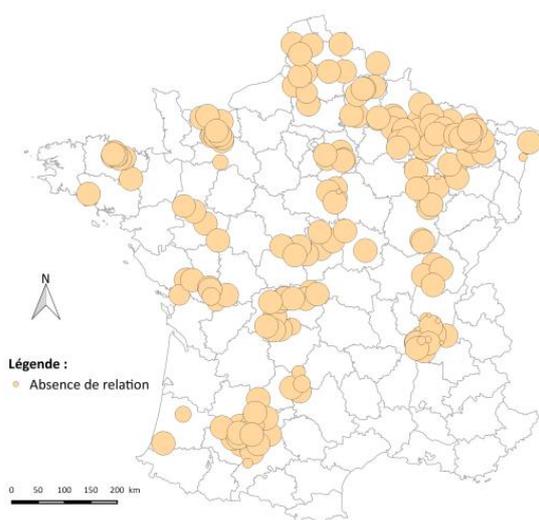
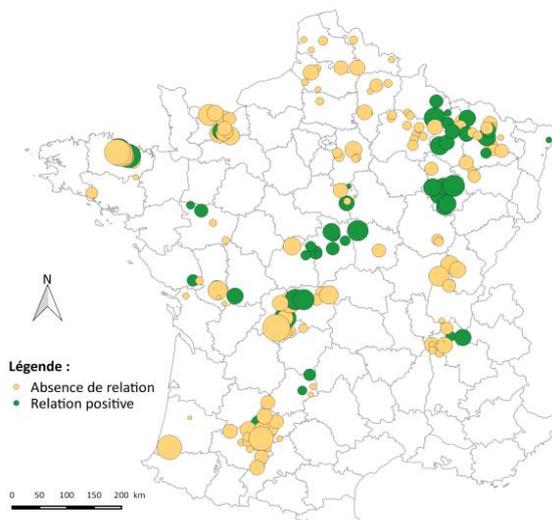


Figure 21 : Localisation des SdC selon leur relation entre quantité d'azote lessivé et fuites de m.a.



iii. Etude de la relation entre pertes d'azote par lessivage et fuites de m.a.

L'étude de la relation entre quantité d'azote lessivé au cours de l'hiver et transfert des m.a. dans les eaux souterraines met en évidence deux groupes de situations de production.

Un premier groupe présentant une relation positive entre la quantité d'azote et la concentration en m.a. dans les eaux souterraines (groupe vert, Figure 21). Dans ce groupe, qui réunit 27% des SdC, les SdC avec de plus faibles pertes d'azote présentent également de plus faibles concentrations en m.a. dans les eaux souterraines.

Un second groupe pour lequel il n'y a pas de relation entre ces deux critères de performance environnementale (groupe beige). Dans ce groupe, qui regroupe 73% des SdC, les SdC avec de plus faibles pertes azotées ne présentent pas de plus faibles fuites de m.a. dans les eaux souterraines.

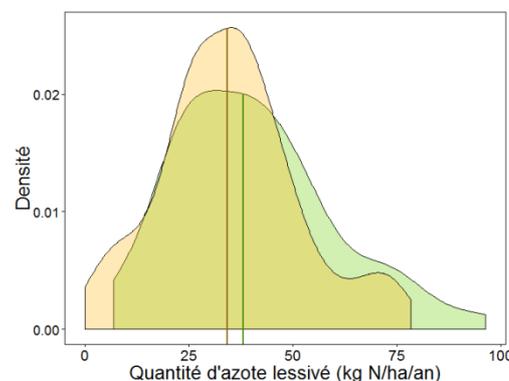
Le groupe vert se distingue du groupe beige, du fait de ses sols plutôt argilo-calcaire superficiels (31% vs. 7%, Annexe 11), qui sont moins profonds (70 vs. 84cm), à plus faible RU (95 vs. 121mm), et à plus forte teneur en MO (34 vs. 28 g/kg). Dans ce groupe, on note une plus forte présence de cailloux dans le sous-sol (30 vs. 19%).

Les assolements des deux groupes sont à dominance céréales à paille (52%) mais le groupe vert comporte une plus grande proportion de crucifères-oléagineuses (15 vs. 11%) et de prairies temporaires (11 vs. 7%), avec une proportion plus faible de légumineuses à graines (2 vs. 4%) et de

blé tendre d'hiver (32 vs. 36%). Dans ce groupe, les cultures de betterave et pomme-de-terre sont absentes de l'assolement, alors qu'elles sont présentes dans le groupe beige (4%).

Les quantités d'azote lessivé (Figure 22) et concentrations en m.a. dans les eaux souterraines ne sont pas significativement différentes entre les deux groupes.

Figure 22 : Distribution de la quantité d'azote lessivé en fonction du groupe



Dans le groupe vert, les teneurs en cailloux du sol et sous-sol sont positivement corrélées à la concentration en m.a. ($\rho=0.32$, $p\text{-value}=1.86 \times 10^{-2}$ et $\rho=0.33$, $p\text{-value}=1.37 \times 10^{-2}$), sans être corrélées à la quantité d'azote lessivé. La profondeur du sol est négativement corrélée à la quantité d'azote lessivé ($\rho=-0.43$, $p\text{-value}=1.17 \times 10^{-3}$), sans être corrélée à la concentration en m.a.

Dans le groupe beige, les teneurs de cailloux du sol et du sous-sol, ainsi que les précipitations annuelles sont corrélées positivement à la quantité d'azote lessivé ($\rho=0.31$, $p\text{-value}=9.24 \times 10^{-5}$; $\rho=0.36$, $p\text{-value}=4.94 \times 10^{-6}$ et $\rho=0.34$, $p\text{-value}=2.66 \times 10^{-5}$) et à la concentration en m.a. ($\rho=0.21$, $p\text{-value}=1.0 \times 10^{-2}$; $\rho=0.20$, $p\text{-value}=1.24 \times 10^{-2}$ et $\rho=0.23$, $p\text{-value}=5.21 \times 10^{-3}$). La RU est négativement corrélée à la concentration en m.a. ($\rho=-0.55$, $p\text{-value}=2.43 \times 10^{-3}$), sans être corrélée à la quantité d'azote lessivé. La proportion en betterave et en pomme-de-terre est négativement corrélée à la quantité d'azote lessivé ($\rho=-0.28$, $p\text{-value}=6.40 \times 10^{-4}$), sans être corrélée à la concentration en matières actives.

IV. DISCUSSIONS ET LIMITES

1. Discussion des résultats

Les relations contrastées obtenues par couple d'indicateurs étudiés (Tableau 1) soulignent la nécessité de prendre en compte la situation de production dans laquelle s'inscrivent les SdC.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des résultats

Relation étudiée	Relation négative (% des SdC)	Absence de relation (% des SdC)	Relation positive (% des SdC)
IFT et rentabilité	-	71	29
IFT et productivité	12	84	4
IFT et charge de travail	-	17	83
IFT et fuites de m.a.	-	90	10
Emissions de GES et rentabilité	-	91	9
Quantité d'azote lessivé et rentabilité	-	97	3
Fuites de m.a. et rentabilité	-	100	-
Charge de travail et rentabilité	-	92	8
Emissions de GES et quantité d'azote lessivé	7	68	25
Quantité d'azote lessivé et fuites de m.a.	-	73	27
Emissions de GES et fuites de m.a.	-	100	-

i. Recherche de systèmes conciliant durabilité et faibles usage de pesticides

La majorité des SdC étudiés (71%) s'inscrivent dans des situations de production dans lesquelles co-existent des SdC présentant pour une même rentabilité de plus faibles niveaux d'usage de pesticides (Tableau 1). De même, 84% des SdC appartiennent à des situations de production où il

existe des SdC ayant pour une même productivité de plus faibles IFT. Ces résultats concordent avec ceux d'études antérieures (Jacquet *et al.*, 2011 ; Mischler *et al.*, 2009 ; Lechenet *et al.*, 2016b). Ils témoignent de l'existence de stratégies de production qui s'appuient sur une gestion alternative des bioagresseurs et un moindre recours à la lutte chimique. Ces stratégies s'inscrivent dans les principes de la production intégrée qui correspond à un mode de production agricole souvent considéré comme l'intermédiaire entre l'agriculture intensive, très dépendante des intrants de synthèse (fertilisants et produits phytosanitaires), et l'agriculture biologique où aucun usage d'intrant de synthèse n'est autorisé (Munier-Jolain *et al.*, 2010). La production intégrée repose sur la protection intégrée des cultures qui consiste à mettre en œuvre une combinaison de leviers à la fois préventifs et curatifs, contre les bioagresseurs des cultures. Ces leviers peuvent être biologiques, mécaniques ou chimiques. De fait, l'appel aux pesticides est gardé en solution de secours, lorsque les autres leviers ne sont pas suffisants pour limiter les risques de perte de production et de rentabilité (Barzman *et al.*, 2015 ; Mischler *et al.*, 2009 ; Munier-Jolain *et al.*, 2010). Bien que cette question n'ait pu être traitée dans le cadre de cette étude, il est souvent rapporté que la diversification des successions culturales constitue un levier préventif majeur pour la gestion des bioagresseurs (Barzman *et al.*, 2015 ; Davis *et al.*, 2012 ; Lamichhane *et al.*, 2016), levier déjà adopté dans des exploitations faiblement dépendantes des pesticides (Boissinot *et al.*, 2011 ; Lechenet *et al.*, 2016a). Elle peut passer par l'introduction de cultures pluriannuelles comme la luzerne dans les rotations. D'autres leviers préventifs tels que le décalage de la date de semis et le travail du sol (ex : labour, faux-semis) ont un rôle à jouer dans la réduction de la dépendance aux pesticides (Boissinot *et al.*, 2011 ; Lechenet *et al.*, 2016a). A ces leviers préventifs s'ajoutent des leviers curatifs tels que le désherbage mécanique ou le désherbage chimique localisé. Dans tous les cas, l'adoption de ces différents leviers nécessite la reconception des SdC afin d'assurer une cohérence des combinaisons de pratiques mises en œuvre (Munier-Jolain *et al.*, 2010). Cette reconception implique des changements lourds pour l'agriculteur, et bien qu'un plus faible usage de pesticides ne soit pas associé à une plus faible rentabilité dans la majorité des cas, nous montrons que ces systèmes plus économes en pesticides n'assurent pas non plus une meilleure rentabilité. Dans un tel contexte, une transition vers un faible usage de pesticides est susceptible de se heurter à une forte aversion au risque de la part des agriculteurs, pour qui la mise en place de changements ne garantit pas une amélioration de leur revenu.

Les résultats mettent en évidence des SdC appartenant à des situations pour lesquelles de plus faibles IFT sont associés à des rentabilités et productivités réduites (respectivement 29% et 4% des SdC). Ces systèmes sont principalement caractérisés par la présence de cultures à la fois à haute valeur ajoutée et très gourmandes en pesticides, comme la pomme-de-terre et la betterave sucrière (Annexe 12). De plus, la proportion de betterave et de pomme-de-terre dans l'assolement est positivement corrélée à la rentabilité et à l'IFT (cf. III.1.i), i.e. les SdC plus économes en pesticides ont moins de betterave et de pomme-de-terre dans leur assolement et sont moins rentables. Dans ces systèmes il paraît difficile de modifier l'assolement sans impliquer une perte de rentabilité. Les stratégies pour réduire l'IFT nécessitent alors de mobiliser des leviers techniques, comme par exemple le désherbage mécanique (Lechenet *et al.*, 2016a). Les rendements en pomme-de-terre étant assez dépendants de l'utilisation de fongicides (Butault *et al.*, 2010), l'utilisation de variétés résistantes au mildiou constitue un levier supplémentaire. Celui-ci nécessite de mettre à contribution la recherche pour sélectionner des variétés résistantes et compatibles avec les exigences de la filière.

Concernant l'impact de l'usage de pesticides sur l'environnement, on remarque dans 90% des cas une absence de relation entre IFT et fuites de m.a. dans les eaux souterraines. Bien qu'un moindre usage de pesticides implique logiquement une plus faible probabilité de lessivage des matières actives, la relation avec l'IFT ne semble pas si tranchée. L'IFT ne reflète pas une quantité réelle de m.a. appliquée mais bien une quantité pondérée par la dose homologuée. De plus, le transport des m.a. dans le sol dépend de multiples facteurs, incluant les caractéristiques intrinsèques aux m.a. (temps de demi-vie, coefficient d'adsorption), les propriétés du milieu (caractéristiques pédo-climatiques) et les conditions d'application (Arias-Estévez *et al.*, 2008). Ainsi, certains SdC à plus faibles IFT peuvent présenter des fuites de m.a. plus importantes si les sols sont très filtrants, les conditions d'application mauvaises ou les m.a. appliquées sont très peu adsorbées par le sol.

Nos résultats soulignent que dans la majorité des situations, les systèmes à plus faibles IFT présentent une plus faible charge de travail (83% des SdC). Or, les systèmes moins dépendants des pesticides sont généralement vus comme des systèmes demandant une charge de travail conséquente du fait des différents leviers à mettre en place, ce qui peut constituer un frein majeur à leur adoption (Jacquet *et al.*, 2011). D'autres études menées sur des SdC en production intégrée confirment qu'un plus faible usage de pesticides n'implique pas une charge de travail plus importante (Boissinot *et al.*, 2011 ; Lechenet *et al.*, 2014 ; Munier-Jolain *et al.*, 2010 ; Pardo *et al.*, 2010).

Les résultats obtenus indiquent que pour la majorité des situations, il existe des SdC capables de concilier faible usage de pesticides avec les différentes facettes de la durabilité. Mais nous n'avons pas pu mettre en évidence de situation capable de concilier un plus faible usage de pesticides et une meilleure rentabilité. De même, nous avons eu du mal à identifier des bénéfices environnementaux liés au transfert des pesticides dans les sols dans les systèmes à plus faible usage de pesticides. L'IFT n'est pas le seul critère à optimiser pour avoir des systèmes de culture plus durables. En effet, d'autres aspects de la durabilité, non étudiés ici, peuvent être optimisés dans ces systèmes. Par exemple, la diversification des successions culturales peut contribuer à une plus grande robustesse face aux aléas climatiques et à la volatilité des prix agricoles (Davis *et al.*, 2012 ; Lechenet *et al.*, 2014).

Un frein à l'adoption de SdC en protection intégrée provient de la complexité technique des stratégies mises en œuvre (Carpentier, 2010). Le manque de connaissances et d'accompagnement techniques sur ces systèmes sont souvent présentés comme des verrous pour l'adoption de systèmes plus économes en pesticides (Bastiaans *et al.*, 2008 ; Meynard *et al.*, 2013). De nombreuses pistes sont évoquées dans la littérature pour stimuler les changements de systèmes, et relèvent notamment de l'intervention des pouvoirs publics dans l'accompagnement de cette transition et la diffusion des connaissances (Rossi *et al.*, 2012). Un soutien plus spécifique de la recherche pour la réduction de pesticides sur certaines cultures très dépendantes des intrants chimiques semble également être une piste prioritaire (Butault *et al.*, 2010 ; Jacquet *et al.*, 2011).

ii. Faisabilité économique de la préservation de l'environnement

Dans la majorité des situations (91% des SdC), on remarque une absence de conflit entre émissions de GES et rentabilité, soit une absence de frein à la conciliation de ces deux performances. La gestion de l'azote (fertilisation raisonnée, introduction de légumineuses dans l'assolement...) et des prairies temporaires ressortent comme les principaux leviers pour réduire les émissions de GES sans impacter la rentabilité (Pellerin *et al.*, 2014). Nos résultats confirment les liens entre présence de prairies temporaires et légumineuses dans l'assolement et plus faibles émissions de GES (cf.

III.2.ii.a). Quelques situations (9% des SdC) sont identifiées pour lesquelles de plus faibles émissions sont associées à une plus faible rentabilité. Ce conflit a déjà été identifié dans une étude indiquant qu'un tiers du potentiel d'atténuation des émissions de GES résulte de pratiques et d'investissements qui n'engendrent pas de retour financier (Pellerin *et al.*, 2014).

L'étude de la faisabilité économique de systèmes à plus faibles impacts sur l'environnement indique une absence de conflit, dans la grande majorité des situations (plus de 90% des SdC), pour tous les couples d'indicateurs étudiés. Les résultats indiquent également une absence de relation entre charge de travail et rentabilité pour la quasi-totalité des SdC du réseau (92%). La rentabilité et la charge de travail étant des facteurs conditionnant fortement la faisabilité d'une stratégie innovante (Meynard *et al.*, 2013 ; Pardo *et al.*, 2010), nos résultats vont donc dans le sens d'une possible adoption à large échelle de SdC à moindre impact sur l'environnement.

De façon analogue à l'adoption de systèmes plus économes en pesticides, nous n'avons pas identifié de systèmes capables de concilier une plus forte rentabilité et de plus faibles impacts, ce qui peut freiner les initiatives des agriculteurs quant à l'adoption de nouvelles stratégies.

Si la transition vers des systèmes à plus faibles impacts sur l'environnement est faisable à l'échelle des SdC, se pose la question des retombées de cette transition sur l'ensemble de la filière agricole. La diversification des cultures, notamment la présence de légumineuses, ressort également ici comme levier pour améliorer les bilans environnementaux des systèmes. Ce levier est économiquement faisable si des débouchés pour les cultures de diversification sont assurés. Les changements mis en place à l'échelle des exploitations agricoles doivent se faire en parallèle d'une évolution des filières en amont et en aval. Ainsi, une réorganisation du secteur agricole dans son ensemble est à prévoir pour faciliter et stimuler la transition vers une agriculture plus durable, ce qui peut également constituer un frein au changement (Meynard *et al.*, 2013). En effet, la réussite de cette transition nécessite la mobilisation simultanée des différents acteurs du secteur agricole. Les politiques publiques ont donc un rôle de stimulation important à jouer (Butault *et al.*, 2010 ; Meynard *et al.*, 2013), *via* la promotion de stratégies agricoles innovantes, mais également *via* la mise en place de réglementations adaptées et d'incitations économiques pour la réduction d'usage de pesticides (Carpentier, 2010 ; Jacquet *et al.*, 2011 ; Picazo-Tadeo *et al.*, 2011).

iii. Conciliation des performances environnementales

L'étude des relations entre les impacts environnementaux met en évidence une absence de conflits dans la majorité des situations de production, illustrant la possibilité de concilier double performance environnementale pour la plupart des SdC (plus de 68%). La double performance nécessite alors l'association des leviers minimisant l'un et l'autre des impacts.

Contrairement à nos attentes, la majorité des SdC (68%) ne présentent pas de relation entre émissions de GES et quantité d'azote lessivé. Or, la fertilisation azotée est le poste contribuant le plus aux émissions de GES (83% des émissions, Annexe 13), du fait surtout de la fabrication et du transport des engrais azotés minéraux (Snyder *et al.*, 2009). Préserver l'azote du lessivage en optimisant les bilans azotés n'induit pas nécessairement une amélioration du bilan des émissions de GES. Les pratiques associées à de plus faibles pertes d'azote par lessivage peuvent nécessiter plus d'interventions mécanisées et alourdir ainsi le bilan des émissions de GES.

Néanmoins, un quart des SdC du réseau appartiennent à des situations où il y a concordance entre (i) faibles émissions de GES et faibles pertes d'azote par lessivage et (ii) entre faibles fuites de m.a. et faibles pertes d'azote. Dans ces situations, les stratégies permettant de minimiser un impact

environnemental vont de pair avec la réduction d'un autre impact (Gac *et al.*, 2011 ; Pellerin *et al.*, 2014).

De plus, dans le groupe de situations où il y a concordance entre faibles émissions de GES et faibles quantités d'azote lessivé (25% des SdC), les pertes azotées sont très variables d'un SdC à un autre, et ont tendance à être, en moyenne, supérieures à celles des deux autres groupes (+38% et +57%, cf. III.3. i). Ces résultats illustrent le potentiel de réduction des systèmes les moins performants sur ce critère.

Quelques situations (7% des SdC), avec antagonisme entre faibles émissions de GES et faible lessivage d'azote ont été mises en évidence. Bien que ces situations soient marginales, elles illustrent le fait que certaines pratiques associées à un impact plus faible sur un compartiment environnemental peuvent être également associées à un impact plus fort sur un autre compartiment, d'où la nécessité d'étudier conjointement plusieurs enjeux environnementaux (Pellerin *et al.*, 2014). Cette approche par couple d'indicateurs d'impacts sur l'environnement a permis de montrer l'absence d'antagonismes dans la quasi-totalité des situations. Une approche multidimensionnelle permettrait de vérifier l'absence de conflits à l'échelle de plusieurs indicateurs étudiés et d'identifier les SdC qui trouvent le meilleur compromis entre les différentes facettes de la performance (Gac *et al.*, 2011 ; Pellerin *et al.*, 2014 ; Picazo-Tadeo *et al.*, 2011).

2. Limites de l'étude

i. Analyse sociale de la durabilité

Dans notre étude, l'aspect social des SdC a été estimé *via* la charge de travail annuelle par hectare. Cet indicateur permet une évaluation simple, mais incomplète de la charge de travail pour l'agriculteur. La charge de travail calculée ne tient pas compte du temps consacré à l'observation des cultures, souvent indiqué comme plus important dans les systèmes en production intégrée (Pardo *et al.*, 2010).

Il serait intéressant d'analyser la distribution de la charge de travail sur l'année pour avoir une évaluation plus complète sur cet aspect. Cette répartition constitue un élément fondamental de la faisabilité d'un SdC, car elle permet d'entrevoir les pics de travail et les risques de compétitions dans la réalisation des interventions. Cette composante est connue pour influencer fortement la prise de décision des agriculteurs (Macé *et al.*, 2007 ; Pardo *et al.*, 2010). Elle doit être évaluée en tenant compte des jours disponibles pour la réalisation des interventions qui dépendent de la situation de production (e.g. conditions climatiques, type de sol qui conditionnent les possibilités d'entrée dans les parcelles, Macé *et al.*, 2005 ; Munier-Jolain *et al.*, 2010). Une augmentation de la charge de travail dans des SdC plus économes en pesticides peut donc être compensée par une meilleure répartition de cette charge au cours de l'année. Dans le cas de SdC diversifiés, on observe une redistribution des interventions associées à l'implantation et à la récolte des cultures, deux aspects critiques des itinéraires techniques (Lechenet, 2012).

L'étude de la perception des agriculteurs vis-à-vis de leur métier (e.g. pénibilité du travail) et de la contribution d'un SdC à une dynamique locale (e.g. contribution à l'emploi rural) pourraient constituer des indicateurs complémentaires de la durabilité sociale (Pelzer *et al.*, 2012).

ii. Analyse économique de la durabilité

La durabilité économique des SdC a été ici évaluée par la rentabilité qu'ils génèrent. Le fait que celle-ci soit confrontée à des scénarii de prix contrastés permet la prise en compte de la variabilité des contextes de prix. Il serait intéressant de regarder la robustesse de cette rentabilité

face à cette variabilité, les systèmes en production intégrée étant souvent vantés comme plus robustes face à la volatilité des prix (Boissinot *et al.*, 2011 ; Davis *et al.*, 2012).

La rentabilité calculée dans cette étude ne prend pas en compte les coûts associés à la rémunération de la main d'œuvre. Un approfondissement de l'analyse économique pourrait passer par l'étude simultanée de la rentabilité et de la charge de travail des SdC. La mesure de l'efficacité économique du travail permettrait de distinguer des systèmes à plus forte charge de travail, mais où l'heure travaillée est suffisamment rétribuée pour permettre le recrutement de main d'œuvre. Cet indicateur concilierait les aspects économiques et sociaux en évaluant la contribution à l'emploi des systèmes de culture.

iii. Analyse environnementale de la durabilité

L'impact de l'usage des pesticides sur l'environnement a été évalué uniquement par la concentration en matières actives dans les eaux souterraines. Cet indicateur est intéressant car il est issu d'un modèle mécaniste (MACRO) qui simule la dynamique des matières actives dans le sol jusque dans les eaux souterraines. Il peut donc directement être comparé avec les normes nationales de potabilité. Mais ce modèle simule uniquement les flux des m.a. et ne tient donc pas compte de leur toxicité. Il serait intéressant de compléter cette analyse en utilisant un indicateur de risques de toxicité pour l'Homme et les autres organismes vivants (e.g. indicateur I-Phy de la méthode Indigo, Bockstaller *et al.*, 2008) et en intégrant également des indicateurs d'impacts sur les autres compartiments de l'environnement (air, sol, eaux de surface).

Une limite de l'indicateur de fuites de m.a. utilisé est qu'il discrimine peu les SdC du réseau alors que certains d'entre eux sont dans des zones où les concentrations en pesticides mesurées dans les eaux souterraines sont déjà ressorties supérieures aux normes de qualité de la Directive Cadre sur l'Eau (Annexe 14). Pour valider les résultats obtenus en utilisant ce modèle, il serait prudent d'effectuer une analyse de sensibilité du modèle et de confirmer les sorties du modèle en les confrontant à des données mesurées.

Une limite importante de l'étude de l'aspect environnemental est l'absence d'indicateurs d'impacts sur la biodiversité, alors qu'elle ressort comme un enjeu majeur de l'agriculture durable (Bockstaller *et al.*, 2011). Un suivi des populations d'insectes auxiliaires (biocontrôle et pollinisation), de vers-de-terre ainsi qu'une caractérisation des infrastructures agroécologiques présentes dans les parcelles est effectué dans certaines exploitations du réseau FERMEcophyto, mais de façon trop ponctuelle pour être représentatif. On remarque au sein du réseau un intérêt grandissant pour la prise en compte de la biodiversité mais la généralisation de ces suivis pose des problèmes de coût d'acquisition de ces données.

V. CONCLUSION

Dans cette étude nous analysons les relations entre critères de performance afin d'identifier d'éventuels freins à leur conciliation. Nous nous sommes appuyés sur un échantillon national d'exploitations réelles engagées dans la réduction d'usage de pesticides, couvrant une large gamme de situations de production en France et présentant une diversité de pratiques.

En appliquant des méthodes de régression adaptées à notre jeu de données, nous avons montré que la relation entre critères de performance varie en fonction des caractéristiques biophysiques et socio-économiques dans lesquelles évoluent les systèmes de culture, et qu'il est donc nécessaire d'intégrer la situation de production dans l'analyse de la durabilité, i.e. la capacité à concilier les différentes facettes de la performance.

Dans la majorité des situations de production, nous avons mis en évidence une absence d'antagonisme à la conciliation de plus faibles usages de pesticides avec différents critères de durabilité. Dans la plupart des cas, nous n'avons détecté aucun conflit pour la conciliation des performances environnementales étudiées, et nous avons démontré qu'il est possible de concilier performance économique et faibles impacts environnementaux. Néanmoins, nous n'avons pas mis en évidence de situations favorables à la conciliation d'une plus forte rentabilité avec un faible usage de pesticides ou de faibles impacts environnementaux. Autrement dit, la transition vers des systèmes de culture à plus faibles usages de pesticides ou à faibles impacts sur l'environnement ne garantira pas une meilleure rentabilité. Ce constat peut représenter un frein de taille à une reconception des systèmes de culture existants, tout changement impliquant des risques qui ne seront pas pris par tous les agriculteurs. Des leviers d'action pour accompagner ces changements ont été évoqués ici. A l'échelle nationale, une telle transition impliquera sans doute des bouleversements profonds de la filière agricole, et des études prospectives seront nécessaires pour caractériser leur nature et leur intensité.

Ce travail a permis de mieux comprendre les enjeux liés à la conciliation des différents aspects de la performance. L'étude des relations entre critères de performance deux à deux est une étape préalable mais incontournable dans l'analyse de la durabilité des systèmes de culture. Nos résultats suggèrent l'absence d'antagonismes pour la plupart des relations analysées, et ce dans la majorité des situations de production. Reste à adopter une approche multidimensionnelle pour évaluer la capacité des systèmes de culture à concilier de multiples performances.

BIBLIOGRAPHIE

- Agreste, 2012. Exploitations de grandes cultures en France métropolitaine. Agreste Primeur, 283, 8 p. (Accessible : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/primeur283-3.pdf>, consulté le 30/05/15).
- Allen P., Van Dusen D., Lundy J., Gliessman S., 1991. Expanding the Definition of Sustainable Agriculture. The Center for Agroecology and Sustainable Food Systems. Sustainability in the Balance : Issues in Sustainable Agriculture. University of California, 8 p.
- Aouadi, N., Aubertot, J.N., Caneill, J., Munier-Jolain, N., 2015. Analysing the impact of the farming context and environmental factors on cropping systems: A regional case study in Burgundy. *European Journal of Agronomy* 66, 21-29.
- Arias-Estévez M., López-Periágo E., Martínez-Carballo E., Simal-Gándara J., Mejuto J.C., García-Río L., 2008. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agric. Ecosyst. Environ.* 123, 247–260. doi:10.1016/j.agee.2007.07.011
- Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture (APCA), 2013. Référentiel matériel agricole 2013, service agroéquipement.
- Aubertot, J.N., Robin, M.H., 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* 8(9): e73202.
- Avalos, M., 2009. Sélection de variables avec le Lasso dans la régression logistique conditionnelle. 41èmes Journées de Statistique de la Société Française de Statistique (SFdS), 1-7.
- Barzman, M., Bàrberi, P., Birch, A.N.E., Boonekamp, P., Dachbrodt-Saaydeh S., Graf, B., Hommel, B., Jensen, J.E., Kiss, J., Kudsk, P., Lamichhane, J.R., Messéan, A., Moonen, A.C., Ratnadass, A., Ricci, P., Sarah, J.L., Sattin, M., 2015. Eight principles of integrated pest management. *Agron. Sustain. Dev.* 35 : 1199-1215.
- Bastiaans, L., Paolini, R., Baumann, D.T., 2008. Focus on ecological weed management: What is hindering adoption? *Weed Res.* 48, 481–491. doi:10.1111/j.1365-3180.2008.00662.x
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P., Plantureux, S., 2008. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 139–149.
- Bockstaller, C., Lasserre-Joulin, F., Slezack-Deschaumes, S., Piutti, S., Villerd, J., Amiaud, B., Plantureux, S., 2011. Assessing biodiversity in arable farmland by means of indicators: An overview. *OCL - Ol. Corps Gras Lipides* 18, 137–144. doi:10.1684/ocl.2011.0381
- Boissinot, F., Mézière, D., Bretagnolle, V., Munier-Jolain, N., 2011. Réduire l'usage des herbicides en Grandes cultures. *Phytoma* 649, 39-44.
- Burns, I.G., 1976. Equations to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a known depth or uniformly distributed throughout a soil profile. *The Journal of Agricultural Science*, 86, pp 305-313. doi:10.1017/S0021859600054769.
- Butault, J.P., Dedryver, C.A., Gary, C., Guichard, L., Jacquet, F., Meynard, J.M., Nicot, P., Pitrat, M., Reau, R., Sauphanor, B., Savini, I., Volay, T., 2010. Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport d'étude, INRA Editeur (France), 90 p.
- Carpentier, A., 2010. Economie de la production agricole et régulation de l'utilisation des pesticides. Une synthèse critique de la littérature. INRA Umr Smart ENSAI Rennes.
- COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales - Cultures annuelles et prairies, Edition COMIFER, 159 p.
- Cooper, J., Dobson, H. 2007. The benefits of pesticides to mankind and the environment. *Crop Protection* 26, 1337-1348.
- Davis, A.S., Hill, J.D., Chase, C.A., Johanns, A.M., Liebman, M., 2012. Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health. *PLoS ONE* 7(10): e47149.

Deytieux, V., Nemecek, T., Freiermuth-Knuchel, R., Gaillard, G., Munier-Jolain, N., 2012. Is integrated weed management efficient for reducing environmental impacts of cropping systems? A case study based on life cycle assessment. *European Journal of Agronomy* 36, 55-65.

Deytieux, V., Munier-Jolain, N., Caneill, J., 2015. Assessing the sustainability of cropping systems in single- and multi-site studies. A review of methods. *Eur. J. Agron.* 72, 107–126. doi:10.1016/j.eja.2015.10.005

Direction Générale de la Santé, 2015. Bilan de la qualité de l'eau au robinet du consommateur vis-à-vis des pesticides en 2013. Ministère des affaires sociales, de la santé et des droits de la femme. 14p. 1–14.

Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council, 2009. Official journal of the European Union 309, 71-89.
(Accessible: https://www.eppo.int/PPPRODUCTS/information/2009_0128_EU-e.pdf)

De Mendiburu, F., 2015. agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.2-3 (<https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>).

Gac, A., Cariolle, M., Deltour, L., Dollé, J.B., Espagnol, S., Flénet, F., Guingand, N., Lagadec, S., Le Gall, A., Lellahi, A., Malaval, C., Ponchant, P., Tailleur A., 2011. GES'TIM - des apports pour l'évaluation environnementale des activités agricoles. *Innov. Agron.* 17, 83–94.

Hill, M.O., Smith, A.J.E., 1976. Principal component analysis of taxonomic data with multi-state discrete characters. *Taxon* 25, 249–255.

Jacquet, F., Butault, J.P., Guichard, L., 2011. An economic analysis of the possibility of reducing pesticides in French field crops. *Ecological Economics* 70, 1638-1348.

Johnson, J.M.F., Franzluebbers, A.J., Weyers, S.L., Reicosky, D.C., 2007. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environ. Pollut.* 150, 107–124. doi:10.1016/j.envpol.2007.06.030

Lamichhane, J.R., Dachbrodt-Saaydeh, S., Kudsk, P., Messéan, A., 2016. Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture. *Plant Disease* 100, 10-24.

Larsbo, M., Jarvis, N., 2003. MACRO 5.0. A model of water flow and solute transport in macroporous soil. Technical description. Swedish University of Agricultural Sciences.

Lechenet, M., 2012. Reconquête de la qualité des eaux d'un bassin versant du Nord de la Côte d'Or : Evaluation des conséquences économiques et environnementales des changements de pratiques agricoles. Mémoire de fin d'études, spécialisation Productions végétales durables, Montpellier SupAgro, Montpellier, 53 p.

Lechenet, M., Bretagnolle, V., Bockstaller, C., Boissinot, F., Petit, M.S., et al., 2014. Reconciling Pesticide Reduction with Economic and Environmental Sustainability in Arable Farming. *PLoS ONE* 9(6): e97922.

Lechenet, M., Deytieux, V., Antichi, C., Aubertot, J.-N., Bàrberi, P., Bertrand, M, et al., 2016. Diversity of methodologies to experiment Integrated Pest Management in arable cropping systems: analysis and reflections based on a European network. Soumis.

Lechenet, M., Makowski, D., Py, G., Munier-Jolain, N., 2016a. Profiling farming management strategies with contrasting pesticide use in France. *Agric. Syst.* 149, 40–53. doi:10.1016/j.agsy.2016.08.005

Lechenet, M., Dessaint, F., Py, G., Makowski, D., Munier-Jolain, N., 2016b. Pesticide use can be reduced while preserving crop productivity and farm profitability. Soumis.

Macé, K., Morlon, P., Munier-Jolain, N., Quéré L., 2007. Time scales as a factor in decision-making by French farmers on weed management in annual crops. *Agric. Syst.* 93, 115–142. doi:10.1016/j.agsy.2006.04.007

Mamy, L., Barriuso, G., 2008. Evaluer les risques environnementaux des pesticides Exemple du désherbage des cultures résistantes ou non au glyphosate. *Innov. Agron.* 1, 67–71.

- Meynard, J.M., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Farès, M., Le Bail, M., Magrini, M.B., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Rapport d'étude, INRA, 226 p.
- Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 20 octobre 2015. Plan Ecophyto II. Agro-écologie produisons autrement, 66p. (Accessible : http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/151022_ecophyto.pdf)
- Mischler, P., Lheureu, S., Dumoulin, F., Menu, P., Sene, O., Hopquin, J.P., Cariolle, M., Reau, R., Munier-Jolain, N., Faloya, V., Boizard, H., Meynard, J.M., 2009. Huit fermes de grande culture engagées en production intégrée réduisent les pesticides sans baisse de marge. *Courrier de l'Environnement de l'INRA* 57, 73-91.
- Munier-Jolain, N., Deytieux, V., Guillemin, J.P., Granger, S., Gaba, S., 2008. Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures. *Innovations Agronomiques* 3 : 75-88.
- Munier-Jolain, N., Dongmo, A., 2010. Evaluation de la faisabilité technique de systèmes de Protection Intégrée en termes de fonctionnement d'exploitation et d'organisation du travail. Comment adapter les solutions aux conditions locales ? *Innovations Agronomiques* 8, 57-67.
- Pardo, G., Riravololona, M., 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? *Eur. J. Agron.* 33, 24–32. doi:10.1016/j.eja.2010.02.003
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoît, M., et al., 2014. Quels leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole ? *Innovations Agronomiques*, INRA, 37, pp1-10. <hal-01072305v3>
- Pelzer, E., Fortino, G., Bockstaller, C., Angevin, F., Lamine, C., Moonen, C., Vasileiadis, V., Guérin, D., Guichard, L., Reau, R., Messéan, A., 2012. Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecol. Indic.* 18, 171–182. doi:10.1016/j.ecolind.2011.11.019
- Picazo-Tadeo, A.J., Gómez-Limón, J.A., Reig-Martínez, E., 2011. Assessing farming eco-efficiency: A Data Envelopment Analysis approach. *J. Environ. Manage.* 92, 1154–1164. doi:10.1016/j.jenvman.2010.11.025
- Pimentel, D., Hepperly, P., Hanson, J., Doubs, D., Seidel, R., 2005. Environmental, Energetic and Economic Comparisons of Organic and Conventional Farming Systems. *BioScience* 55, 573-582.
- Poupart, A., 2014. FERMEcophyto – réseau des coopératives : de la réduction d'intrants à la double performance, Académie d'Agriculture de France, 2p. (Accessible : <http://www.academie-agriculture.fr/seances/les-systemes-de-cultures-economes-en-pesticides>, consulté le 25/03/2016)
- R Core Team, 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rossi, V., Caffi, T., Salinari, F., 2012. Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. *Phytopathol. Mediterr.* 51, 457–479.
- Sebillote, M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 64 (11), 906-914.
- Soltner, D., 2005. Les grandes productions végétales, Céréales – Plantes dites « sarclées » - Prairies et autres fourragères, 20ème édition, Sciences et techniques agricoles, Bressuire, 472p.
- Snyder, C.S., Bruulsema, T.W., Jensen, T.L., Fixen, P.E., 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agric. Ecosyst. Environ.* 133, 247–266. doi:10.1016/j.agee.2009.04.021
- Tibshirani, R., 1996. Regression Selection and Shrinkage via the Lasso. *Journal of Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 58, 267-288. doi:10.2307/2346178
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–7. doi:10.1038/nature01014

Younes, M., Galal-Gorchev, H., 2000. Pesticides in drinking water—A case study. *Food Chem. Toxicol.* 38, S87–S90. doi:10.1016/S0278-6915(99)00132-5

SITOGRAPHIE

Feedipedia, 2012. Animal Feed Resources Information System - INRA CIRAD AFZ and FAO. <http://www.feedipedia.org/> (Consulté le 15/01/15).

Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines (SIGES) en Seine-Normandie, 2016. <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article83> (Consulté le 11/04/2016).

Actu—Environnement, 2016. Dictionnaire Environnement. Définition des zones vulnérables. <http://www.actu-environnement.com> (Consulté le 11/04/2016).

Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) de Bretagne, 2016. Nature, paysages, eau et biodiversité. Plaquette générale de présentation du 5ème programme d'actions en Bretagne. <http://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/cinquieme-programme-d-actions-regional-directive-r837.html> (Consulté le 11/04/2016).

Groupement d'intérêt public, Bretagne Environnement, 2013. Portail de l'information environnementale en Bretagne, Zones d'actions complémentaires directive Nitrates. <http://www.bretagne-environnement.org/Media/Atlas/Cartes/Zones-d-actions-complementaires-directive-Nitrates> (Consulté le 25/03/2016).

La documentation Française, 2007. La librairie du citoyen. Le Grenelle de l'environnement (2007). <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/dossiers/developpement-durable/grenelle-environnement-2007.shtml> (Consulté le 04/05/2016)

Institut national de la statistique et des études économiques, 2015. Indice des Prix des Produits Agricoles à la Production (IPPAP) et Indice des Prix d'Achat des Moyens de Production Agricole (IPAMPA). <http://www.bdm.insee.fr/bdm2/choixThene?code=20> (Consulté le 10/02/15).

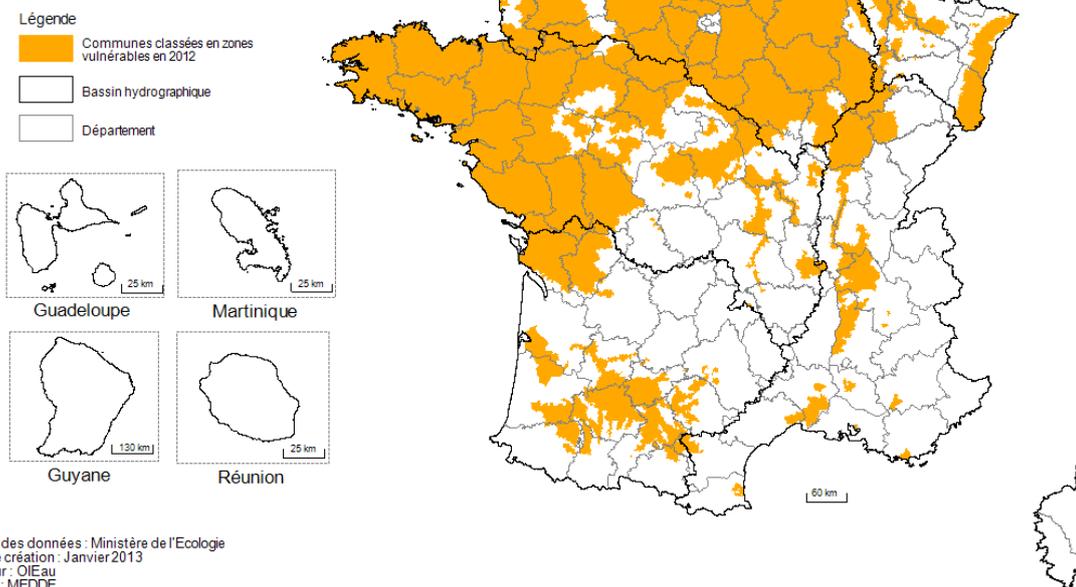
Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, Commissariat général au Développement durable. Observation et statistiques, 2016. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/246/211/contamination-globale-eaux-souterraines-pesticides.html> (Consulté le 12/08/16).

Observatoire des Résidus de Pesticides, 2016. Ecophyto 2018 (10 septembre 2008) <http://www.observatoire-pesticides.fr/index.php?pageid=662> (Consulté le 17/03/2016).

Annexe 1 : Détermination des zones vulnérables sur le territoire national

- DIRECTIVE NITRATES - 5^{ème} délimitation

Zones vulnérables 2012



Annexe 2 : Définition des zones de production spécifiques

Un **bassin d'alimentation de captage** (ou Aire d'alimentation de captage) est défini comme « l'ensemble des surfaces où toute goutte d'eau tombée au sol est susceptible de parvenir jusqu'au captage, que ce soit par infiltration ou par ruissellement ». Elle inclue les différents niveaux de périmètre de protection des captages, qui est rendu obligatoire par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 (article L-1321 du code de la santé publique). Ce périmètre est mis en place pour prévenir les risques de pollutions ponctuelles et diffuses et peut ainsi impliquer des réglementations relatives à l'utilisation de produits phytosanitaires ou l'application de programmes d'actions « nitrate » (SIGES, 2016).

Une **zone vulnérable** correspond à des « Zones désignées comme vulnérables à la pollution diffuse par les nitrates d'origine agricole compte tenu notamment des caractéristiques des terres et des eaux ainsi que l'ensemble des données disponibles sur le teneur en nitrate des eaux et leur zone d'alimentation » (Actu Environnement, 2016). Ces zones sont délimitées par la directive européenne 91/676/CEE dite « Directive Nitrates » qui a pour objectif de réduire la pollution des eaux par le nitrate d'origine agricole. Dans ces zones des pratiques agricoles particulières sont imposées afin de limiter les risques de pollution. Ces pratiques sont définies par le 5^{ème} Programme d'Actions Régional Directive Nitrates en vigueur depuis 2012 (DREAL Bretagne, 2016).

Une **zone d'actions complémentaires** correspond aux bassins versants situés en amont de prises d'eau superficielle destinée à la consommation humaine et qui ne répondent pas aux exigences de qualité des eaux brutes, et où le préfet décide de mettre en œuvre des actions complémentaires (Portail de l'information environnementale en Bretagne, 2016).

Annexe 3 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre l'IFT et la rentabilité

(Valeurs moyennes et erreurs standards)

	Absence d'effet de l'IFT	Effet positif de l'IFT sur la rentabilité
Proportion de SdC (%)	71	29
IFT moyen	3,1 (0,13) b	3,9 (0,16) a
Rentabilité moyenne (€/ha/an)	522 (14,2) b	791 (33,0) a
Précipitations annuelles moyennes (mm)	830 (11,4) a	754 (15,3) b
Température annuelle moyenne (°C)	11,6 (0,09) a	11,5 (0,12) a
Proportion des SdC avec des sols Argilo-calcaire profond (%)	18	10
Proportion des SdC avec des sols limoneux (%)	6	20
Proportion des SdC avec des sols limono-argileux (%)	13	34
Profondeur d'enracinement (cm)	76 (1,8) b	92 (2,6) a
RU moyenne (mm)	104 (4,1) b	138 (8,5) a
Teneur en MO moyenne (g/kg)	30 (0,7) a	28 (0,8) b
Proportion des SdC en polyculture-élevage	71	59
Diversité culturelle	2,6 (0,06) a	2,4 (0,10) b
Diversité des périodes de semis	3,2 (0,08) b	3,6 (0,12) a
Proportion de l'assolement en betterave et pomme-de-terre (%)	0 (0,03) b	10 (1,45) a
Proportion de l'assolement en maïs-semence (%)	0,0 (0,02) b	4 (1,45) a
Proportion de l'assolement en blé tendre d'hiver (%)	33 (1,1) b	41 (1,7) a
Proportion de l'assolement en céréales à paille (%)	52 (1,4) a	50 (106) a
Proportion de l'assolement en orge d'hiver (%)	11 (0,9) a	4 (0,8) b
Proportion de cultures d'été dans l'assolement (%)	22 (1,6) a	16 (2,7) b
Proportion de l'assolement en crucifères oléagineuses (%)	13 (1,0) a	11 (1,2) a
Proportion de l'assolement en maïs (%)	16 (1,6) a	11 (2,3) b
Proportion de l'assolement en légumineuses à graines (%)	3 (0,6) b	5 (0,8) a
Proportion de l'assolement en prairies temporaires (%)	9 (1,4) a	5 (1,3) a

NB : Les lettres indiquent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les groupes

Annexe 4 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre l'IFT et la productivité

(Valeurs moyennes et erreurs standards)

	Effet négatif de l'IFT sur la productivité	Absence d'effet de l'IFT	Effet positif de l'IFT sur la productivité
Proportion de SdC (%)	12	84	4
IFT moyen	3,77 (0,34) a	3,21 (0,11) ab	4,32 (0,55) b
Productivité moyenne (GJ/ha/an)	102 (4,1) c	124 (2,5) b	158 (8,9) a
Précipitations annuelles moyennes (mm)	832 (23,5) a	810 (10,7) a	702 (23,1) b
Température annuelle moyenne (°C)	11,5 (0,3) a	11,6 (0,08) a	11,3 (0,13) a
Proportion des SdC avec des sols Argilo-calcaire superficiel (%)	64	7	0
Proportion des SdC avec des sols limono-argileux (%)	0	18	100
Profondeur d'enracinement du sol (cm)	62 (3,5) c	81 (1,5) b	120 (4,9) a
Teneur moyenne en cailloux du sol (%)	14 (1,3) a	7 (0,6) b	2 (0,7) c
Teneur moyenne en cailloux du sous-sol (%)	47 (3,6) a	19 (1,7) b	2 (0,8) c
RU moyenne (mm)	70 (5,5) c	115 (4,1) b	220,0 (4,8) c
Teneur en MO moyenne (g/kg)	35 (1,9) a	29 (0,6) b	28 (0,9) b
Proportion des SdC en polyculture-élevage	68	67	63
Surface des SdC en zones de production spécifique (%)	76 (7,9) a	56 (3,5) a	37 (18,1) a
Diversité culturelle	2,8 (0,16) a	2,5 (0,05) a	2,4 (0,38) a
Diversité des périodes de semis	3,4 (0,19) a	3,3 (0,07) a	4,0 (0,33) a
Proportion de l'assolement en céréales à paille (%)	53 (3,0) a	51 (1,2) a	54 (3,7) a
Proportion de l'assolement en crucifères oléagineuses (%)	19 (2,2) a	11 (0,8) b	9 (2,8) b
Proportion de cultures d'été dans l'assolement (%)	15 (4,0) ab	22 (1,5) a	8 (2,4) b
Proportion de l'assolement en betterave et pomme-de-terre (%)	0,0 (0,0) c	3 (0,5) b	15 (5,2) a
Proportion de l'assolement en blé tendre d'hiver (%)	30 (2,0) c	36 (1,1) b	45 (3,8) a
Proportion de l'assolement en orge d'hiver (%)	12 (1,9) a	9 (0,8) a	2 (1,2) b
Proportion de l'assolement en légumineuses à graines (%)	4 (1,9) a	3 (0,5) a	7 (2,7) a
Proportion de l'assolement en prairies temporaires (%)	6 (1,6) a	9 (1,2) a	5 (3,1) a

NB : Les lettres indiquent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les groupes

Annexe 5 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre l'IFT et la charge de travail

(Valeurs moyennes et erreurs standards)

	Absence d'effet de l'IFT	Effet positif de l'IFT sur la charge de travail
Proportion de SdC (%)	17	83
IFT moyen	2,7 (0,20) b	3,5 (0,12) a
Charge de travail moyenne (H/ha)	4,6 (0,09) a	4,8 (0,04) a
Précipitations annuelles moyennes (mm)	837 (25,8) a	802 (10,2) a
Température annuelle moyenne (°C)	12,0 (0,19) a	11,5 (0,08) b
Proportion des SdC avec des sols limono-argileux (%)	15	20
Proportion des SdC avec des sols limono-sableux (%)	21	15
Proportion des SdC avec accès à l'irrigation (%)	47	2
Profondeur d'enracinement (cm)	74 (3,9) a	82 (1,7) a
RU moyenne (mm)	98 (7,6) a	117 (4,4) a
Teneur en MO moyenne (g/kg)	30 (1,9) a	29 (0,6) a
Teneur moyenne en cailloux du sol (%)	12 (1,5) a	7 (0,6) b
Teneur moyenne en cailloux du sous-sol (%)	30 (4,1) a	20 (1,8) b
Proportion des SdC en polyculture-élevage	71	67
SAU moyenne des SdC (ha)	139 (13,4) b	188 (9,1) a
Présence de haies (m linéaire/ha)	73 (9,2) a	14 (1,5) b
Surface des SdC en zones de production spécifique (%)	34 (7,7) b	63 (3,5) a
Diversité culturelle	2,7 (0,12) a	2,5 (0,05) a
Diversité des périodes de semis	3,2 (0,18) a	3,4 (0,07) a
Proportion de l'assolement en blé tendre d'hiver (%)	31 (2,8) a	36 (1,0) a
Proportion de l'assolement en céréales à paille (%)	43 (3,1) b	53 (1,1) a
Proportion de cultures d'été dans l'assolement (%)	29 (3,7) a	19 (1,4) b
Proportion de l'assolement en betterave et pomme-de-terre (%)	0 (0,3) b	3 (0,6) b
Proportion de l'assolement en maïs (%)	22 (4,0) a	14 (1,4) b
Proportion de l'assolement en légumineuses à graines (%)	5 (1,5) a	3 (0,5) b
Proportion de l'assolement en prairies temporaires (%)	12 (3,9) a	7 (1,0) a

NB : Les lettres indiquent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les groupes

Annexe 6 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre l'IFT et la concentration en m.a. des eaux souterraines

(Valeurs moyennes et erreurs standards)

	Absence d'effet de l'IFT	Effet positif de l'IFT sur les fuites des m.a.
Proportion de SdC (%)	90	10
IFT moyen	3,4 (0,11) a	3,2 (0,30) a
Concentration en m.a. dans les eaux souterraines (µg/L)	0,07 (0,029) a	0,00 (0,001) a
Précipitations annuelles moyennes (mm)	804 (10,0) a	845 (30,1) a
Température annuelle moyenne (°C)	11,6 (0,08) a	11,5 (0,22) a
Proportion des SdC avec des sols limono-sableux (%)	14	33
Proportion des SdC avec des sols limono-argileux (%)	21	0
Proportion des SdC avec des sols argilo-limoneux (%)	10	24
Profondeur d'enracinement (cm)	81 (1,7) a	79 (3,6) a
RU moyenne (mm)	57 (4,2) a	48 (10,5) a
Teneur en MO moyenne (g/kg)	30 (0,6) a	27 (1,2) a
pH du sol	7,4 (0,05) a	7,1 (0,14) b
Proportion des SdC en polyculture-élevage	64	100
Présence de haies en bordure de parcelle (m linéaire/ha)	26 (2,7) a	7 (2,3) b
Part du SdC à proximité d'un cours d'eau (%)	13 (1,8) a	6 (2,2) a
Diversité culturelle	2,5 (0,05) a	2,8 (0,20) a
Diversité des périodes de semis	3,4 (0,07) a	3,2 (0,21) a
Proportion de betterave pomme-de-terre dans l'assolement (%)	3 (0,6) a	0 (0,0) b
Proportion de l'assolement en céréales à paille (%)	51 (1,1) a	53 (3,8) a
Proportion de cultures d'été dans l'assolement (%)	20 (1,4) a	25 (4,9) a
Proportion de crucifères-oléagineuses dans l'assolement (%)	12 (0,8) a	12 (2,3) a
Proportion de légumineuses à graines dans l'assolement (%)	4 (0,5) a	1 (0,5) a
Proportion de l'assolement en prairies temporaires (%)	8 (1,1) b	8 (2,6) a

NB : Les lettres indiquent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les groupes

Annexe 7 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre les émissions de GES et la rentabilité

(Valeurs moyennes et erreurs standards)

	Absence d'effet	Effet positif des émissions de GES sur la rentabilité
Proportion de SdC (%)	91	9
Emissions de GES moyennes (g éq. CO ₂ /ha/an)	1760 (34,3) b	2063 (144,5) a
Rentabilité moyenne (€/ha/an)	591 (16,7) a	686 (61,9) a
Précipitations annuelles moyennes (mm)	811 (10,0) a	778 (31,7) a
Température annuelle moyenne (°C)	11,5 (0,07) b	12,7 (0,20) a
Proportion des SdC avec des sols Argilo-calcaire profond (%)	14	28
Proportion des SdC avec des sols limono-argileux (%)	18	28
Teneur en cailloux du sol (%)	8 (0,6) b	12 (2,1) a
Teneur en cailloux du sous-sol (%)	20 (1,7) b	39 (5,4) a
Profondeur d'enracinement (cm)	80 (1,6) a	82 (5,3) a
RU moyenne (mm)	114 (4,2) a	107 (8,2) a
Teneur en MO moyenne (g/kg)	30 (0,6) a	26 (1,7) b
Proportion des SdC en polyculture-élevage	70	44
Présence de haies en bordure de parcelle (mlinéaire/ha)	21 (2,3) b	56 (12,9) a
Proportion de l'assolement en céréales à paille (%)	53 (1,0) a	37 (4,4) b
Proportion de cultures d'été dans l'assolement (%)	18 (1,2) b	48 (6,0) a
Proportion de l'assolement en crucifères oléagineuses (%)	13 (0,8) a	7 (2,0) b
Proportion de l'assolement en orge d'hiver (%)	9 (0,7) a	4 (1,7) b
Proportion de l'assolement en maïs-semence (%)	1 (0,3) b	7 (3,6) a
Proportion de l'assolement en légumineuses à graines (%)	3 (0,5) a	7 (2,5) a
Proportion de l'assolement en prairies temporaires (%)	9 (1,2) a	2 (1,0) b

NB : Les lettres indiquent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les groupes

Annexe 8 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre quantité d'azote lessivé et rentabilité

(Valeurs moyennes et erreurs standards)

	Absence d'effet	Effet positif des pertes azotées sur la rentabilité
Proportion de SdC (%)	97	3
Quantité d'azote lessivé (kg N/ha/an)	36 (1,2) a	40 (7,8) a
Rentabilité moyenne (€/ha/an)	592 (16,2) b	830 (109) a
Précipitations annuelles moyennes (mm)	807 (9,7) a	834 (47,4) a
Température annuelle moyenne (°C)	11,6 (0,07) b	12,3 (0,36) a
Proportion des SdC avec des sols limoneux (%)	10	33
Proportion des SdC avec des sols argilo-limoneux (%)	11	33
Profondeur d'enracinement du sol (cm)	80 (1,6) a	78 (10,4) a
RU moyenne (mm)	113 (4,0) a	131 (14,1) a
Teneur en MO moyenne (g/kg)	30 (0,6) a	23 (0,7) b
Proportion des SdC en polyculture-élevage	68	50
Proportion des SdC avec accès à l'irrigation (%)	7	100
Présence de haies en bordure de parcelle (mlinéaire/ha)	23 (2,4) b	55 (22,5) a
Présence d'un couvert hivernal avant culture de printemps (%)	11 (1,0) a	28 (10,4) a
Proportion de cultures de printemps dans l'assolement (%)	32 (1,2) b	52 (7,4) a
Proportion de l'assolement en céréales à paille (%)	52 (1,1) a	43 (7,4) a
Proportion de cultures d'été dans l'assolement (%)	20 (1,4) b	44 (11,1) a
Proportion de maïs dans l'assolement (%)	14 (1,3) b	37 (11,7) a
Proportion de maïs-semence dans l'assolement (%)	1 (0,4) b	8 (6,2) a
Proportion de l'assolement en orge d'hiver (%)	9 (0,7) a	0 (0,1) b
Proportion de l'assolement en crucifère-oléagineuses (%)	12 (0,8) a	7 (3,2) a
Proportion de l'assolement en légumineuses à graines (%)	4 (0,5) a	6 (3,1) a
Proportion de l'assolement en prairies temporaires (%)	8 (1,1) a	1 (0,6) a

NB : Les lettres indiquent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les groupes

Annexe 9 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre la charge de travail et la rentabilité

(Valeurs moyennes et erreurs standards)

	Absence d'effet	Effet positif de la charge de travail sur la rentabilité
Proportion de SdC (%)	92	8
Charge de travail moyenne (H/ha)	4,7 (0,04) a	4,7 (0,12) a
Rentabilité moyenne (€/ha/an)	573 (15,3) b	895 (66,6) a
Précipitations annuelles moyennes (mm)	813 (10,1) a	757 (27,0) a
Température annuelle moyenne (°C)	11,6 (0,08) a	11,6 (0,19) a
Proportion des SdC avec des sols limono-sableux (%)	17	0
Proportion des SdC avec des sols limono-argileux (%)	16	53
Profondeur d'enracinement (cm)	79 (1,5) b	99 (6,1) a
RU moyenne (mm)	109 (4,0) b	169 (12,0) a
Teneur en MO moyenne (g/kg)	30 (0,6) a	27 (0,8) a
Proportion des SdC en polyculture-élevage	69	47
SdC avec accès à des filières de valorisation spécifiques (%)	28	82
Proportion de l'assolement en betterave et pomme-de-terre (%)	2 (0,5) b	9 (3,6) a
Proportion de l'assolement en blé tendre d'hiver (%)	35 (1,0) b	43 (3,6) a
Proportion de l'assolement en céréales à paille (%)	52 (1,1) a	50 (3,4) a
Proportion de l'assolement en orge d'hiver (%)	9 (0,7) a	5 (1,7) b
Proportion de cultures d'été dans l'assolement (%)	20 (1,4) a	20 (5,9) a
Proportion de l'assolement en crucifères-oléagineuses (%)	12 (0,8) a	11 (2,0) a
Proportion de l'assolement en maïs-semence (%)	0 (0,2) b	8 (4,3) a
Proportion de l'assolement en légumineuses à graines (%)	4 (0,5) a	5 (1,5) a
Proportion de l'assolement en prairies temporaires (%)	9 (1,1) a	2 (1,5) a

NB : Les lettres indiquent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les groupes

Annexe 10 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre émissions de GES et quantité d'azote lessivé

(Valeurs moyennes et erreurs standards)

	Relation négative	Absence de relation	Relation positive
Proportion de SdC (%)	7	68	25
Emissions de GES moyennes (g éq. CO ₂ /ha/an)	1870 (103,4) a	1769 (41,2) a	1812 (73,4) a
Quantité d'azote lessivé (kg N/ha/an)	29 (2,7) b	33 (1,5) b	46 (2,3) a
Précipitations annuelles moyennes (mm)	682 (11,2) c	785 (9,8) b	903 (21,1) a
Température annuelle moyenne (°C)	12,1 (0,32) a	11,5 (0,09) a	11,5 (0,15) a
Nombre annuel de jours de gel moyen	34 (2,9) b	41 (1,2) a	44 (2,0) a
Proportion des SdC avec des sols Argilo-calcaire superficiel (%)	14	9	25
Proportion des SdC avec des sols Argilo-calcaire profonds (%)	0	18	13
Proportion des SdC avec des sols Argilo-limoneux (%)	36	12	2
Proportion des SdC avec des sols limoneux (%)	0	3	33
Profondeur d'enracinement du sol (cm)	94 (6,0) a	82 (1,7) a	74 (3,4) b
Teneur moyenne en cailloux du sol (%)	4 (1,6) b	7 (0,6) b	11 (1,2) a
Teneur moyenne en cailloux du sous-sol (%)	8 (3,8) b	19 (1,9) b	32 (3,2) a
RU moyenne (mm)	160 (14,2) a	114 (7,8) b	100 (7,0) b
Teneur en MO moyenne (g/kg)	24 (1,3) c	29 (0,5) b	33 (1,6) a
Proportion des SdC en polyculture-élevage	50	65	77
Diversité culturelle	2,5 (0,3) b	2,5 (0,1) b	2,7 (0,1) a
Diversité des périodes de semis	3,6 (0,3) a	3,4 (0,1) a	3,2 (0,1) a
Proportion de l'assolement en céréales à paille (%)	56 (2,7) a	54 (1,5) a	44 (2,6) b
Proportion de l'assolement en blé tendre d'hiver (%)	45 (2,6) a	37 (1,0) b	28 (2,1) c
Proportion de cultures d'été dans l'assolement (%)	18 (5,0) a	19 (1,5) a	25 (3,5) a
Proportion de crucifères-oléagineuses dans l'assolement (%)	10 (2,3) a	12 (1,0) a	13 (1,4) a
Proportion de l'assolement en betterave et pomme-de-terre (%)	8 (4,0) a	3 (0,6) ab	1 (0,5) b
Proportion de l'assolement en légumineuses à graines (%)	6 (2,5) a	4 (0,7) a	4 (0,7) a
Proportion de l'assolement en prairies temporaires (%)	2 (0,9) a	7 (1,2) ab	12 (2,6) b

NB : Les lettres indiquent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les groupes

Annexe 11 : Caractéristiques des SdC selon la relation entre quantité d'azote lessivé et concentration en m.a. dans les eaux souterraines

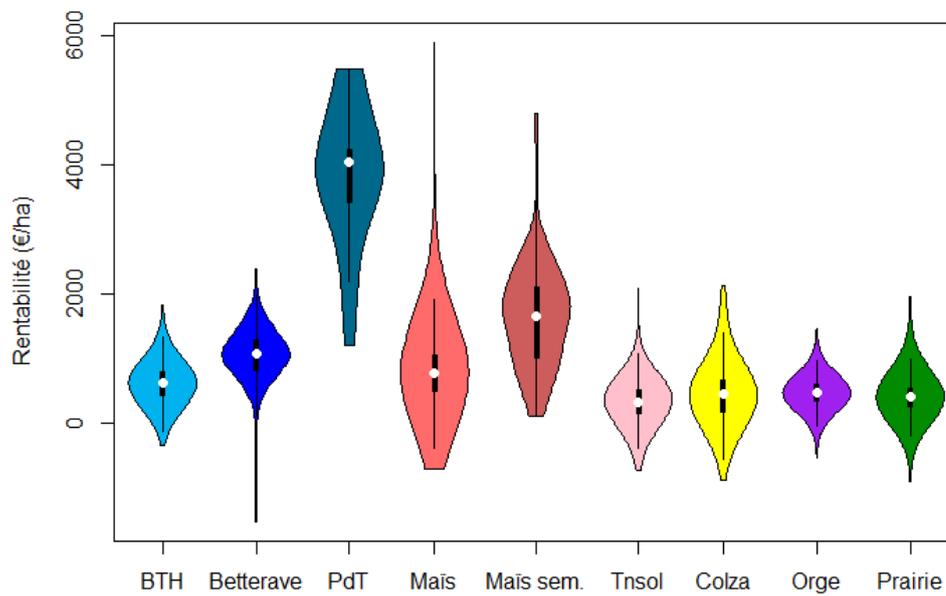
(Valeurs moyennes et erreurs standards)

	Absence de relation	Relation positive
Proportion de SdC (%)	73	27
Quantité d'azote lessivé (kg N/ha/an)	35 (1,3) a	41 (2,6) a
Concentration des eaux souterraines en m.a. (µg/L)	0,08 (0,04) a	0,02 (0,01) a
Précipitations annuelles moyennes (mm)	802 (11,6) a	826 (15,9) a
Température annuelle moyenne (°C)	11,6 (0,09) a	11,4 (0,13) a
Proportion des SdC avec des sols Argilo-calcaire superficiel (%)	7	31
Proportion des SdC avec des sols limono-argileux (%)	26	0
Profondeur d'enracinement du sol (cm)	84 (1,7) a	70 (2,7) b
Teneur moyenne en cailloux du sol (%)	7 (0,7) b	9 (0,8) a
Teneur moyenne en cailloux du sous-sol (%)	19 (1,8) b	30 (3,2) a
RU moyenne (mm)	121 (4,8) a	95 (6,0) b
Teneur en MO moyenne (g/kg)	28 (0,6) b	34 (1,2) a
Proportion des SdC en polyculture-élevage	66	71
Proportion de l'assolement au bord d'un cours d'eau (%)	15 (2,1) a	5 (1,5) b
Présence de haies en bordure de parcelle (mlinéaire/ha)	28 (3,1) a	13 (2,9) b
Proportion de l'assolement en céréales à paille (%)	51 (1,3) a	52 (2,0) a
Proportion de l'assolement en crucifères oléagineux (%)	11 (0,9) b	15 (1,5) a
Proportion de cultures d'été dans l'assolement (%)	21 (1,7) a	19 (2,2) a
Proportion de l'assolement en betterave et pomme-de-terre (%)	4 (0,7) a	0 (0,0) b
Proportion de l'assolement en blé tendre d'hiver (%)	36 (1,1) a	32 (1,7) b
Proportion de l'assolement en orge d'hiver (%)	8 (0,8) b	11 (1,4) a
Proportion de l'assolement en légumineuses à graines (%)	4 (0,6) a	2 (0,8) b
Proportion de l'assolement en prairies temporaires (%)	7 (1,1) b	11 (2,5) a

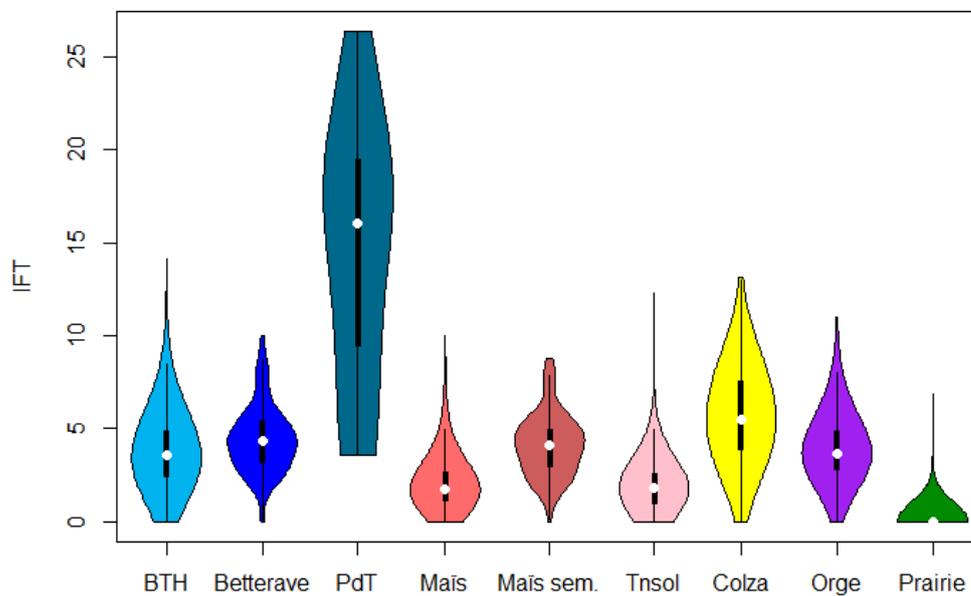
NB : Les lettres indiquent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les groupes

Annexe 12 : Violin plot des rentabilités (a1) et des IFT (a2) pour une sélection de cultures du réseau FERMEcophyto

a 1 : Violin plot des rentabilités par culture

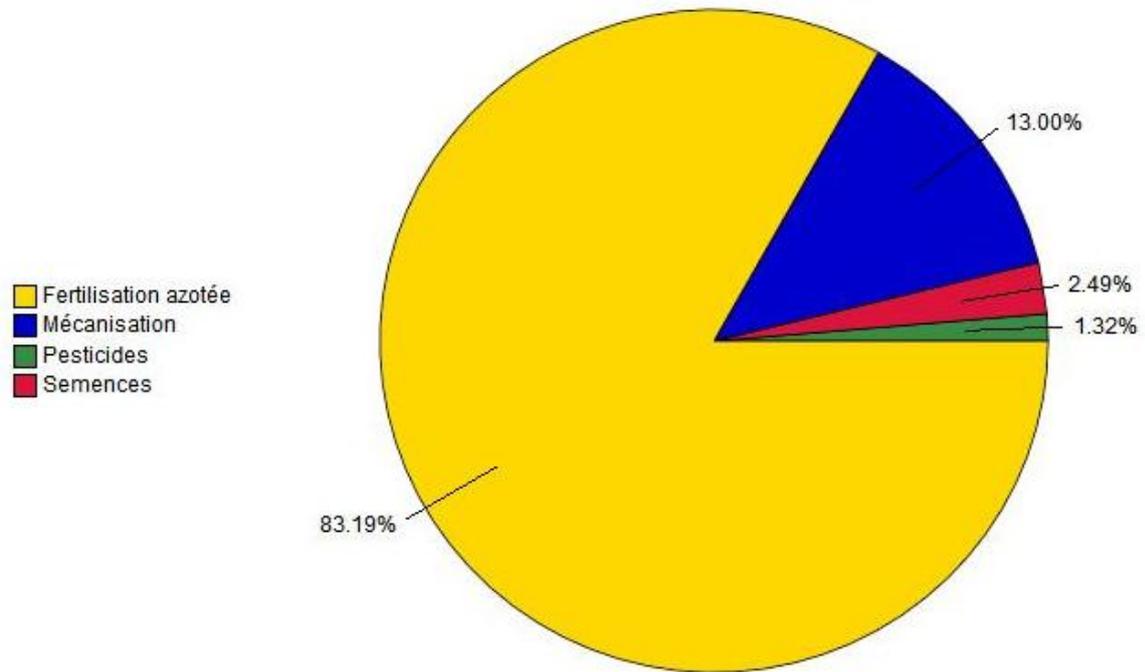


a 2 : Violin plot des IFT par culture



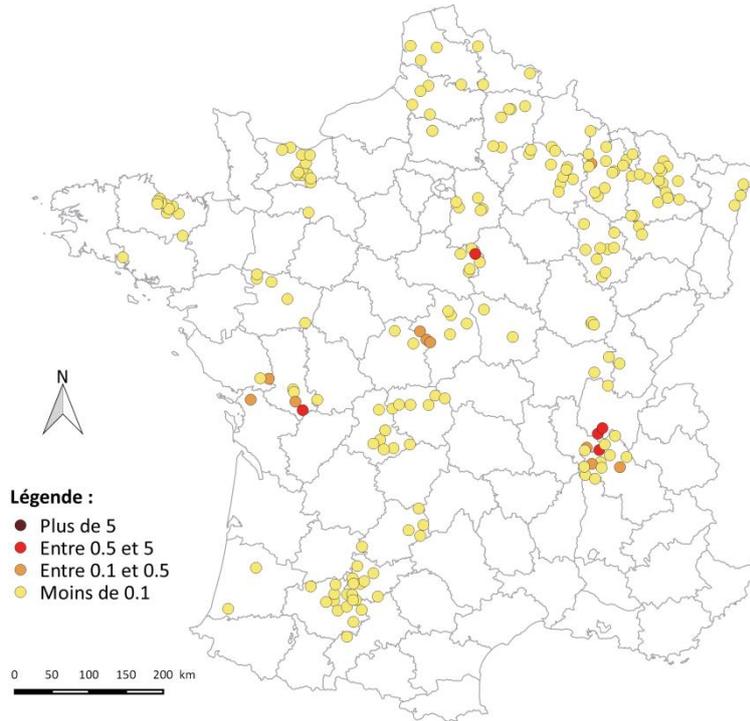
BTH : Blé Tendre d'Hiver ; PdT : Pomme-de-Terre ; Maïs sem. : Maïs-semence ; Tnsol : Tournesol ; Orge : Orge d'hiver ; Prairie : Prairie temporaire

Annexe 13 : Répartition des émissions de GES par poste (moyenne des SdC du réseau)

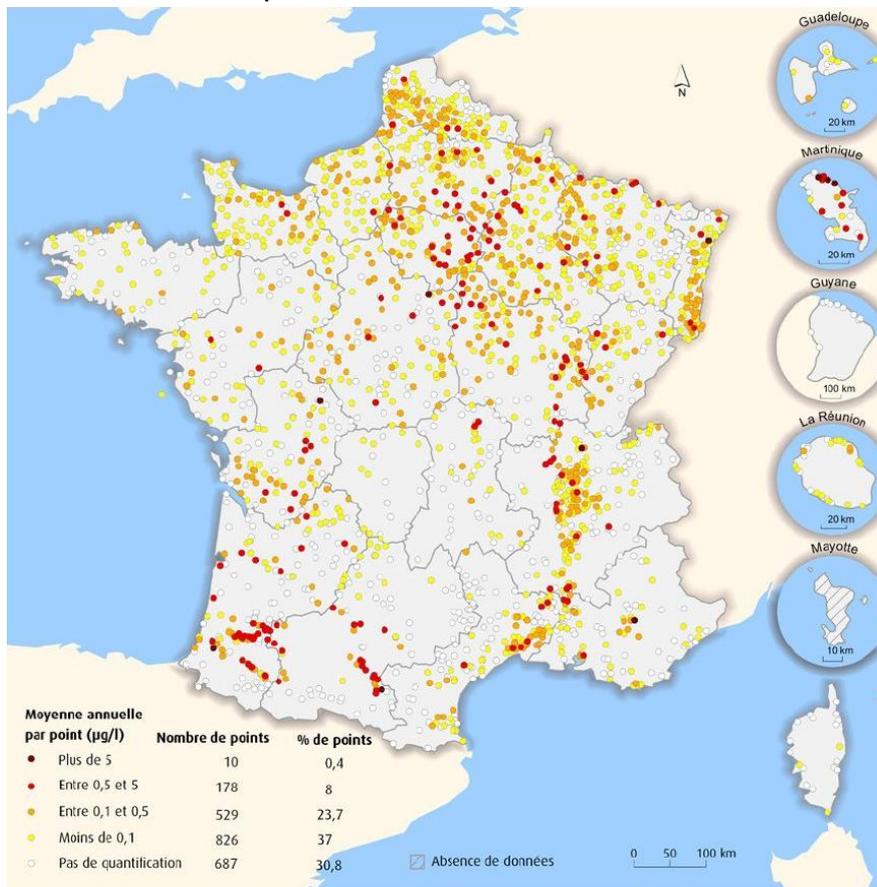


Annexe 14 : Comparaison des concentrations en matières actives dans les eaux souterraines (en µg/L) des SdC du réseau FERMEcophyto (a1) avec les mesures nationales (a2)

a 1 : Concentrations en m.a. dans les eaux souterraines des SdC simulée par le modèle MACRO



a 2 : Concentrations en pesticides mesurées dans les eaux souterraines en 2013



Sources : agences et offices de l'eau ; BRGM, banque de données ADES, 2014 ; réseaux RCS-RCO Traitements ; SOeS, 2015



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

Auteur : Chloé SAGLIBENE

Date de naissance : 25/09/1992

Nombre de pages : 47 Annexes : 14

Année de soutenance : 2016

Organisme d'accueil : Agrosolutions

Adresse : 83 avenue de la Grande Armée
75782, Paris.

Maîtres de stage : Martin LECHENET et
Guillaume PY

Titre français : **Quels antagonismes entre critères de performance agro-éco-environnementale ?**
Analyse d'un réseau national de démonstration FERMEcophyto

Titre anglais: **Which conflicts between sustainability issues?**
Analysis of a national network of demonstration farms FERMEcophyto

Résumé : L'adoption de modes de production durables et moins dépendants des intrants de synthèse est aujourd'hui un enjeu clef de l'agriculture. La recherche de systèmes de culture multi-performants nécessite de mieux comprendre les relations entre les critères de performance agro-éco-environnementale. Existe-t-il des conflits qui puissent nuire à leur conciliation ? Cette étude analyse les relations entre critères de performance deux-à-deux en utilisant la régression LASSO. Cette méthode nous a permis de mesurer la nature et l'intensité des relations entre critères en tenant compte du contexte biophysique et socio-économique dans lesquels évoluent les exploitations du réseau FERMEcophyto. Ce réseau de fermes de démonstration réunit 205 agriculteurs en grandes cultures et polyculture-élevage, répartis sur tout le territoire national. Dans la majorité des situations, nous avons mis en évidence une absence d'antagonismes pour la conciliation (i) de plus faibles usages de pesticides avec les différents critères de durabilité (ii) d'une rentabilité équivalente avec de plus faibles impacts environnementaux et (iii) des performances environnementales entre elles. Néanmoins, nous n'avons pas identifié de situations favorables à la conciliation d'une meilleure rentabilité avec un plus faible usage de pesticides ou de plus faibles impacts environnementaux. Sur la base d'approches multidimensionnelles, il s'agit maintenant d'évaluer la capacité des systèmes de culture à concilier conjointement plusieurs critères de durabilité et à étudier les conséquences de l'adoption de stratégies de production plus durables sur l'ensemble de la filière agricole.

Abstract: Reducing reliance on manufactured inputs is a key challenge for agricultural sustainability. To identify cropping systems better able to find the appropriate balance between the various components of sustainability, we require a better understanding of the relationship between these components. Here we analyzed the relationships between economic, environmental and social indicators, in order to detect potential conflicts among the set of indicators. Using the LASSO regression method, we characterized the links between performance indicators as a function of the production context in which farms from the FERMEcophyto network are operating. This national network gathers 205 arable cropping systems distributed over the French territory. We demonstrated that, in most cases, there were no conflicts to combine (i) a low pesticide use and all sustainability components we assessed, (ii) the same level of profitability and lower environmental impacts and (iii) environmental performances together. We failed to detect situations in which it was possible to combine a better profitability with a lower pesticide use or environmental impacts. Using multidimensional approaches, it would be wise to assess the ability of cropping system to find the optimal balance between not two but several performances and to prospect the consequences of a general adoption of more sustainable farming strategies on the whole agricultural sector.

Mots-clés : Agriculture durable, Evaluation multicritère, Systèmes de culture, Situations de production

Key Words: Sustainable agriculture, Multi-criteria approach, Cropping systems, Production situations