



HAL
open science

Des principes agronomiques à la pratique : décrire et interpréter les dynamiques d'adoption des cultures associées en France

Elodie Yan

► To cite this version:

Elodie Yan. Des principes agronomiques à la pratique : décrire et interpréter les dynamiques d'adoption des cultures associées en France. Agronomie. Université Paris-Saclay, 2024. Français. NNT : 2024UPASB046 . tel-04880420

HAL Id: tel-04880420

<https://theses.hal.science/tel-04880420v1>

Submitted on 10 Jan 2025

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.

Des principes agronomiques à la pratique :
décrire et interpréter les dynamiques
d'adoption des cultures associées en France

*From agronomic principles to practice: description and interpretation of
the adoption dynamics of crop mixtures in France*

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n°581 : agriculture, alimentation, biologie, environnement, santé
(ABIES)

Spécialité de doctorat : Sciences agronomiques
Graduate School : Biosphera. Référent : AgroParisTech

Thèse préparée dans l'UMR **SADAPT** (Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE),
sous la direction de **Philippe MARTIN**, Professeur,
et le co-encadrement de **Marco CAROZZI**, Chargé de recherche

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 18 novembre 2024, par

Élodie YAN

Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

Aurélié METAY

Professeure, L'Institut Agro Montpellier

Présidente

Lionel ALLETTO

Directeur de recherche, INRAE (centre Occitanie-Toulouse)

Rapporteur & Examineur

Claudine THENAIL

Chargée de recherche (HDR), INRAE (centre Bretagne-Normandie)

Rapporteuse & Examinatrice

Jérôme ENJALBERT

Directeur de recherche, INRAE (Université Paris-Saclay)

Examineur

Maé GUINET

Maîtresse de conférences, L'Institut Agro Dijon

Examinatrice

Titre : Des principes agronomiques à la pratique : décrire et interpréter les dynamiques d'adoption des cultures associées en France

Mots clés : agronomie des territoires, trajectoires de changement de pratiques, dynamiques territoriales, mélanges d'espèces, réduction d'usage de pesticides

Résumé : Les cultures associées, qui comprennent les mélanges de variétés et les mélanges d'espèces, sont une pratique de diversification efficace pour la gestion des bioagresseurs. Nous observons depuis quelques années une augmentation des surfaces cultivées de mélanges variétaux – notamment de blé – et d'espèces, mais certains mélanges, comme les mélanges annuels de céréales-légumineuses représentent encore une faible part des terres labourables en France. En effet, des freins techniques, matériels, économiques et cognitifs empêchent l'adoption des cultures associées par les agriculteurs et agricultrices.

L'objectif de la thèse est d'étudier les cultures associées dans des conditions agricoles réelles, afin de produire des références sur leurs performances en termes d'utilisations d'intrants et de production, et d'analyser les dynamiques d'adoption à l'échelle des exploitations agricoles et des territoires. Pour cela, nous mobilisons une approche mixte, entre analyses de bases de données et analyses d'enquêtes de terrain, et multi-échelles, en liant la parcelle et le système de culture, l'exploitation agricole et le territoire.

Nos résultats suggèrent que certains mélanges sont plus efficaces que d'autres quant à la réduction d'utilisation d'intrants chimiques, et soulignent l'importance du choix des variétés et des espèces pour concevoir des mélanges correspondant aux objectifs des agriculteurs et agricultrices. Le travail collectif, les échanges avec les pairs et un accompagnement adéquat peuvent permettre de lever un certain nombre de freins à l'adoption des cultures associées. Au sein des exploitations, les compositions des mélanges et les surfaces qui leur sont allouées sont amenées à évoluer au cours du temps, selon les objectifs et contraintes des agriculteurs et agricultrices, les usages et débouchés. Au fil de leurs expériences, les agriculteurs et agricultrices affinent leurs connaissances sur la pratique ce qui contribue également à faire évoluer leurs mélanges. Ces évolutions ainsi que les interactions entre pairs sont responsables des dynamiques d'adoption observées à l'échelle des territoires. Enfin, il ressort de notre étude que même au sein des territoires particulièrement dynamiques, des difficultés subsistent et semblent conduire à l'abandon de la pratique après quelques années d'essais. Il convient alors d'étudier plus précisément ces cas afin d'affiner notre compréhension des processus d'adoption des cultures associées.

Title: From agronomic principles to practice: description and interpretation of the adoption dynamics of crop mixtures in France

Keywords: landscape agronomy, transition pathways, territorial dynamics, intercrop, pesticide use reduction

Abstract: Crop mixtures, including variety and species mixtures (or intercrops), are an effective crop diversification practice for managing pests and diseases. In recent years, we have seen an increase in the area cultivated with variety mixtures – particularly wheat – and species mixtures. However, some mixtures, such as cereal-legume intercrops, still account for only a small share of arable land in France. Indeed, technical, material, and economic barriers and the lack of knowledge and references hinder the adoption of crop mixtures by farmers.

The aim of this thesis is to study crop mixtures under current agricultural conditions to produce references on their performance in terms of input use and production and to analyse the dynamics of adoption at farm and territorial levels. To this end, we used a mixed approach, combining analysis of databases and field surveys, and a multi-scale approach, linking the plot and the cropping system, the farm and the territory.

Our results suggest that some mixtures are more effective than others in reducing chemical inputs and underline the importance of the choice of varieties and species in designing mixtures that meet farmers' objectives. Collective work, exchanges with peers and adapted support from advisory services can help to overcome several obstacles to the adoption of associated crops. On farms, the composition of intercrops and the areas allocated to them are likely to evolve, depending on the farmers' objectives and constraints, and outlets for the intercrops. As they gain experience, farmers refine their knowledge of the practice, which also helps them to develop their intercrops. These changes, along with peer-to-peer interactions, are responsible for the adoption dynamics observed at the territorial level. Finally, our study shows that even in particularly dynamic areas, difficulties remain and seem to lead to the abandonment of the practice after a few years of testing. These cases, therefore, need to be studied in greater detail to refine our understanding of the processes involved in adopting crop mixtures.

AVANT-PROPOS

Cette thèse a été financée dans le cadre du projet MoBiDiv (Mobiliser et sélectionner la diversité cultivée intra et inter-spécifique pour un changement systémique vers une agriculture sans pesticide, <https://mobidiv.hub.inrae.fr/>) par le programme ANR PPR Cultiver et Protéger Autrement (ANR-20-PCPA-0006), et accueillie au sein de l'UMR SADAPT (INRAE).

MOBiDiv



anr[®] INRAE

CULTIVER
PROTÉGER
autrement

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont bien évidemment à Philippe Martin et Marco Carozzi. Merci de m'avoir fait confiance pour cette thèse, malgré mon bagage non-agronomique de départ. Merci de votre patience dans les moments de doute – et merci pour les mouchoirs et les sucreries. Merci aussi pour votre disponibilité, car malgré vos nombreuses autres responsabilités, vous avez toujours répondu présents lorsque je sollicitais votre aide. Grâce à vous, je crois que je suis finalement parvenue à trouver et tirer « le fil » dont tu me parlais si souvent Philippe, et qui me paraissait parfois être un mythe.

Je remercie également les membres de mon comité de suivi de thèse : Aline Fugerey-Scarbel, Antoine Gardarin, Nicolas Munier-Jolain, Emmanuelle Porcher et Laure Sansonnet. Merci pour vos retours toujours très constructifs et vos encouragements qui m'ont été précieux. Nicolas et Emmanuelle, du fait du projet MoBiDiv qui nous réunissait, vous aviez un statut un peu particulier dans le suivi de ma thèse, et je vous remercie d'avoir continué à suivre mes avancées aussi fréquemment, même lorsque celles-ci ont pris une direction sortant de vos domaines respectifs. Laure, tu m'avais déjà suivie lors de mon stage de fin d'études, et j'ai été ravie de continuer à échanger avec toi. Je te remercie d'avoir pris le temps de répondre à mes questions statistiques et même d'avoir mis le nez dans mes données pour m'aider.

Un grand merci à Lionel Alletto, Claudine Thenail, Jérôme Enjalbert, Maé Guinet et Aurélie Metay d'avoir accepté d'endosser les rôles de rapporteurs et examinateurs ou examinatrices de cette thèse. Merci pour vos retours sur mon travail, et pour les échanges lors de la soutenance. J'en garde un très bon souvenir.

Les travaux présentés dans cette thèse reposent sur des sources de données diverses. Merci à toutes les personnes qui ont facilité l'accès et la prise en main des bases de données : je pense notamment à l'équipe Agrosyst et à Nicolas ainsi qu'à l'équipe OAB et Emmanuelle – même si, malheureusement, cela n'a pas abouti à ce que nous espérions. Merci aux personnes qui ont accepté de me recevoir et d'échanger avec moi lors des enquêtes de terrain : agriculteurs et agricultrices, animatrices, conseillères et conseillers, techniciens ; j'ai énormément appris grâce à vous. Merci en particulier à l'agriculteur qui a sorti ma voiture du fossé avec son tracteur : j'ai aussi énormément appris de cette expérience.

Merci aussi au collectif MoBiDiv ; je pense que c'était une grande chance que de faire partie de ce projet pendant ma thèse. Aline, merci pour l'organisation de nos réunions de projet aux quatre coins de la France, et merci à toi ainsi qu'à Jérôme de me donner l'opportunité de présenter mes travaux de thèse à une diversité de publics, et merci pour votre bienveillance et vos encouragements durant ces trois années.

En dehors de l'encadrement et du comité de suivi de thèse, j'ai aussi eu la chance d'être entourée de personnes qui ont pu m'aider, à différents niveaux. Je remercie donc Antoine Cornuéjols, Chloé Salembier, Mourad Hannachi et Maude Quinio, qui à un moment ou à un autre, ont accepté de se plonger dans un ou plusieurs aspects de ma thèse et m'ont aidée à y voir plus clair.

Il me tenait à cœur de faire l'expérience de l'enseignement et de l'encadrement pendant mon doctorat. Ces activités « annexes » ont été très enrichissantes à la fois professionnellement et personnellement. Je remercie Liliana Ibanescu, Cristina Manfredotti, et Christine Martin, qui m'ont confié mes premiers TD, en tant qu'ancienne IODAA, ainsi que Nicolas Guilpart, Solène Pissonnier, Philippe Martin, et Ivan Sache, qui m'ont montré que je pouvais aussi enseigner en agronomie. Merci également à Sophie Agostini et Baptiste Coupery : je vous remercie de m'avoir fait confiance pour vous encadrer ; c'était un réel plaisir de travailler avec vous.

Pour cette thèse, j'ai été accueillie pendant trois années à l'UMR SADAPT, que j'ai eu la chance de découvrir au fil du temps. Merci à Simon S., Florence et Morgane de veiller sur nous au quotidien, et de faire en sorte que nous puissions travailler dans les meilleures conditions possibles. Florence, merci de me rassurer avant chaque départ sur le terrain, merci pour les petits dessins et les tricots. Merci Yannick de m'avoir accueillie dans ton bureau, et pour les conseils que tu as pu me donner. Merci également aux voisins et voisines de couloir, qui m'ont accueillie à leur grande table de l'UMR Agronomie pour partager quelques repas, quelques trajets en transilien (puis en navette) ou quelques cafés(-croissants) : Alain, Arnaud B., Baptiste R., Dominique, Emma, Juliette, Louis, Lucie, Malick, Marie, Michèle, Moetez, Simon B., Tiana... Merci aux doctorantes et doctorants avec qui j'ai pu échanger sur la thèse, partager un bureau, un café, des chocolats, des arancini, des crêpes bretonnes ou même des baignades, que cela soit de SADAPT, Agronomie, à travers MoBiDiv, ou autres : Emma, Fabrice, Faustine, Jeanne, Léa, Maïté, Malick, Meije, Michel, Qiang, Ruizhen, Tiana, Tianzhu, Yannick, Youssef. Merci Agathe, Anaïs, Chloé et François pour l'animation des non-titulaires, à Francesco pour l'animation d'équipe et de groupe transversal. Merci à Mourad, d'être toujours une oreille attentive et de bons conseils, malgré nos joutes en conseil de service.

Je voudrais remercier les stars de SADAPT, qui ont illuminé mon quotidien. Merci Simon S., de m'avoir toujours suivie dans mes bêtises, que cela soit pour passer une journée à faire des sablés de Noël, ou pour faire des montages moches pour les repas d'unité. Les journées sont tout de suite devenues bien plus belles après t'avoir rencontré ; j'espère que tu es content d'avoir retrouvé des robots. Agathe, l'animation des non-titulaires nous a peut-être permis de nous rencontrer, mais je crois que de nombreux autres points communs nous ont rapprochés : les Bret's, la SAVAC, Roland Garros, les goûters, et d'autres encore. Alice, j'avais réfléchi à intégrer un QR-code pour renvoyer vers mes remerciements à ton égard... puis je me suis dit qu'on allait plutôt garder ça pour une invitation à une soirée FoodTech. Esther, dès l'instant où tu es arrivée dans notre bureau, Philippe a dû fermer sa porte pour ne pas être dérangé par nos éclats de rire. Merci pour ces journées à la fois studieuses et heureuses, et aussi pour tous tes conseils et ton aide sur la fin de thèse. Garance, Molly, faites attention à ne pas vous faire courser par des patous à vos prochaines JDD. Baptiste G., tu es arrivé un beau mois de mai sur ce campus de Grignon, mettant fin à des mois où la solitude se faisait parfois ressentir : merci d'avoir apporté ta bonne humeur jusqu'ici (même si tu es le pire footix du cyclisme). Matthieu, le Mat', prends soin de la SD-Box, et je compte sur toi pour exécuter le plan du plus ancien CDD (tu auras un beau maillot jaune à l'arrivée) ; de mon côté, je te promets de prendre soin

de Cuisto. Bethsabée, Mariem, Antoine et Hugo : vous avez laissé un vide en partant, mais merci pour chacun des goûters que nous avons pu partager, et merci de continuer à prendre des nouvelles. A vous toutes et tous, je vous souhaite le meilleur, comme vous me l'avez apporté.

En dehors de cette grande bulle flottant sur un plateau, merci aux amies et amis qui me soutiennent, m'encouragent et prennent soin de moi depuis tant d'années, souvent avec une bonne dose de gourmandise. Chloé, je me souviens encore de cette soirée avec toi où je postulais à des offres de thèse, et maintenant voilà que cette aventure s'achève pour toutes les deux ; il faudra que l'on fête ça autour d'un bon plateau de fromage. Guillaume, le Troy de ma Gabriella, merci pour les raclettes, les thés, et de rien pour la vaisselle ; à très vite pour des soirées crochet. Benoît, depuis notre rencontre en TP de chimie à aujourd'hui, merci d'avoir toujours été là, et de n'avoir jamais changé d'humour et merci à Garance et toi d'avoir bravé un pic de chaleur parisien étouffant pour venir me voir quand j'avais le pied dans le plâtre. Charlotte, j'ai si hâte de nos futures aventures au pays des *beans*, du *farmers' market* et des *crumpets* ; merci pour les délicieux petits plats que tu me cuisines avec amour et de supporter mes crises de panique quand je n'arrive pas à faire un joli collier de perles.

Merci à la famille, Emmanuel, Françoise, Elise, Gabriel, Baptiste et Manon, qui sont là depuis de nombreuses années. C'est toujours un plaisir de prendre le café, partager une partie de coinche ou de volley et de porter des cailloux à vos côtés. Merci à mes parents et à mes sœurs (et les +1 !). Papa, merci pour les tableaux Excel ; Maman, merci pour les sorties hebdomadaires à la bibliothèque ; Bobo, merci de m'avoir appris à lire et à écrire des mots difficiles comme « pingouin » ; Youyou, merci d'être ma plus grande supportrice depuis notre enfance. Je ne pourrai vous remercier assez pour tout ce que vous faites et avez fait et je n'en serai certainement pas là sans vous.

Enfin, merci à toi Simon. Merci de croire en moi quand je n'y arrive pas moi-même, merci d'avoir relu ce manuscrit, merci pour tout ce que tu fais au quotidien. Je m'arrêterai là car je connais ta pudeur, mais sache que je ferai en sorte d'être à ta hauteur maintenant que vient ton tour.

LISTE DE PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

PUBLICATIONS DANS DES REVUES À COMITÉ DE LECTURE

Yan, E., Munier-Jolain, N., Martin, P., & Carozzi, M. (2024). Intercropping on French farms: Reducing pesticide and N fertiliser use while maintaining gross margins. *European Journal of Agronomy*, 152, 127036. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127036>

Yan, E., Martin, P., & Carozzi, M. (2025). Main characteristics of French farms adopting cereal–legume intercropping: A quantitative exploration at the national and local levels. *Agricultural Systems*, 223, 104196. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104196>

Yan, E., Carozzi, M., & Martin, P. (*In progress*). Adoption and development of cereal–legume intercropping on farms: roles of collective dynamics in individual pathways. *Agronomy for Sustainable Development*.

Yan, E., Carozzi, M., & Martin, P. (*In progress*). Exploring on-farm cereal–legume intercropping dynamics to assess their diffusion at the territorial scale.

COMMUNICATIONS ORALES

Yan, E., Carozzi, M., Munier-Jolain, N., & Martin, P. Potential of crop mixtures to reduce pesticide use in France. A data analysis. *Poster presentation at the 17th Congress of the European Society for Agronomy*. 29 August to 22 September 2022, Potsdam, Germany. <https://hal.inrae.fr/hal-03927116>

Yan, E., Carozzi, M., Munier-Jolain, N., & Martin, P. Adoption of cereal–legume intercropping on French Farms: roles of collective dynamics for individual transition pathways. *Oral presentation at the 15th International Farming Systems Association Conference*. 30 June to 4 July 2024, Trapani, Italy. <https://hal.inrae.fr/hal-04643464>

Yan, E., Carozzi, M., & Martin, P. Adoption of cereal–legume intercropping in France: a matter of outlets?. *Oral presentation at the 18th Congress of the European Society for Agronomy*. 26 to 30 August 2024, Rennes, France. <https://hal.inrae.fr/hal-04683917>

VULGARISATION SCIENTIFIQUE

Yan, E. (2024). Les mélanges de cultures, des dynamiques contrastées. *Phytoma-La santé des végétaux*, 771.

Yan, E. Dynamiques de diffusion des mélanges et impacts sur l'utilisation d'intrants chimiques. *Rencontre Chercheurs – Professionnels : Quelles semences pour une agriculture sans pesticide ? Mobiliser la diversification des cultures et la vigueur des graines*. 19 mars 2024, Paris, France.

ENSEIGNEMENT ET ENCADREMENT

ENSEIGNEMENT

TD Informatique – AgroParisTech, 1^{ère} année : janvier 2022, novembre 2022

TD Agronomy for global issues – AgroParisTech, M2 Climate, Land Use, and Ecosystem Services (CLUES) et M2 De l'agronomie à l'agro-écologie (AAE) : septembre 2022, septembre 2023

TD Fonctionnement de l'exploitation agricole – AgroParisTech, 1^{ère} année : mars 2023

Intervention en cours, présentation des travaux de thèse – AgroParisTech, 3^{ème} année, Protection des Plantes et Environnement : janvier 2023, février 2024

Intervention en cours, présentation des travaux de thèse pour le module « Concevoir des systèmes à l'échelle du territoire » – AgroParisTech, M2 De l'agronomie à l'agro-écologie (AAE) : octobre 2023, octobre 2024

ENCADREMENT

Stage de découverte de la recherche (dispositif « La Recherche et moi ») – Sophie Agostini, étudiante en 1^{ère} année de cursus ingénieur à AgroParisTech : *Comprendre comment les mélanges d'espèces s'intègrent dans les successions de cultures via l'analyse de données du RPG*, 2022-2023.

Stage de fin d'études (équivalent M2) – Baptiste Coupery, étudiant en 3^{ème} année de cursus ingénieur à AgroParisTech, dans la dominante Produire et innover dans les systèmes techniques végétaux (PISTv) : *La culture des mélanges de variétés de blé en France, étude de l'adoption et de la mise en oeuvre d'une pratique économe en pesticides*, 2023.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	I
REMERCIEMENTS	II
LISTE DE PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS.....	V
ENSEIGNEMENT ET ENCADREMENT.....	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XIII
ACRONYMES.....	XIV
GLOSSAIRE.....	XV
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1 DE LA NÉCESSITÉ DE (RE)DIVERSIFIER LES CULTURES	2
1.1 L'intensification et la spécialisation des systèmes de production.....	2
1.2 Désintensifier, déspecialiser : rediversifier pour la transition agroécologique.....	3
1.3 Des bénéfiques et taux d'adoption variables des pratiques de diversification.....	5
2 UNE VOIE POSSIBLE DE DIVERSIFICATION : LES CULTURES ASSOCIÉES.....	7
2.1 Une pratique consistant à augmenter la diversité intra- et interspécifique au sein des parcelles.....	7
2.2 Les mélanges variétaux.....	8
2.2.1 Une pratique permettant de freiner la propagation des maladies fongiques.....	8
2.2.2 Des mélanges variétaux de plus en plus répandus sur le terrain.....	10
2.3 Les mélanges d'espèces.....	11
2.3.1 Des bénéfiques observés sur de multiples plans.....	11
2.3.2 Freins à l'adoption des mélanges d'espèces	12
2.3.3 Un regain d'intérêt pour les mélanges d'espèces	13
3 LES CULTURES ASSOCIÉES EN CONDITIONS AGRICOLES RÉELLES.....	15
3.1 Un manque de références sur les performances dans les exploitations agricoles	15
3.2 Des motivations diverses correspondant à une diversité d'associations cultivées.....	16
3.3 Adoption et diffusion dans les exploitations agricoles et les territoires.....	17
4 UN CADRE CONCEPTUEL POUR ÉTUDIER LES CULTURES ASSOCIÉES EN CONDITIONS AGRICOLES :	
L'AGRONOMIE DES TERRITOIRES	19
4.1 La prise en compte du territoire dans la recherche agronomique	19
4.2 D'un modèle conceptuel à un cadre intégrateur en agronomie des territoires.....	19
4.3 L'approche mixte en agronomie des territoires	22
PROBLÉMATIQUE ET DÉMARCHE DE RECHERCHE	25
1 PROBLÉMATIQUE	26
2 QUESTIONS DE RECHERCHE ET DÉMARCHE	27
RÉSULTATS	33
CHAPITRE 1 : UTILISATION D'INTRANTS CHIMIQUES ET PERFORMANCES DES CULTURES ASSOCIÉES EN	
CONDITIONS AGRICOLES	34
SOUS-CHAPITRE 1.1 : IMPACTS ET PERFORMANCES DES MÉLANGES DE VARIÉTÉS DE BLÉ EN	
CONDITIONS AGRICOLES	35

1	INTRODUCTION.....	35
2	MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	36
2.1	La base de données du réseau DEPHY FERME.....	36
2.2	Sélection et caractérisation des systèmes de cultures.....	37
2.3	Analyses statistiques par comparaison de paires.....	38
3	RÉSULTATS.....	40
3.1	Utilisation de pesticides.....	41
3.2	Rendements et marges brutes.....	43
4	DISCUSSION.....	45
4.1	Effets des mélanges variétaux de blé sur l'utilisation des pesticides.....	45
4.2	Effets des mélanges variétaux de blé sur les productions.....	47
4.3	Limites de l'étude.....	48
5	CONCLUSION.....	49
SOUS CHAPITRE 1.2 : IMPACTS ET PERFORMANCES DES MÉLANGES D'ESPÈCES EN CONDITIONS		
AGRICOLLES.....		51
1	INTRODUCTION.....	52
2	MATERIAL AND METHODS.....	53
2.1	Data from a demonstration farm network: The DEPHY network.....	53
2.2	Crop species.....	54
2.3	Selection and characterisation of the cropping systems.....	55
2.4	Paired comparison and statistical analysis.....	55
3	RESULTS.....	60
3.1	Variability of intercrop–sole crop combinations.....	60
3.2	Pesticide use.....	61
3.3	Nitrogen fertilisation.....	63
3.4	Gross margin.....	65
4	DISCUSSION.....	68
4.1	Limited number of situations.....	68
4.2	Effects of intercropping on pesticide use.....	68
4.3	Effects of intercropping on mineral nitrogen fertilisation.....	71
4.4	Effects of intercropping on gross margins.....	71
4.5	Limitations of the study and perspectives.....	72
5	CONCLUSION.....	74
CHAPITRE 2 : FACTEURS LIÉS A L'ADOPTION DES MÉLANGES CÉRÉALES–LÉGUMINEUSES DANS LES		
EXPLOITATIONS AGRICOLES FRANÇAISES.....		76
1	INTRODUCTION.....	78
2	MATERIALS AND METHODS.....	81
2.1	Dataset.....	81
2.2	Variable selection: Balanced Random Forest.....	86
2.3	Roles of the features for the adoption of cereal–legume intercrops.....	87
2.4	Local factors.....	88
2.5	Calculations and Statistical Analysis.....	91
3	RESULTS.....	91
3.1	Key variables associated with the presence of cereal–legume intercropping.....	91
3.2	Variables for local adoption of cereal–legume intercropping.....	95
4	DISCUSSION.....	97
4.1	Factors associated with the adoption of cereal–legume intercropping at the national scale.....	97
4.2	Local factors.....	99
4.3	Contributions of the study for the adoption of cereal–legume intercrops.....	101
4.4	Relevance of our method and limits of the study.....	101

5	CONCLUSION AND PERSPECTIVES.....	103
CHAPITRE 3 : TRAJECTOIRES COLLECTIVES ET INDIVIDUELLES D'ADOPTION DES MÉLANGES CÉRÉALES- LÉGUMINEUSES..... 107		
1	INTRODUCTION.....	109
2	MATERIAL AND METHODS.....	111
2.1	Analytical framework.....	111
2.2	Data collection.....	113
2.2.1	Study area and survey sample.....	113
2.2.2	Surveys of other stakeholders outside of the study area.....	116
2.3	Building collective and individual pathways for the adoption of cereal-legume intercropping.....	116
2.3.1	Building the collective pathway.....	116
2.3.2	Farmers' pathways and typology.....	117
3	RESULTS AND DISCUSSION.....	117
3.1	Collective pathway.....	117
3.1.1	Phase 1: Establishment of the group and first considerations on low-input agriculture.....	118
3.1.2	Phase 2: Seeking autonomous and economical systems for both crops and livestock.....	118
3.1.3	Phase 3: Towards pesticide-free systems thanks to redesign.....	119
3.1.4	Phase 4: Intercropping as a base practice.....	119
3.2	Three types of individual pathways.....	120
3.2.1	Type A: Adoption through a collective process.....	122
3.2.2	Type B: Benefiting from a paved way.....	122
3.2.3	Type C: Changing in conventional systems.....	123
3.3	Adopting cereal-legume intercrops to improve the farm autonomy.....	123
3.4	Relying on a group to adopt cereal-legume intercrops and improve their management.....	124
3.5	Cereal-legume intercrops for organic farming.....	124
3.6	Adapting the intercrops to the diversity of use and activities.....	126
4	CONCLUSION.....	129
CHAPITRE 4 : DYNAMIQUES D'INTÉGRATION ET DE DIFFUSION DES MÉLANGES CÉRÉALES- LÉGUMINEUSES DANS LES EXPLOITATIONS ET LES TERRITOIRES..... 131		
1	INTRODUCTION.....	133
2	MATERIAL AND METHODS.....	134
2.1	The French Land Parcel Identification System (LPIS).....	134
2.2	Identification of the study areas.....	135
2.3	Clustering and cropping pattern trends.....	136
2.4	Software and procedures.....	138
3	RESULTS.....	138
3.1	PCA and clustering.....	138
3.1.1	Western area.....	138
3.1.2	Southern area.....	138
3.2	Types of on-farm dynamics and farm characteristics.....	139
3.3	Contribution of the types of on-farm dynamics to the overall local dynamics.....	143
4	DISCUSSION.....	144
4.1	Diversity of on-farm dynamics to test and adopt cereal-legume intercropping.....	144
4.2	Studying on-farm dynamics to understand and support territorial dynamics.....	146
4.3	Limits and perspectives.....	148
5	CONCLUSION.....	149
DISCUSSION GÉNÉRALE..... 151		
1	LES FACTEURS EN JEU DANS LES DYNAMIQUES D'ADOPTION DES CULTURES ASSOCIÉES.....	152
1.1	Les références techniques et économiques sur les cultures associées pour considérer leur adoption.....	152

1.1.1	Les références sur les IFT et les rendements ne sont pas toujours au cœur des processus d'adoption des cultures associées	153
1.1.2	Les agriculteurs et agricultrices produisent leurs propres références au cours de phases de tests 155	
1.2	Les échanges entre pairs et l'accompagnement des agriculteurs et agricultrices.....	158
1.2.1	Favoriser l'adoption en levant les freins techniques et matériels	158
1.2.2	Favoriser l'adoption en levant les freins psychologiques.....	159
1.2.3	Favoriser l'adoption en levant les freins économiques	160
1.3	L'adaptabilité des associations selon l'existence de débouchés et les objectifs et contraintes des agriculteurs et agricultrices.....	160
2	INTÉRÊTS ET LIMITES DE L'APPROCHE MIXTE ET MULTI-ÉCHELLES POUR ÉTUDIER LES DYNAMIQUES D'ADOPTION DES CULTURES ASSOCIÉES	162
2.1	Des apports complémentaires entre bases de données nationales et enquêtes de terrain localisées	162
2.2	Des apports complémentaires entre les échelles système de culture, exploitation agricole et territoire.....	165
2.3	Limites de la démarche et trajectoire de recherche.....	165
3	PERSPECTIVES SUR LES DYNAMIQUES D'ADOPTION D'APRÈS LES RÉSULTATS DE LA THÈSE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHES	168
3.1	Des dynamiques potentielles initiées par une diversité d'acteurs	169
3.1.1	Initiatives des agriculteurs et agricultrices et rôles de services de support.....	169
3.1.2	Rôles des acteurs de l'aval.....	170
3.1.3	Rôles des politiques publiques	170
3.2	La nécessité d'intégrer tous les niveaux pour développer les cultures associées durablement, y compris dans les thématiques de recherche	172
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	175
	RÉFÉRENCES	178
	ANNEXES.....	197
	Annexe 1 : Variables utilisées pour caractériser les systèmes de cultures et pour calculer les distances euclidiennes dans les analyses du Chapitre 1 (Table S1, Yan et al., 2024).....	198
	Annexe 2 : Localisation des paires étudiées pour les mélanges variétaux de blé tendre, dans le sous-chapitre 1.1.....	199
	Annexe 3 : Description des variables et données utilisées dans les analyses du sous-chapitre 1.2 (Table S2, Yan et al., 2024)	200
	Annexe 4 : IFT du blé tendre, de l'orge, du pois et du colza dans le réseau DEPHY dans des fermes de grande culture et polyculture-élevage (Figure S1 ; Yan et al., 2024).....	207
	Annexe 5 : Localisation des paires étudiées pour le blé tendre, l'orge, le pois et le colza dans le sous-chapitre 1.2 (Figure S2, Yan et al., 2024).....	208
	Annexe 6 : Arbre de classification obtenu sur les données à l'échelle nationale après avoir ajouté du bruit sur deux variables aléatoirement choisie pour chaque observation répliquée (Supplementary material 1, Yan et al., 2025).....	209
	Annexe 7 : Arbre de classification obtenu sur les données à l'échelle nationale, en utilisant 36 variables sélectionnées suivant un algorithme de sélection récursive (Supplementary material 2, Yan et al., 2025)	210

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Différentes formes de diversité végétale dans les espaces agricoles.....	4
Figure 2 : Cinq mécanismes permettant de limiter la propagation des pathogènes aériens dans les couverts de mélanges variétaux.....	9
Figure 3 : Part des surfaces de blé tendre cultivées en mélanges variétaux en France de 2015 à 2023	10
Figure 4 : Surfaces des mélanges d'espèces en France de 2015 à 2022.	14
Figure 5 : Typologie de mélanges d'espèces et objectifs associés, des plus fréquemment cités aux moins cités.....	16
Figure 6 : Part de mélanges céréales–légumineuses sur les terres labourables en 2015 et 2022 en France, par département	18
Figure 7 : Modèle conceptuel <i>Agricultural Landscape Dynamics</i> , structurant les interactions entre pratiques agricoles, ressources naturelles et structures paysagères.....	20
Figure 8 : Cadre conceptuel intégrateur mobilisé dans la thèse, avec un accent sur les relations entre le systèmes d'acteurs et le système de ressources matérielles (RM) de l'exploitation	21
Figure 9 : Démarche de recherche de la thèse, basée sur une approche mixte et multi-échelles, et principaux résultats associés	32
Figure 1.1.1 : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires sur le blé tendre d'hiver en variété pure et en mélange variétal.....	42
Figure 1.1.2 : Rendements du blé tendre d'hiver en variété pure et en mélange variétal.....	43
Figure 1.1.3 : Marges brutes du blé tendre d'hiver en variété pure et en mélange variétal.....	44
Figure 1.1.4 : Différence moyenne entre la variété pure et le mélange variétal pour les Indicateurs de Fréquence de Traitements phytosanitaires (Δ IFT), les rendements (Δ Rendement) et les marges brutes (Δ MB), estimée par les tests de rangs signés de Wilcoxon.....	45
Figure 1.1.5 : Rendements et marges brutes pour quatre cultures de blé pur et six cultures de blé en mélange variétal de notre échantillon qui ont pu être suivies dans le temps.....	48
Figure 1.2.1 : Methodology used to test the variability of the datasets when one intercrop (IC) could be paired with several equidistant sole crops (SCs)	57
Figure 1.2.2 : Flowchart of the study methods, from data selection and pairing to statistical analysis ..	59
Figure 1.2.3 : Treatment Frequency Index for wheat, barley, pea and rapeseed sole crops and intercrops	62
Figure 1.2.4 : Amount of mineral nitrogen applied to sole crops and intercrops for wheat, barley, peas and rapeseed	64
Figure 1.2.5 : Gross margin of sole and intercropped wheat, barley, peas and rapeseed. The boxplots are based on the gross margin of each individual in each group	66
Figure 1.2.6 : Average difference between the sole crop and intercrop groups for the Treatment Frequency Indexes (Δ TFI), nitrogen fertilisation (Δ Nfert) and gross margins (Δ GM), estimated by the Wilcoxon signed-rank tests.....	67
Figure 2.1 : Share of cereal–legume intercrops on total departmental arable lands in 2015, 2018, and 2021 in French departments.....	80
Figure 2.2 : National-level balanced random forest variable importance plot	92
Figure 2.3 : Classification tree obtained with the CART algorithm applied at the national level	94
Figure 2.4 : Random forest variable importance plots for the Western, Eastern, and Southern areas. ...	96
Figure 3.1 : Analytical framework, adapted from Moulin et al. (2008), Chantre (2011) and Capillon (1993)	112

Figure 3.2: Location of the interviewees115

Figure 3.3: Collective pathway with four *phases of coherence*.....118

Figure 3.4: Three individual pathways.....121

Figure 3.5: Changes in the composition and use of cereal–legume intercrops along with the farms’ *transformations* for four farmers.....128

Figure 4.1: Indicators used to characterise the on-farm dynamic of adoption of cereal–legume intercrops, adapted from Martin et al. (2017) and Fouillet et al. (2023)137

Figure 4.2: Number of farms in each cluster for each subarea depending on the number of years observed with cereal–legume intercrops between 2015 and 2022, the first year and the last year where cereal–legume intercrops were present on the farm.141

Figure 4.3: Share of cereal–legume intercrops observed the first year and last year in farms of each cluster and regression coefficient of each cluster in each subarea142

Figure 4.4: Number of farms by type of production, in conventional and organic farming in the three types of dynamics, all subareas combined143

Figure 4.5: Total share of arable lands cultivated with cereal–legume intercrops in each subarea for the three types of on-farm dynamics144

LISTE DES TABLEAUX

Table 1.2.1: Number of farm–years with sole crops and intercrops involving wheat, barley, peas or rapeseed	55
Table 2.1: Description of the 42 variables selected from the 2020 French Agricultural Census and the related hypotheses tested in the analysis	83
Table 2.2: Summary of the number of cases (total, Presence, and Absence) at each step of the analysis	87
Table 2.3: Principal agricultural characteristics of the Western, Eastern, and Southern areas compared with the national scale (France).....	90
Table 4.1: Clusters obtained for each subarea with the corresponding number of farms and associated types of dynamics	139

ACRONYMES

CEPP : Certificat d'économie de produits phytopharmaceutiques

CIVAM : Centre d'initiatives pour valoriser l'agriculture et le milieu rural

CUMA : Coopérative d'utilisation de matériel agricole

FAO : Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*)

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (**TFI** pour *Treatment Frequency Index* en anglais)

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

PAC : Politique agricole commune (**CAP** pour *Common agricultural policy* en anglais)

RPG : Registre parcellaire graphique (**LPIS** pour *Land Parcel Identification System* en anglais)

SAU : Superficie agricole utilisée (**UAA** pour *Useable agricultural area* en anglais)

GLOSSAIRE

Assolement : répartition des différentes cultures de l'exploitation pour une année donnée.

Nous traduisons ce terme en ***cropping plan*** en anglais.

Itinéraire technique : « combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée » (Sebillotte, 1974). Nous le traduisons en ***crop management strategy*** en anglais.

Surface agricole utile (SAU) : « notion normalisée dans la statistique agricole européenne. Elle comprend les terres arables (y compris pâturages temporaires, jachères, cultures sous abri, jardins familiaux...), les surfaces toujours en herbe et les cultures permanentes (vignes, vergers...) » (INSEE, 2020). Nous le traduisons en ***Useable agricultural area (UAA)*** en anglais

Système de culture : « ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique. Chaque système se définit par la nature des cultures et leur ordre de succession, les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés » (Sebillotte, 1990). Nous le traduisons en ***cropping system*** en anglais.

Terres labourables : « superficies en céréales, oléagineux, protéagineux (COP), betteraves industrielles, plantes textiles, médicinales et à parfum, pommes de terre, légumes frais et secs de plein champ, cultures fourragères, ainsi que les jachères » (INSEE, 2016). Nous considérons les terres labourables et les terres arables comme synonymes, et traduisons par ***arable lands*** en anglais.

Territoire : zone géographique aux frontières délimitées, organisée et pilotée par les activités de différents groupes d'acteurs locaux. Bien qu'il se traduise en ***landscape*** lorsque l'on parle d' « agronomie des territoires » (*landscape agronomy*), nous privilégions la traduction par le terme ***territory***.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1 De la nécessité de (re)diversifier les cultures

1.1 L'intensification et la spécialisation des systèmes de production

Au cours du XX^{ème} siècle, l'intensification de l'agriculture a permis d'augmenter la production agricole au niveau mondial (Tilman et al., 2002). Pour l'Europe au sortir de la seconde guerre mondiale, la volonté de retrouver son autosuffisance alimentaire est une motivation forte pour aller vers ce modèle agricole, favorisé dès 1957 avec la création de la Communauté économique européenne, suivie en 1962 de la Politique Agricole Commune (PAC), dont l'un des objectifs fondateurs est : « accroître la productivité de l'agriculture en développant le progrès technique et en assurant un emploi optimal des facteurs de production, notamment de la main-d'œuvre ». La PAC met en place des prix garantis sur certains produits (céréales, sucre, produits laitiers, viande bovine), ce qui stimule leur production. Ainsi, les systèmes agricoles se simplifient et se spécialisent vers ces productions favorisées par la PAC, et en résulte au sein des exploitations une réduction de diversité d'espèces animales et végétales.

L'émergence de tels systèmes simplifiés et intensifs a été possible grâce à la deuxième révolution agricole des Temps modernes, caractérisée par la motorisation de l'agriculture, le développement d'intrants chimiques (produits phytosanitaires et engrais minéraux), et la sélection de variétés – ou races pour les animaux – adaptées aux nouveaux modes de production, c'est-à-dire performantes en termes de rendement, et tolérantes aux bioagresseurs (Matson et al., 1997 ; Mazoyer & Roudart, 2002). Cette agriculture dépendante des intrants exogènes a permis d'augmenter les rendements : par exemple, en France, le rendement du blé tendre passe en moyenne de 24 q ha⁻¹ en 1961 à 67 q ha⁻¹ en 1991 (FAO, 2023). Sur cette même période, le rendement de l'orge passe de 24 à 61 q ha⁻¹ et celui du colza de 15 à 32 q ha⁻¹ (FAO, 2023), et ce en partie grâce à l'augmentation de l'utilisation d'engrais azotés minéraux, passant de 624 700 tonnes en 1961 à plus de 2,5 millions de tonnes en 1991 (FAO, 2024).

Avec ces avantages sur les productions, et l'ambition affichée par la PAC d' « assurer un niveau de vie équitable à la population agricole », ce modèle d'agriculture intensive en intrants exogènes et en capital (lié au machinisme notamment) devient la norme. Cependant, dès les années 1960, ce modèle est critiqué car contrairement à ses ambitions, il est créateur d'inégalités dans le monde rural. En effet, « les exploitations les moins bien situées, les moins capitalisées, les moins bien dimensionnées et les moins productives se sont trouvées un jour

ou l'autre dans l'incapacité d'investir suffisamment pour franchir une nouvelle étape de développement » (Mazoyer & Roudart, 2002). Ces exploitations ont donc fini par disparaître, et du fait de la spécialisation régionale des productions, certaines régions désavantagées ont perdu l'intégralité de leurs exploitations (Mazoyer & Roudart, 2002). D'autres critiques viennent aussi de mouvements écologistes, d'agriculteurs et agricultrices, mais aussi de scientifiques qui pointent du doigt la dangerosité de certains produits, à l'instar de Rachel Carson, dont le *Printemps silencieux* (1962) a participé à l'interdiction à partir des années 1970 du DDT, molécule utilisée comme insecticide.

1.2 Désintensifier, déspecialiser : rediversifier pour la transition agroécologique

Depuis, de nombreuses études ont permis d'alerter sur les effets néfastes des intrants chimiques (engrais comme produits phytosanitaires) sur la santé humaine et la qualité des productions (ex : Altieri, 1999 ; Tilman et al., 2002 ; Leenhardt et al., 2022). Celles-ci montrent la nécessité d'une transition vers une agriculture moins dépendante des intrants de synthèse, et favorisant "des écosystèmes sains et une gestion durable de la terre, de l'eau et des ressources naturelles, tout en garantissant une sécurité alimentaire mondiale" (FAO, 2015). Cette transition, dite agroécologique, vise à passer de pratiques agricoles intensives, reposant largement sur des solutions chimiques et technologiques, à des pratiques valorisant les processus écologiques et services écosystémiques (Wezel et al., 2014). En 2012, le ministre de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt Stéphane Le Foll présente le projet agroécologique pour la France. Ce projet souligne l'importance de considérer les exploitations agricoles dans une approche globale, et d'impliquer l'ensemble des acteurs des filières pour « passer de quelques pionniers en agroécologie à la majorité des agriculteurs français engagés » (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2015). Ce projet entend s'appuyer sur plusieurs plans déjà existants, dont le plan Ecophyto, lancé en 2008 sous le nom « Ecophyto 2018 », avec l'objectif de réduire l'utilisation des pesticides de 50% en 10 ans. Depuis, le plan Ecophyto a été révisé plusieurs fois et la dernière stratégie, Ecophyto 2030, présentée en 2024, vise à réduire les pesticides de 50% d'ici 2030 par rapport à la moyenne des années 2011-2013 (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2024a). Dans le cadre du plan Ecophyto comme dans le projet agroécologique pour la France, des

objectifs de soutien à la recherche ont été affichés, afin de trouver des solutions alternatives aux produits phytosanitaires et d'accompagner les changements de systèmes.

Au niveau des systèmes de cultures, la diversification des cultures a été identifiée comme l'un des piliers pour la transition agroécologique (Ratnadass et al., 2012 ; Tilman et al., 2002 ; Wezel et al., 2014). Elle consiste à intégrer une diversité d'espèces et de variétés dans les systèmes agricoles, ceci pouvant être réalisé à différentes échelles, et selon différentes formes (Figure 1). Au niveau spatial, la diversification peut consister à augmenter le nombre de variétés (diversité intraspécifique) et/ou d'espèces (diversité interspécifique) au sein des parcelles avec des mélanges de variétés et d'espèces, de l'agroforesterie, ou encore en introduisant des bandes enherbées et des haies (Figure 1). La diversité intraspécifique comprend aussi l'introduction de variétés anciennes, qui permet d'accroître la diversité cultivée par rapport aux variétés dominantes du marché (Demeulenaere & Bonneuil, 2010). A l'échelle des exploitations et des paysages, la reconfiguration des parcelles peut permettre de créer des mosaïques plus diversifiées (Figure 1). Dans le temps, la diversification consiste à allonger les rotations en y introduisant de nouvelles espèces ; par exemple, des espèces dites « mineures » (Meynard et al., 2018).

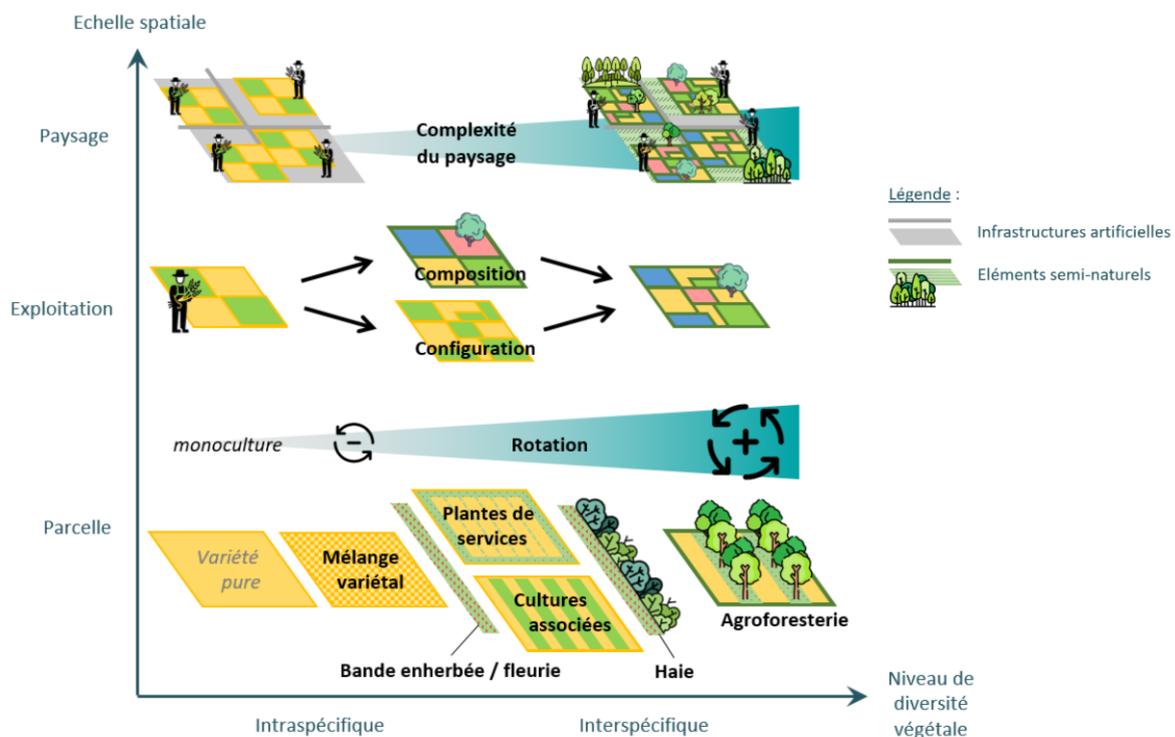


Figure 1 : Différentes formes de diversité végétale dans les espaces agricoles (Tibi et al., 2022).

Pour encourager la diversification des cultures, la PAC intègre à partir de 2014 un volet « diversification des cultures » dans le verdissement des aides directes. Si de telles mesures semblent encourageantes, leurs effets restent limités du fait des conditions de mise en place peu contraignantes. En effet, celles-ci ne concernent que les exploitations avec plus de dix hectares de terres arables, et fixent un minimum de deux ou trois espèces – selon la taille de l'exploitation – différentes dans l'assolement, avec la culture majoritaire n'excédant pas 75% des terres arables (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021). Au moment de la réforme de la PAC de 2014, Allaire et al. (2013) estimaient que 75% des exploitations françaises respectaient déjà ces critères. Finalement, ces mesures portent essentiellement sur la diversification en terme d'assolements, afin de limiter les monocultures, et ne considère pas les rotations, ni la diversification intraparcellaire (Allaire et al., 2013 ; Lécole, 2013). La PAC 2023-2027, visait initialement à renforcer le volet diversification avec les Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales 7 (BCAE 7), en intégrant cette fois un critère annuel, à l'échelle de l'exploitation, exigeant de changer la culture principale d'une année sur l'autre sur au moins 35 % des terres arables cultivées, ainsi qu'un critère pluriannuel, à l'échelle de la parcelle, exigeant au moins deux cultures différentes sur une période de quatre ans (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023). Mais finalement, en avril 2024, ce volet a été assoupli tel que les agriculteurs et agricultrices pourront « respecter leurs obligations au titre de cette BCAE alternativement par des obligations de rotation ou par des obligations de diversification des cultures » (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2024b) – et toujours aucune mesure ne concerne la diversification intraparcellaire.

1.3 Des bénéfices et taux d'adoption variables des pratiques de diversification

Comme mentionné dans la section précédente, la diversification des cultures présente de nombreux avantages, qui en font un front de recherche majeur aujourd'hui pour parvenir à une agriculture sans pesticide (Jacquet et al., 2022). De manière générale, la diversité des espèces cultivées, en favorisant la biodiversité associée permet d'assurer un certain nombre de services écosystémiques relatifs à la qualité des sols et de l'eau, au bouclage des cycles des nutriments, à la gestion des maladies et ravageurs (Altieri, 1999 ; Swinton et al., 2007). Toutefois, la littérature scientifique montre des effets variables des différentes pratiques de diversification : par exemple, l'agroforesterie et les mélanges d'espèces seraient

particulièrement bénéfiques pour le contrôle des maladies et ravageurs et la qualité des sols alors que les mélanges variétaux et les mesures portant sur la rotation ont des effets plus limités sur les sols (Beillouin et al., 2021). En 2022, INRAE présente les résultats de son Expertise Scientifique Collective (ESCo) sur la diversité végétale, qui vise à rendre compte de la diversité des pratiques de diversification et d'apporter un « recul critique et une vision d'ensemble sur l'efficacité « au champ » de ce levier pour protéger les cultures » (Tibi et al., 2022). L'ESCo souligne un consensus de la littérature quant à la régulation des adventices, insectes et autres pathogènes aériens et du sol par les cultures associées. D'après cette ESCo, il existe également un consensus sur la régulation des insectes aériens, maladies vectorielles et autres pathogènes aériens et du sol par les mélanges variétaux. Plus largement, des rotations plus diversifiées ont des effets positifs sur la régulation des bioagresseurs (Tibi et al., 2023).

Malgré ces avantages, les pratiques de diversification présentent des taux d'adoption variables dans les exploitations agricoles françaises, car ces pratiques doivent faire face à de nombreux freins et verrous socio-techniques du fait de l'organisation des filières autour de quelques cultures dites « majeures » (Meynard et al., 2018). Par exemple, en amont, les investissements dans la sélection variétale et la distribution des semences concernent surtout les cultures majeures car plus rentables, ce qui limite le développement des cultures mineures telles que les légumineuses (Magrini et al., 2016). De même à l'aval, il serait beaucoup plus coûteux d'organiser la collecte et le stockage de faibles volumes de cultures mineures, alors même que les organismes de collecte et de stockage font des économies d'échelle en traitant de gros volumes de quelques espèces sur lesquelles les processus de transformation ont été standardisés (Magrini et al., 2016 ; Morel et al., 2020). Ainsi, puisque le système est dominé par ces espèces majeures et que les espèces mineures ont du mal à se faire une place, un autre frein est lié au manque de connaissances, références techniques et économiques sur les cultures de diversification (Mawois et al., 2019).

Dans la suite, nous verrons que certains verrous ont été levés ces dernières années, ce qui a favorisé l'adoption des pratiques concernées.

2 Une voie possible de diversification : les cultures associées

2.1 Une pratique consistant à augmenter la diversité intra- et interspécifique au sein des parcelles

Dans cette thèse, nous englobons sous l'expression « cultures associées » d'une part les **mélanges de variétés** (associations intraspécifiques), qui consistent à mélanger plusieurs variétés d'une même espèce sur une parcelle pendant une période significative de leur croissance, et d'autre part, les **mélanges d'espèces** (associations interspécifiques), qui consistent à mélanger plusieurs espèces sur une parcelle pendant une période significative de leur croissance. Dans ce second cas, plusieurs variétés des mêmes espèces peuvent être contenues dans le mélange. Pour la thèse, nous considérons les associations de grandes cultures et les associations fourragères, dont nous donnons quelques exemples dans le paragraphe suivant.

En mélange de variétés, les variétés peuvent être semées en bandes distinctes, ou mélangées sur la parcelle, sans configuration spatiale particulière. De même, pour les mélanges d'espèces, celles-ci peuvent être semées sur des rangs différents ou mélangées sur la parcelle. Historiquement, des mélanges d'espèces semés en bandes prenaient le nom d'*intercrops* en anglais, et les autres étaient plutôt désignés comme *crop mixtures* ou *species mixtures*. Toutefois, les usages ont évolué, et les mélanges d'espèces, quelle que soit leur configuration spatiale dans le champ, sont communément appelés *intercrops* en anglais. Willey (1979) définit la pratique *intercropping* comme consistant à cultiver deux espèces ou plus simultanément sur une même parcelle. Enfin, au sein des mélanges d'espèces, plusieurs cas existent :

- les mélanges dans lesquels toutes les espèces sont récoltées, comme par exemple des mélanges binaires blé–féverole, dont les graines vont être récoltées, ou des mélanges plus complexes de type orge–avoine–vesce–pois, qui peuvent être récoltés en grain ou en vert pour l'alimentation animale ;
- les mélanges dans lesquels une ou plusieurs espèces est/sont récoltée(s) et d'autres pas, comme par exemple dans le cas des associations d'une culture dite « principale » (ex : le colza) avec une plante de service ou plante compagne (ex : la féverole) ;
- les mélanges sous forme de couverts végétaux, qui pourront être récoltés (pour du fourrage par exemple) ou fauchés, et qui contiendront souvent des légumineuses

mélangées avec des espèces d'autres familles, par exemple : moutarde blanche–phacélie–niger–vesce commune–lentille noirâtre (Labreuche, 2012).

Les mélanges d'espèces peuvent aussi se différencier selon les dates de semis et de récoltes. Dans les configurations en bandes, il est possible de semer et récolter les différentes espèces à des dates différentes, alors que dans les configurations mélangées, les semis et récoltes seront plutôt simultanés pour les différentes espèces.

Ici, nous avons présenté des exemples de mélanges d'espèces annuels, mais les mélanges d'espèces peuvent aussi être pluriannuels. C'est par exemple le cas des prairies, ou encore de l'agroforesterie, que nous n'étudierons pas dans la suite.

2.2 Les mélanges variétaux

2.2.1 Une pratique permettant de freiner la propagation des maladies fongiques

En mélangeant des variétés sensibles à certaines maladies – mais avantageuses pour leur potentiel de rendement par exemple – avec d'autres résistantes, il est possible de créer des effets de dilution ou de barrière limitant leur propagation (Borg et al., 2018). Les différentes architectures des plantes peuvent aussi agir comme des barrières contre les pathogènes (Vidal et al., 2017). Le fait d'augmenter la diversité génétique cultivée permet d'augmenter la diversité des pathogènes, avec des spores virulentes et non-virulentes dans le couvert, créant ainsi de la résistance induite : les spores non-virulentes déclenchent des mécanismes de défense des plantes, qui seront ensuite plus à même de se défendre contre les spores virulentes (aussi appelé « effet de prémunition », Figure 2). De même, avec une diversité de pathogènes plus grande, les pressions de sélection sur les pathogènes sont plus fortes, et les pathogènes s'adaptent donc moins vite, ce qui limite les infections (« sélection disruptive », Figure 2). Enfin, on peut observer des effets de compensation (Figure 2), avec les variétés résistantes qui utiliseront mieux les ressources que les variétés sensibles et se développeront mieux. Sur les insectes, les différentes variétés peuvent également agir comme des barrières physiques, rendant difficile la détection des plantes hôtes par les insectes, ou encore en favorisant la diversité des ennemis naturels (Snyder et al., 2020).

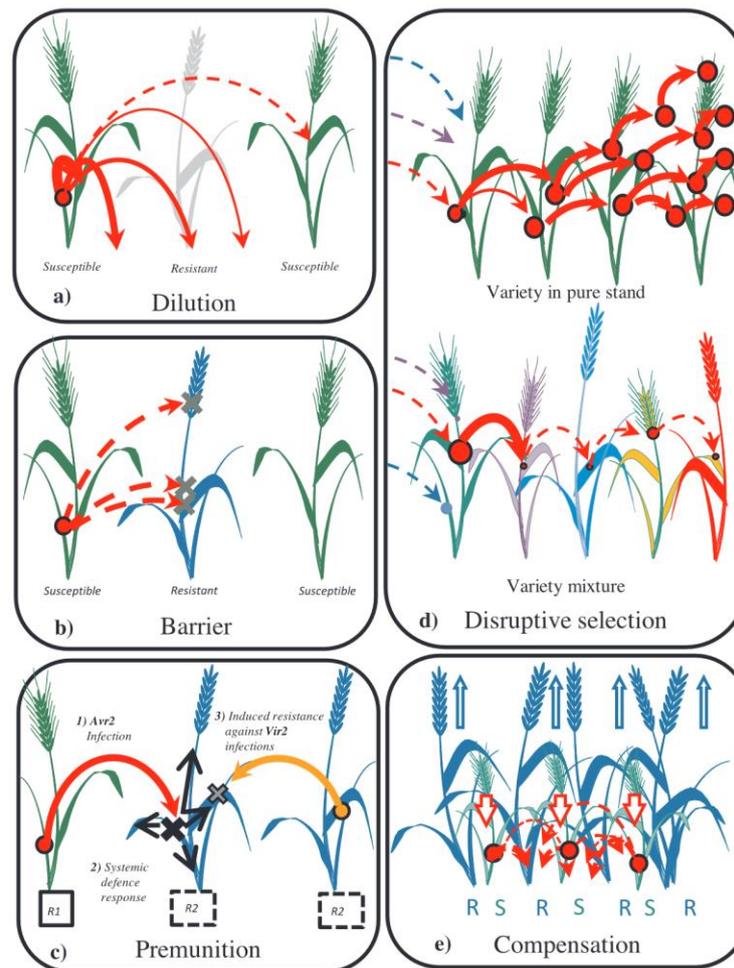


Figure 2 : Cinq mécanismes permettant de limiter la propagation des pathogènes aériens dans les couverts de mélanges variétaux : a) effet de dilution, b) effet barrière, c) effet de prémunition ou résistance induite, d) sélection disruptive, e) effet de compensation (Borg et al., 2018).

Grâce à tous ces mécanismes, les mélanges variétaux permettent de freiner la propagation des maladies fongiques (Finckh et al., 2000 ; Vidal et al., 2014 ; Borg et al., 2018) et les dégâts causés par des insectes ravageurs (Snyder et al., 2020). Ainsi, les rendements obtenus par des mélanges variétaux ont tendance à être plus stables d'une année sur l'autre voire supérieurs en comparaison aux cultures de variétés pures (Barot et al., 2017 ; Enjalbert et al., 2019). Toutefois, l'efficacité des mélanges variétaux pour la régulation des bioagresseurs est nuancée, celle-ci pouvant être influencée par le choix des variétés comme montré par l'étude de Montazeaud et al. (2022), pointant un niveau de septoriose plus élevé sur des mélanges de variétés de blé dur présentant une diversité allélique pour un locus identifié.

Sur le plan technique, les mélanges variétaux présentent tout de même l'avantage de simplifier les opérations culturales. Par exemple, au lieu de semer quatre variétés différentes sur une exploitation, et ainsi faire un semis spécifique pour chaque variété, il est possible de

semier un mélange de quatre variétés sur toutes les parcelles. Cela permet alors de faciliter la surveillance des parcelles (Enjalbert et al., 2019).

2.2.2 Des mélanges variétaux de plus en plus répandus sur le terrain

Avant 2018, les surfaces cultivées en mélanges variétaux étaient limitées en France, concernant 4,8% des superficies de blé tendre en 2017 (Figure 3). En effet, jusqu'alors, les entreprises de collecte et stockage n'acceptaient pas toujours de collecter des mélanges variétaux, considérés comme incompatibles avec les standards industriels de la meunerie (Labarthe et al., 2018). Cependant, en 2018, un arrêté législatif autorise la commercialisation de mélanges de variétés certifiées, lorsque les variétés composant le mélange sont elles-mêmes certifiées (Arrêté du 26 juin 2018 modifiant l'arrêté du 15 septembre 1982 relatif à la commercialisation des semences de céréales). Certains négoce et coopératives commercialisent désormais des mélanges de variétés de blé « prêts à l'emploi », dont les récoltes serviront dans leurs filières meunières. Depuis, on observe une forte augmentation des surfaces, avec 19,5% (923 000 ha) des surfaces emblavées cultivées en mélanges en 2023, et depuis 2021, les mélanges variétaux de blé sont la première « variété » cultivée (Arvalis, 2022a).

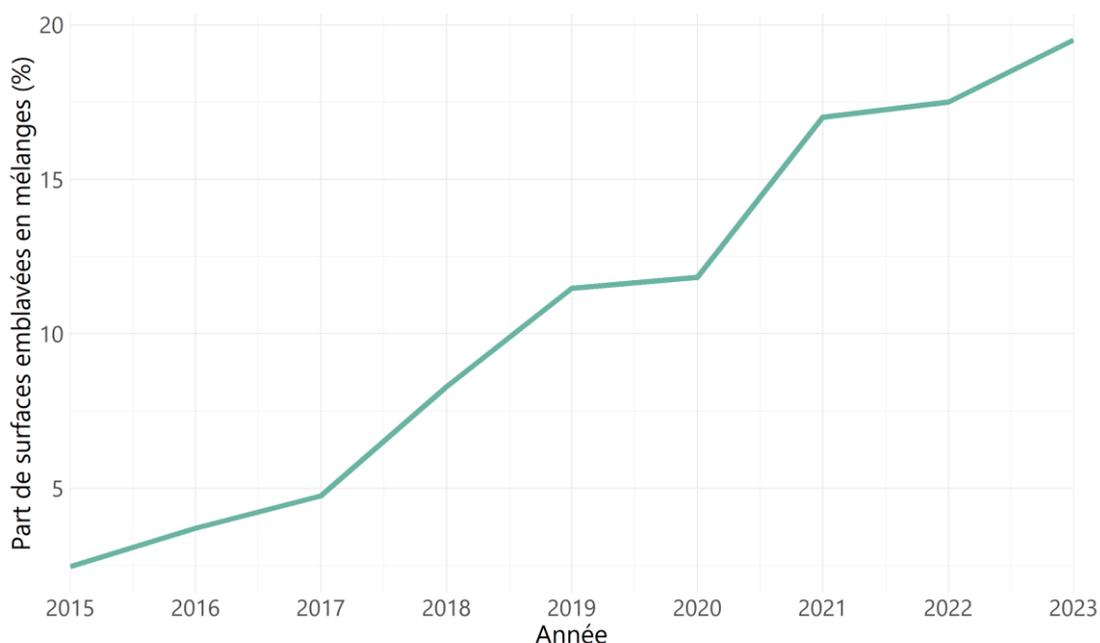


Figure 3 : Part des surfaces de blé tendre cultivées en mélanges variétaux en France de 2015 à 2023. Sources de données : Enquêtes variétés FranceAgriMer 2015-2020, Enquêtes variétés Arvalis 2021-2023.

Pour d'autres espèces, on observe également une augmentation, sans que les mélanges ne deviennent la « variété » majoritaire. Par exemple, l'orge est passée de 5,0% de surfaces cultivées en mélanges variétaux en 2022 à 5,8% en 2023 (Arvalis, 2022b, 2023). Pour cette espèce en particulier, des freins liés à la filière brasserie – du même ordre donc que les freins rencontrés pour le blé, concernant la filière meunière – restent encore à lever pour que la pratique soit plus répandue (Labarthe et al., 2018).

Aujourd'hui l'une des difficultés majeures pour la culture des mélanges variétaux concerne les règles d'assemblages : quelles variétés assembler et selon quels raisonnements ? Pour pouvoir construire de telles règles, les recherches s'orientent notamment vers l'identification de traits et de combinaisons de traits pour des services spécifiques et l'étude des interactions plante-plante, via des expérimentations au champ et/ou de la modélisation (ex : Dubs et al., 2023 ; Gawinowski, 2023). Aussi, puisque les mélanges variétaux sont de plus en plus adoptés sur le terrain, il est important de travailler en collaboration avec les agriculteurs et agricultrices, pour construire ces règles d'association en cohérence avec leurs contraintes environnementales, techniques, et leurs objectifs (Borg et al., 2018).

2.3 Les mélanges d'espèces

2.3.1 Des bénéfices observés sur de multiples plans

Tout comme pour les mélanges de variétés, la diversité apportée dans la parcelle par les mélanges d'espèces permettent une régulation naturelle des bioagresseurs. Par exemple, des plantes compagnes peuvent être utilisées pour éloigner certains insectes ravageurs de la culture principale (Gardarin et al., 2022) ; dans les mélanges où toutes les espèces sont récoltées, les différences morphologiques et physiologiques entre les espèces composant le mélange peuvent créer des effets barrières et ainsi réguler les bioagresseurs (Finckh et al., 2000 ; Boudreau, 2013). Les mélanges d'espèces peuvent aussi s'avérer compétitifs contre les adventices (Corre-Hellou et al., 2011), permettre d'améliorer la qualité des sols, de l'eau, et être bénéfiques pour la biodiversité associée (Beillouin et al., 2021), tout en permettant de stabiliser les rendements (Jensen et al., 2020). La complémentarité entre les espèces permet une utilisation efficace des ressources, ce qui peut par exemple conférer aux céréales une plus forte concentration en protéines dans le cas des associations céréales-légumineuses (Bedoussac et al., 2015; Li et al., 2023). Les associations contenant des légumineuses sont d'ailleurs

particulièrement étudiées car elles permettent de fournir l'ensemble des services décrits (Tang et al., 2024). Finalement, tous ces bénéfices font des mélanges d'espèces une pratique particulièrement pertinente pour accroître la capacité d'adaptation des fermes face au changement climatique (Himanen et al., 2016).

2.3.2 Freins à l'adoption des mélanges d'espèces

Si la littérature scientifique souligne les nombreux avantages des mélanges d'espèces, leur adoption en France reste limitée. Les freins à l'adoption des mélanges d'espèces sont de plusieurs natures : techniques, économiques, organisationnels, et cognitifs.

D'un point de vue technique, les agriculteurs et agricultrices peuvent rencontrer des difficultés du semis à la récolte. Au niveau des semis, il peut s'avérer difficile de choisir les espèces à associer, ainsi que les densités auxquelles les semer (Bybee-Finley & Ryan, 2018). Pour ne pas compliquer l'organisation des chantiers, il peut être nécessaire de coordonner les dates de semis et de récolte (Mamine & Farès, 2020) et choisir des espèces qui peuvent être semées aux mêmes profondeurs pour ne pas multiplier les passages. Sur les bioagresseurs, bien que divers mécanismes de régulation par les mélanges aient déjà été évoqués, il peut arriver que tous les problèmes ne soient pas résolus. Selon les configurations spatiales des mélanges, le désherbage mécanique n'est pas toujours possible, et le désherbage chimique en agriculture conventionnelle est soumis à la condition d'avoir un produit homologué sur le mélange et sélectif de chacune des espèces du mélange. A titre d'exemple, pour un mélange de blé-pois protéagineux, l'outil de recherche du catalogue de produits phytosanitaires E-phy (<https://ephy.anses.fr/>), indique que cinq herbicides sont homologués sur les deux cultures¹. Au moment de la récolte, les réglages de la moissonneuse-batteuse sont aussi importants, et il n'est pas simple de trouver le bon compromis pour réussir à battre les céréales sans casser les légumineuses (Timaeus et al., 2022). Selon les usages souhaités, il peut être nécessaire de séparer les espèces de l'association après la récolte, ce qui implique d'avoir accès à un trieur.

Sur le plan économique, le principal frein est celui des débouchés. Actuellement, il semblerait que la plupart des coopératives biologiques collectent des mélanges binaires (composés de deux espèces) dont les graines sont de tailles très différentes, comme le blé et

¹ BAROUD SC, PROWL 400, PENDITEC 400, PENTIUM FLO, avec la pendiméthaline comme substance active, et CENT 7, avec l'isoxabène comme substance active.

la féverole. Ces restrictions qui facilitent le tri au sein des coopératives limitent les choix d'espèces à inclure dans les mélanges. En agriculture conventionnelle, nous n'avons aujourd'hui connaissance que d'un négoce qui a commencé à expérimenter des mélanges blé-pois, pour développer une filière pois destinée à l'alimentation humaine (Agrodistribution, 2023). Autrement, les mélanges collectés par les coopératives et négoce – en agriculture biologique, donc – sont principalement destinés à l'alimentation animale, les brisures de légumineuses dans les blés étant perçues comme incompatibles avec la filière meunière industrielle.

En lien avec les freins techniques et économiques, les agriculteurs et agricultrices peuvent faire face à des freins cognitifs et comportementaux, du fait de leur perception propre de la pratique et des changements et risques – techniques, économiques notamment – qu'elle provoque sur les systèmes (Lemken et al., 2017 ; Bonke & Musshoff, 2020 ; Bonke et al., 2021).

2.3.3 Un regain d'intérêt pour les mélanges d'espèces

Les mélanges d'espèces sont une pratique ancienne, restée très répandue dans certaines régions du monde, comme en Mésoamérique, avec le traditionnel milpa, un mélange de courges, haricots et maïs (Fonteyne et al., 2023) ou encore en Afrique subsaharienne avec des mélanges de maïs et légumineuses (Li et al., 2023). En Amérique du Nord et en Europe, avec l'intensification des systèmes, la pratique a progressivement disparu des champs à la fois agricoles et de recherches. C'est dans les années 1970 que des scientifiques ont à nouveau étudié les mélanges d'espèces comme pratique alternative à l'agriculture intensive (Harwood, 2024). Plus récemment, dans une revue bibliographique, Tang et al. (2024) ont identifié 7574 articles traitant des mélanges d'espèces, publiés entre 1995 et 2021, dont 2930 sur la seule période 2017-2021 (taux de croissance de 18,22% contre 0,41% entre 1995 et 2007). D'après cette étude, les recherches sur les mélanges d'espèces portent en majorité sur les rendements et les interactions plante-plante, et les recherches à venir devraient continuer en ce sens, en considérant les mélanges d'espèces comme une pratique durable et résiliente face au changement climatique. Les liens entre les mélanges et les communautés microbiennes, la biodiversité, et la fertilité des sols sont aussi susceptibles d'être des orientations clés dans les recherches futures sur les mélanges d'espèces (Tang et al., 2024). Brooker et al. (2015) soulignent l'importance de la complémentarité entre les disciplines, y compris entre

agronomie, écologie et sciences sociales pour que « le potentiel des cultures associées en tant que système agricole durable puisse être pleinement exploité ».

Sur le terrain, les surfaces cultivées avec des mélanges d'espèces ont doublé entre 2015 et 2021 (Figure 4). Toutefois, les surfaces restent limitées : en 2022, les mélanges d'espèces tous types confondus représentent seulement 3,2% des terres labourables en France et les mélanges céréales–légumineuses (hors prairies), qui sont pourtant les plus mis en avant dans la littérature scientifique (Tang et al., 2024), ne représentent que 1% des terres labourables (IGN, 2023). Sur la Figure 4, nous remarquons que les surfaces de « mélange de légumineuses fourragères prépondérantes et d'herbacées, de graminées, de céréales ou d'oléagineux » ont presque doublé de 2015 à 2017. Ceci peut être lié à un changement dans les codes de déclaration : en 2015 et 2016, d'après la codification, seuls les mélanges de légumineuses fourragères implantées pour des récoltes en 2015 et/ou 2016 étaient déclarés, sous les codes MH5 et MH6 . A partir de 2017, tous les mélanges de légumineuses fourragères sont déclarés, indépendamment des années de récolte, sous le code MLG.

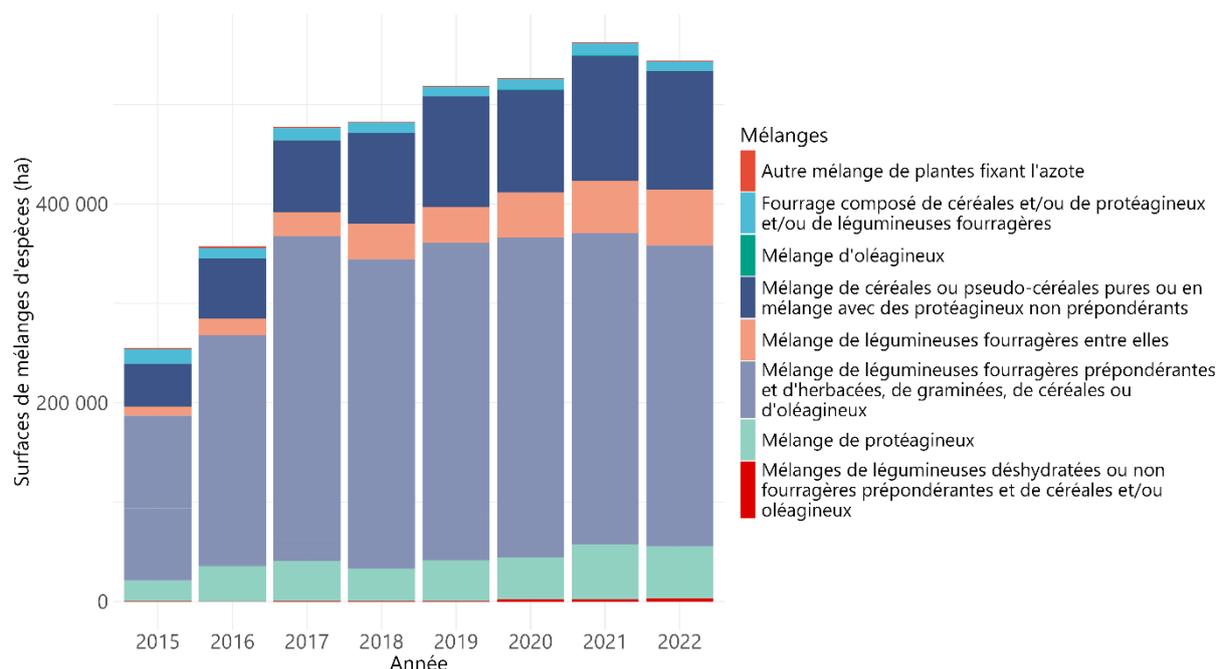


Figure 4 : Surfaces des mélanges d'espèces en France de 2015 à 2022. Les mélanges céréales–légumineuses hors mélanges prairiaux sont compris dans les catégories « Mélange de céréales ou pseudo-céréales pures ou en mélange avec des protéagineux non prépondérants » et « Mélanges protéagineux ». Sources de données : Registres parcellaires graphiques 2015-2022.

3 Les cultures associées en conditions agricoles réelles

3.1 Un manque de références sur les performances dans les exploitations agricoles

Comme nous l'avons déjà évoqué dans les parties précédentes, le manque de références techniques constitue un frein majeur pour l'adoption des cultures associées. Des projets de recherche ont cherché à lever ce frein, comme le projet ANR Wheatamix (2014-2017), qui a produit un outil d'aide à la décision pour l'assemblage de variétés de blé à cultiver en mélange (<http://moulon.inra.fr/optimix/>), ou le projet ReMIX (2017-2021), qui a produit des références techniques sur 52 mélanges cultivés à travers 10 pays d'Europe, et d'après des expériences d'agriculteurs et agricultrices. Dans ces deux cas, des suivis de mélanges dans des exploitations agricoles ont permis d'enrichir les références sur les itinéraires techniques, allant des choix de variétés et d'espèces, aux modalités de récolte, voire de tri pour les mélanges d'espèces. Ces deux projets ont aussi réalisé des études sur les performances productives, en quantifiant les différences entre les rendements des mélanges variétaux et les moyennes des variétés pures les composant (Enjalbert et al., 2019), ou via une étude de faisabilité de récolte et de tri pour les mélanges d'espèces (Bedoussac et al., 2021). En revanche, sur les performances environnementales, et notamment les relations entre cultures associées et utilisation d'intrants de synthèse, nous manquons encore de références mesurées dans des conditions agricoles réelles, alors que les cultures associées sont présentées comme un levier majeur pour réduire l'utilisation des intrants de synthèse dans les systèmes de cultures. En fait, ces arguments reposent surtout sur des recherches expérimentales démontrant la capacité des cultures associées à réguler les bioagresseurs, et les réductions potentielles d'intrants dans les exploitations agricoles restent encore à quantifier. Des études ont permis de quantifier l'utilisation de produits phytosanitaires et/ou d'engrais azotés dans des systèmes de cultures diversifiés (Bonnet et al., 2021 ; Alletto et al., 2022 ; Guinet et al., 2023), mais à notre connaissance, les effets isolés des cultures associées n'ont pas été spécifiquement mesurés.

Sur les études menées en conditions agricoles réelles, nous observons que les mélanges d'espèces ont surtout été décrits dans des contextes d'agriculture biologique. Par exemple, dans le projet ReMIX, 25 des 26 mélanges d'espèces étudiés en France étaient conduits en agriculture biologique ; dans une étude qualitative, Timaeus et al. (2022) ont réalisé une enquête dans neuf fermes, dont huit en agriculture biologique. Ceci explique en partie le

manque de références sur l'utilisation d'intrants chimiques, tout en appuyant leur nécessité afin que les cultures associées soient également considérées dans les systèmes conventionnels.

3.2 Des motivations diverses correspondant à une diversité d'associations cultivées

Des recherches portant sur des cas d'études ont permis de mieux comprendre les motivations poussant les agriculteurs et agricultrices à adopter les cultures associées. D'après Enjalbert et al. (2019), les mélanges variétaux sont surtout cultivés pour stabiliser les rendements d'une année sur l'autre, réduire les intrants de synthèse et simplifier les opérations culturales. Pour les mélanges d'espèces, à partir d'une traque aux innovations, Verret et al. (2020) ont dressé une typologie de mélanges incluant des légumineuses, et ont pu y associer une diversité d'objectifs selon les types de mélanges (Figure 5). Les études portant sur les motivations permettent de faire des hypothèses sur les contextes dans lesquels les cultures associées sont plus susceptibles d'être adoptées – agriculture biologique et élevage notamment (Casagrande et al., 2017 ; Himanen et al., 2016 ; Verret et al., 2020) – mais ne sont pas suffisantes pour comprendre comment les cultures associées sont intégrées dans les exploitations, ni les changements que cela implique. Pourtant, ces aspects sont utiles pour comprendre comment certains freins ont pu être levés, et donner des clés pour identifier des contextes pertinents pour l'adoption des cultures associées (Mawois et al., 2019).

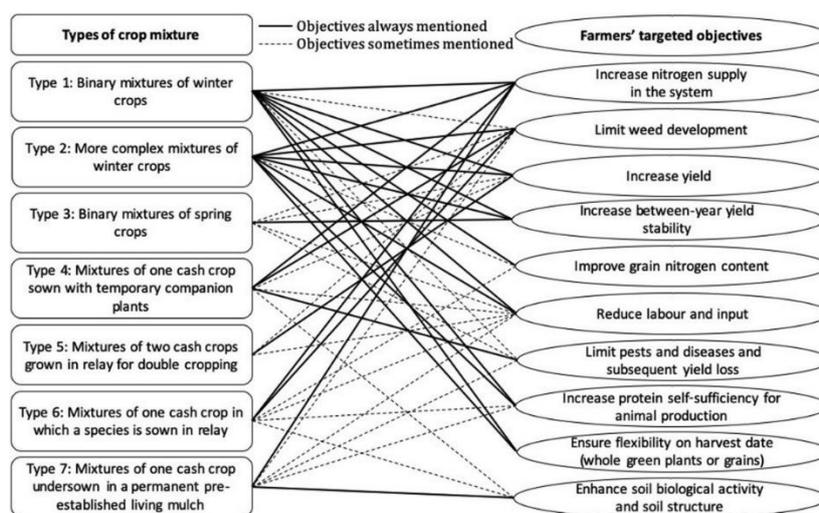


Figure 5 : Typologie de mélanges d'espèces et objectifs associés, des plus fréquemment cités (haut) aux moins cités (bas). Pour un type donné de mélange, les objectifs systématiquement mentionnés sont reliés par une ligne continue, et les objectifs parfois mentionnés sont reliés par une ligne en pointillés (Verret et al., 2020).

Les changements de pratiques au cours du temps peuvent être analysés en étudiant des trajectoires, que l'on peut définir par « des étapes temporelles comprenant des phases successives délimitées par des événements spécifiques, des décisions ou des changements concernant les dimensions techniques et gestionnaires, la commercialisation, les processus d'apprentissage et les interactions avec divers réseaux » (Lamine, 2011). Des trajectoires de changements de pratiques ont été étudiées à l'échelle des exploitations pour décrire leurs transitions vers des systèmes bas intrants ou biologiques (Lamine, 2011 ; Chantre et al., 2015), ou pour l'adoption de nouvelles pratiques ou cultures (Mawois et al., 2019; Revoyron et al., 2022). Moulin et al. (2008) ont étudié des trajectoires sur un ensemble d'exploitations pour analyser les transformations de l'élevage ovin au sein d'un territoire, soulignant l'importance de replacer les individus dans un groupe – ou un « réseau de relations » –, celui-ci ayant bien souvent une influence sur la manière dont l'individu peut percevoir les choses. Ceci semble d'autant plus pertinent dans le cadre d'une étude sur les trajectoires d'adoption de pratiques, puisque les interactions entre pairs et l'existence de réseaux facilitent la diffusion puis l'adoption de pratiques (Chantre & Cardona, 2014; David et al., 2022), et ce y compris dans le cas des cultures associées (Himanen et al., 2016; Ha et al., 2023).

3.3 Adoption et diffusion dans les exploitations agricoles et les territoires

Les recherches sur l'adoption des cultures associées sont majoritairement orientées vers l'identification de leviers pour les favoriser (ex : Lemken et al., 2017 ; Bonke & Musshoff, 2020 ; Fares & Mamine, 2023). De 2015 à 2021, les surfaces cultivées en mélanges d'espèces ont augmenté, mais semblent actuellement atteindre un plateau, voire ont légèrement diminué entre 2021 et 2022 (Figure 4), alors que leur surface totale, rapportée aux terres labourables reste faible. Au niveau territorial, sur cette même période, les mélanges céréales-légumineuses semblent se diffuser à partir de « points chauds » au cours du temps (Figure 6). Ces observations posent des questions sur les dynamiques de diffusion observées jusqu'ici, et les dynamiques de diffusion que l'on pourrait espérer : pourquoi les surfaces stagnent-elles après avoir doublé en quelques années ?

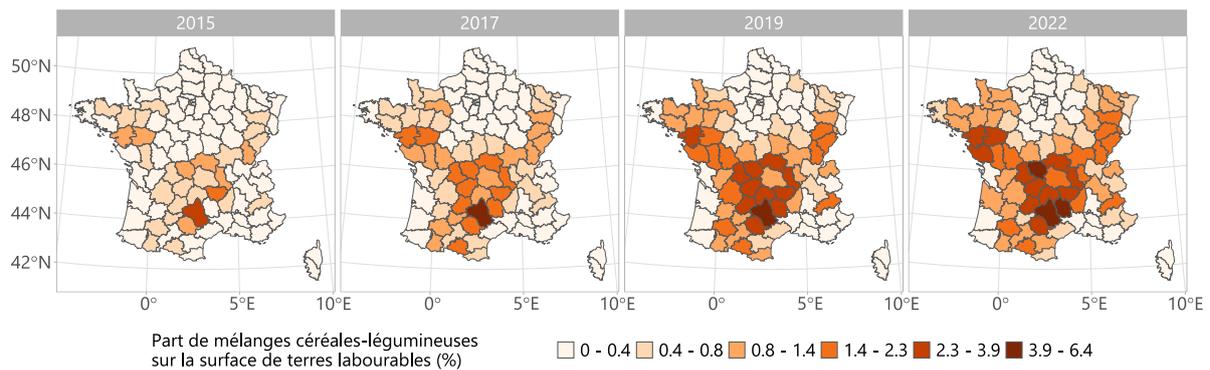


Figure 6 : Part de mélanges céréales-légumineuses sur les terres labourables en 2015 et 2022 en France, par département. Sources de données : Registres parcellaires graphiques 2015, 2017, 2019, 2022.

L'étude de trajectoires d'adoption des mélanges peut permettre de mieux comprendre pourquoi et comment les agriculteurs et agricultrices ont intégré les mélanges dans leurs exploitations, et quels ont été les impacts de cette intégration sur leur fonctionnement global. Au niveau territorial, les trajectoires peuvent aider à identifier les « bonnes conditions » pour l'adoption d'une pratique. Cependant, les trajectoires reposent souvent sur un nombre limité d'entretiens individuels et seules, elles ne sauraient expliquer les modes d'intégration des cultures associées dans les assolements, pourtant responsables de dynamiques observées à l'échelle de départements (Figure 6).

D'une ferme à une autre, les modalités d'intégration d'une nouvelle culture dans un assolement peuvent varier car les agriculteurs et agricultrices opèrent des choix stratégiques selon leurs ressources, les caractéristiques de leurs fermes et leurs objectifs de production (Schaller et al., 2012; Dury et al., 2013). Ces décisions prises à l'échelle des fermes se traduisent à l'échelle des territoires sur les mosaïques paysagères (Thenail & Baudry, 2004). L'étude des dynamiques d'assolements dans les fermes peut ainsi aider à comprendre comment les différentes stratégies contribuent aux dynamiques observées à l'échelle des territoires (Chopin et al., 2015). En prenant en compte les caractéristiques des fermes et des territoires dans ce type d'étude, il est aussi possible d'identifier des stratégies et conditions clés à mettre en œuvre pour une diffusion plus large de la pratique (Marsh et al., 2000a).

4 Un cadre conceptuel pour étudier les cultures associées en conditions agricoles : l'agronomie des territoires

4.1 La prise en compte du territoire dans la recherche agronomique

Si l'agriculture est profondément liée au territoire, de par les paysages qu'elle façonne, les ressources qu'elle utilise, ou les personnes qu'elle implique, la recherche agronomique a pendant des décennies perdu le lien avec la notion de territoires. Pour Boiffin (2004), cela s'explique par (i) la volonté que l'agronomie ne soit pas qualifiée de « science de localité », mais au contraire, produise des résultats génériques, peu importe les régions d'études, (ii) le manque de recherches conduites conjointement avec les disciplines de la géographie et de l'écologie, et (iii) le contexte d'agriculture productiviste qui a « lissé » toute l'hétérogénéité des entités spatiales et processus associés. En 2002, lors du colloque « Agronomes et territoires » des entretiens du Pradel est soulevée l'importance de travailler en intégrant le territoire, et de collaborer, en ce sens, avec d'autres disciplines, comme l'écologie et la géographie. En 2005, Caron considère le territoire comme un « cadre d'action individuelle, collective et publique, et d'adaptation des acteurs aux évolutions de leur environnement » (Caron, 2005), auquel l'agronomie, en tant que science intégratrice, se doit de s'intéresser.

Ainsi, l'agronomie des territoires est une discipline qui s'inscrit dans une certaine continuité avec la géo-agronomie de Deffontaines, s'intéressant « aux objets géographiques – tels que les structures et les dynamiques spatiales des phénomènes et des activités, le paysage, ... – auxquels sont appliquées et ajustées les analyses et la théorie de l'agronomie, notamment de l'agronomie des façons de produire qui relie le climat, le sol, les plantes et les techniques » (Deffontaines, 2006, cité par Lardon et al., 2012).

4.2 D'un modèle conceptuel à un cadre intégrateur en agronomie des territoires

Afin de réintégrer le territoire dans les recherches agronomiques, Benoît et al. (2012) ont formalisé un modèle conceptuel (ALaDyn, pour *Agricultural Landscape Dynamics*, Figure 7), définissant ainsi l'agronomie des territoires comme une approche de la discipline visant à étudier les interactions entre les **pratiques agricoles** (*farming practices*), les **ressources naturelles** (*natural resources*) et les **structures paysagères** (*landscape patterns*), pour notamment optimiser la production agricole dans une démarche environnementalement durable. L'accent est mis sur, d'une part, la perception des ressources et structures paysagères

par les agriculteurs et agricultrices qui conditionne leurs pratiques, et d'autre part, les réponses du paysage à ces pratiques agricoles. Ainsi présentée, **cette approche ne tient pas compte des acteurs autres que les agriculteurs et agricultrices, et notamment les entreprises de collecte et de stockage qui structurent les paysages** (Le Bail & Le Gal, 2011).

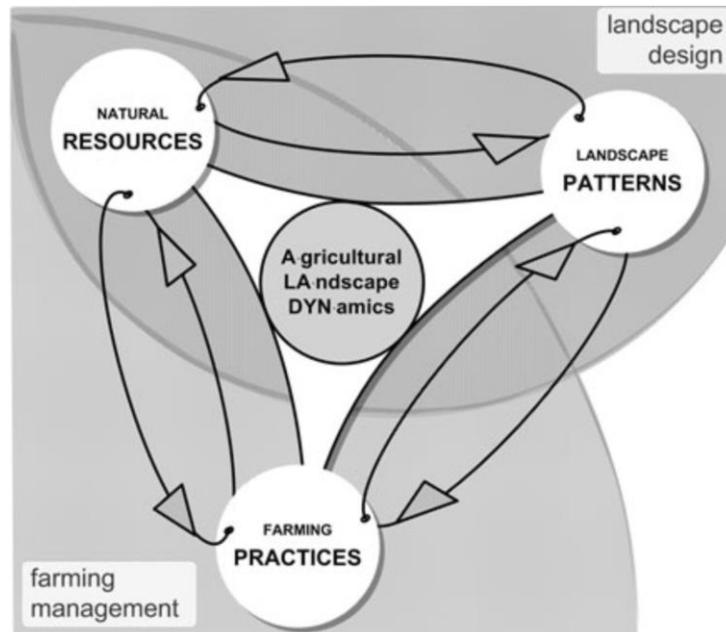


Figure 7 : Modèle conceptuel *Agricultural Landscape Dynamics*, structurant les interactions entre pratiques agricoles, ressources naturelles et structures paysagères (Benoît et al., 2012).

Ainsi, Duru et al. (2014) proposent un **cadre intégrateur liant l'exploitation agricole, le territoire, et les filières à un système d'acteurs**. Le système d'acteurs est caractérisé par des ressources cognitives, et mobilise les ressources matérielles de l'exploitation, du territoire et des filières. Dans cette thèse, puisqu'il est essentiel de considérer les ressources cognitives pour étudier les processus d'adoption de pratiques (Ha et al., 2024; Mawois et al., 2019), **nous nous appuyons plutôt sur ce cadre intégrateur** de l'agronomie des territoires, et en particulier sur les **relations entre le système d'acteurs et les ressources matérielles de l'exploitation agricole** (Figure 8). Nous aborderons également les relations entre le système d'acteurs et les filières, car celles-ci peuvent être déterminantes pour la diffusion de pratiques de diversification (Revoyron, 2022).

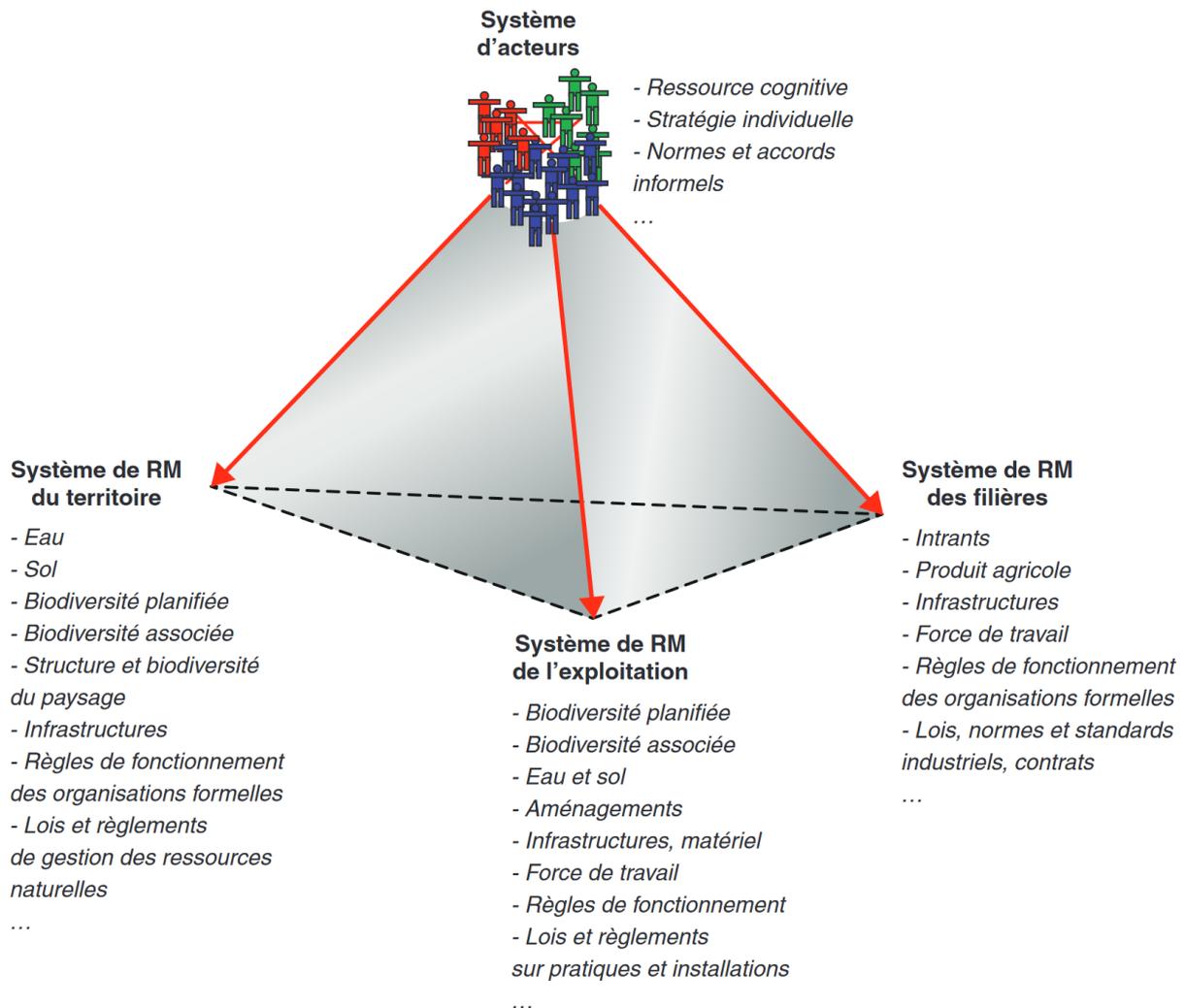


Figure 8 : Cadre conceptuel intégrateur mobilisé dans la thèse, avec un accent sur les relations entre le systèmes d'acteurs et le système de ressources matérielles (RM) de l'exploitation (Duru et al., 2014).

En considérant les pratiques agricoles comme déterminantes dans la construction des territoires et leurs dynamiques, l'agronomie des territoires fournit des éléments de descriptions des pratiques permettant de concevoir des paysages et territoires multifonctionnels correspondant aux attentes sociétales (Thenail et al., 2022), et ce grâce à deux approches complémentaires.

La première concerne l'**analyse des processus en cours dans les territoires**. Par exemple, l'agronomie des territoires peut permettre de suivre et évaluer différentes méthodes de protection intégrée des cultures mises en place sur un territoire, ou de décrire des pratiques agroécologiques en œuvre (Thenail et al., 2022). Des modèles de simulation peuvent être utilisés pour enrichir l'analyse des processus en cours (Castellazzi et al., 2010). La connaissance produite sur les processus en cours permet alors d'alimenter la deuxième approche, consistant

à **concevoir de nouveaux systèmes**. Dans le cas de la protection intégrée des cultures, la première étape d'analyse peut par exemple permettre de mettre en avant certaines solutions techniques à privilégier, ou des politiques publiques pour la conception de systèmes intégrés. Ronfort et al. (2011), en simulant des scénarios de modes d'occupation des sols, évaluent les impacts des changements d'occupation sur le ruissellement à l'échelle d'un bassin versant, et en tirent des recommandations sur les mesures que les acteurs et décideurs politiques locaux pourraient prendre (ex : incitations à planter des cultures dérobées en hiver ou des bandes enherbées pour limiter le ruissellement) ainsi que des points de vigilance sur des zones identifiées comme particulièrement sensibles (ex : ne pas labourer les prairies situées sur les réseaux de ruissellement).

4.3 L'approche mixte en agronomie des territoires

L'agronomie des territoires, puisqu'elle s'intéresse à différentes échelles spatiales (ex : parcelle, exploitation, territoire) et à une multitude d'acteurs (ex : agriculteurs et agricultrices, services de support, gestionnaires locaux), doit souvent mobiliser une diversité de sources de données. Des descriptions précises de pratiques et de choix (ex : décisions d'assolements par les agriculteurs et agricultrices) ne peuvent souvent être obtenues que par des enquêtes, ce qui peut s'avérer très chronophage. Le développement des systèmes d'information géographiques et la disponibilité de bases de données (ex : sur l'occupation des sols) permettent d'autres approches, qui peuvent être complémentaires des méthodes par enquêtes. En agronomie des territoires, l'« approche mixte » qui mobilise à la fois des données qualitatives et quantitatives, est ainsi souvent mobilisée.

Dans une étude dans le Bassin de la Seine, Mignolet et al. (2007) proposent une méthodologie pour analyser des dynamiques agricoles spatiales en combinant des méthodes de géographie et d'agronomie. L'organisation des pratiques agricoles à petite échelle géographique (échelle du bassin versant) a été étudiée à partir de diverses sources de données : bases de données de statistiques agricoles (Recensements agricoles, Enquêtes pratiques culturelles, Enquête Teruti), et données récoltées à partir d'enquêtes auprès de l'expertise agricole (majoritairement en chambre d'agriculture). En particulier, les données d'enquêtes ont permis de combler les manques des bases de données et d'obtenir des informations sur les pratiques agricoles passées. Ainsi, l'approche mixte en agronomie des

territoires permet d'**étudier les dynamiques territoriales à différentes échelles de temps**, et dans ce cas précis, à partir de données liées aux exploitations et agrégées à la commune.

A une échelle spatiale plus fine, Schaller et al. (2012) ont travaillé sur des espaces continus non agrégés pour étudier les successions de cultures sur des parcelles agricoles. Dans cette étude, des méthodes de fouilles de données d'occupation des sols à l'échelle des parcelles au cours du temps ont permis de faire ressortir des régularités à l'échelle des paysages. Des enquêtes en exploitation ont permis de préciser les règles de décision des agriculteurs et agricultrices pour l'allocation des cultures sur les parcelles, ce qui a finalement permis de comprendre les régularités trouvées par les modèles. Ce cas illustre bien l'importance de **considérer les systèmes d'acteurs et leurs ressources cognitives** (Figure 8) **pour comprendre les dynamiques territoriales**, et la pertinence de l'approche mixte en ce sens.

Les travaux de Debolini (2021), également inscrits en agronomie des territoires, mobilisent des approches mixtes pour étudier des **dynamiques à différentes échelles, à la fois temporelles et spatiales**, de la ferme (échelle locale) au bassin versant (échelle globale). A l'échelle locale, les enquêtes auprès d'agriculteurs et agricultrices, sont complémentaires des données et méthodes quantitatives. En effet, de telles enquêtes permettent de détecter des changements qui ne se répercutent pas systématiquement sur les pratiques ou l'occupation des sols telles que décrites dans les bases de données. Les enquêtes locales permettent ainsi d'identifier des déterminants aux dynamiques territoriales, elles-mêmes repérées et étudiées à l'échelle globale par des méthodes quantitatives. Réciproquement, l'analyse de bases de données peut permettre de repérer des régularités ou contrastes entre les pratiques agricoles de différentes entités spatiales, et les enquêtes sont alors utiles pour comprendre leurs origines.

Ainsi, pour étudier l'adoption d'une nouvelle pratique au sein des exploitations et territoires, l'agronomie des territoires offre un cadre intégrateur permettant de relier les dynamiques d'adoption par les agriculteurs et agricultrices aux caractéristiques des territoires dans lesquels ils et elles évoluent. Dans ce cadre, l'approche mixte est utile afin de repérer, via des bases de données, des dynamiques de diffusion de la pratique sur lesquelles il serait pertinent d'enquêter plus précisément, afin de comprendre pourquoi et comment les agriculteurs et agricultrices adoptent la pratique ; ces éléments permettant à leur tour de mieux comprendre les dynamiques existantes et quantifiables par des bases de données.

**PROBLÉMATIQUE
ET DÉMARCHE DE RECHERCHE**

1 Problématique

Les cultures associées, malgré les nombreux bénéfices qu'elles peuvent procurer dans les systèmes agricoles, sont encore peu adoptées en France, notamment en ce qui concerne les mélanges d'espèces. Actuellement, la majorité des résultats de recherche présentant les avantages à cultiver des associations est issue d'études expérimentales, du pot à l'expérimentation au champ, en passant par la parcelle aux conditions contrôlées. Les freins et leviers pour leur adoption ont pu être mis en évidence à partir d'études de cas, ou suivant des méthodes de traque aux innovations.

Ainsi, nous ne disposons pas d'une vision globale sur la pratique des cultures associées en conditions agricoles réelles en France, et ce manque de références est l'un des freins identifiés pour l'adoption des cultures associées (Introduction générale, §3.1). Or, avant de promouvoir l'adoption des cultures associées, il est nécessaire de vérifier si les bénéfices avancés dans la littérature se retrouvent bien sur le terrain, notamment en termes de performances (gestion des bioagresseurs, utilisation d'intrants exogènes, production) observées à l'échelle des systèmes de culture. Au-delà des systèmes de culture, il est également important de repositionner les cultures associées dans le fonctionnement global des exploitations agricoles, pour comprendre comment elles s'intègrent dans celui-ci, le décalage entre résultats obtenus en station de recherche et chez les agriculteurs et agricultrices pouvant donner lieu à l'identification de nouveaux points sur lesquels il faudra travailler. Enfin, les logiques d'adoption et d'intégration des cultures associées au niveau des exploitations sont diverses, et leurs combinaisons au sein des territoires peuvent donner lieu à des dynamiques d'adoption variables, observables à l'échelle des territoires.

En ce sens, cette thèse a pour objectif de répondre à la problématique suivante : **comment les cultures associées se positionnent-elles en termes de performances, et quels sont les principaux facteurs en jeu dans leurs dynamiques d'adoption à l'échelle des exploitations et des territoires ?**

2 Questions de recherche et démarche

Pour répondre à la problématique de la thèse, nous déclinons notre travail en quatre questions de recherche :

1. Quels sont les impacts des cultures associées sur l'utilisation d'intrants chimiques et sur les productions ?

En nous basant sur la littérature, nous faisons l'hypothèse que les mélanges de variétés et les mélanges d'espèces permettent de réduire l'utilisation d'intrants chimiques sans avoir d'effets négatifs sur les productions.

Pour tester cela, nous nous appuyons sur la base de données du réseau de fermes DEPHY, qui renseignent sur les pratiques agricoles d'agriculteurs et agricultrices volontaires pour réduire leur utilisation de pesticides, et ce dans une diversité de situations de production à travers la France. Le système d'information Agrosyst, qui recense les données des fermes du réseau DEPHY, donne également accès à des performances calculées à l'échelle des cultures et systèmes de cultures, avec notamment les Indicateurs de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT) et des indicateurs économiques. A partir de ces données, nous menons une analyse quantitative en comparant les performances de mélanges variétaux et de mélanges d'espèces à des cultures pures correspondantes au sein du réseau DEPHY, dans une diversité de contextes pédo-climatiques. Cette analyse est menée à l'échelle des cultures et systèmes de culture.

Les résultats de ce travail sont présentés dans le Chapitre 1 des Résultats. Ce chapitre est présenté en deux parties : une première partie sur les mélanges variétaux, rédigée en français, et une seconde sur les mélanges d'espèces, correspondant à un article scientifique publié en anglais (Yan et al., 2024).

Sur les mélanges d'espèces, comme évoqué en introduction, nous observons des surfaces en augmentation ces dernières années, mais qui restent limitées par rapport à la surface totale de terres labourables en France. Les résultats du Chapitre 1 montrent que les **mélanges d'espèces, et notamment les mélanges céréales-légumineuses sont performants pour réduire l'utilisation des intrants chimiques dans les fermes françaises, alors que les mélanges variétaux ne semblent pas permettre de réduction significative de l'utilisation de pesticides au sein du réseau DEPHY**. Ainsi, dans la suite, nous décidons d'étudier de manière approfondie les mélanges céréales-légumineuses, en commençant par les facteurs favorisant leur adoption dans les fermes françaises, en nous posant la question suivante :

2. Quelles sont les principales caractéristiques des exploitations agricoles dans lesquelles sont adoptés les mélanges céréales-légumineuses ?

Pour traiter cette question, nous utilisons la base de données du recensement agricole 2020, qui donne une photographie exhaustive de l'agriculture française en 2020. L'objectif est d'étudier les caractéristiques des exploitations agricoles dans lesquelles sont cultivés des mélanges céréales-légumineuses, afin d'identifier des facteurs liés à leur adoption. Grâce aux données du Registre parcellaire graphique (RPG), nous avons identifié des zones particulièrement dynamiques concernant les surfaces cultivées de mélanges céréales-légumineuses dans l'ouest, l'est et le sud de la France. Nous menons alors notre analyse à deux niveaux : à l'échelle nationale, et à l'échelle locale au sein de ces trois zones, afin d'identifier de potentielles spécificités liées à des contextes agricoles différents.

Les résultats sont présentés sous forme d'article scientifique rédigé en anglais dans le Chapitre 2 des Résultats. Cet article a été soumis à la revue *Agricultural Systems* et est en cours de révision.

Dans ce chapitre, nous mettons en évidence des caractéristiques d'exploitations agricoles dans lesquelles sont adoptés les mélanges céréales-légumineuses. Ressortent ainsi comme principaux facteurs associés aux mélanges céréales légumineuses **l'agriculture biologique, la présence d'animaux d'élevage, le stockage de grains à la ferme, et l'appartenance à une CUMA**. Toutefois, nos résultats ne permettent pas de conclure avec certitude sur le rôle de ces caractéristiques dans l'adoption de la pratique des mélanges céréales-légumineuses : la pratique mène-t-elle à une caractéristique de la ferme ? Ou cette caractéristique favorise-t-elle l'adoption de la pratique ? Pour préciser cela, nous traitons une troisième question de recherche :

3. Quelles sont les trajectoires d'adoption des mélanges céréales-légumineuses ?

Dans cette partie, nous avons choisi de nous centrer sur des territoires avec des taux d'adoption de mélanges céréales-légumineuses relativement élevés. Nous avons identifié un cas d'étude en mobilisant diverses sources (ex : bases de données, littérature grise, contacts auprès de chambres d'agriculture). Nous avons arrêté notre choix sur un groupe d'agriculteurs et agricultrices constitué autour d'un CIVAM (Centre d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural) dans lequel un travail collectif a été mené autour des cultures associées. Notre hypothèse est que ce travail collectif a favorisé l'adoption de la pratique au sein du groupe par le passé, et qu'il continue à influencer les pratiques des personnes ayant rejoint le groupe plus récemment (ultérieurement au travail collectif sur les mélanges).

Par des entretiens semi-directifs auprès d'agriculteurs et agricultrices de ce groupe, mais aussi auprès d'autres acteurs interagissant avec le groupe, nous avons reconstitué la trajectoire collective et les trajectoires individuelles vers l'adoption des mélanges céréales-légumineuses.

Les résultats sont présentés sous forme d'article scientifique rédigé en anglais dans le Chapitre 3 des Résultats.

Dans ce chapitre, nous avons identifié trois types de trajectoires individuelles, toutes mettant en avant **l'importance des dynamiques collectives** pour l'adoption des mélanges céréales-légumineuses. Les interactions entre pairs, par le partage d'expériences, de connaissances ou de matériels, ont joué un rôle majeur dans l'adoption de la pratique, aujourd'hui considérée comme une **pratique de « base » pour l'agriculture biologique** dans le territoire étudié. Les différentes trajectoires ont cependant des temporalités différentes, qui posent la question des potentiels de diffusion de la pratique à l'avenir sur de plus larges étendues. Ainsi, nous traitons une dernière question de recherche :

4. Quelles sont les modalités d'intégration des mélanges céréales-légumineuses dans les exploitations agricoles, et quels sont leurs impacts sur les dynamiques d'adoption à l'échelle des territoires ?

Parmi les trois zones identifiées comme particulièrement dynamiques ces dernières années en terme d'adoption de mélanges céréales-légumineuses, dans deux d'entre elles (dans l'ouest et le sud de la France), nous observons des départements semblant agir comme « points chauds », où les mélanges ont été adoptés plus tôt, et à partir desquels la pratique se serait diffusée plus largement, dans les départements périphériques. Dans cette partie, nous partons du postulat que les départements sont une entité spatiale pertinente pour le développement agricole².

Nous utilisons ici les données du RPG pour (i) étudier les dynamiques d'intégration des mélanges céréales-légumineuses au sein des exploitations, en termes de parts d'assolement représentées entre 2015 et 2022 (années pour lesquelles les données RPG sont disponibles), et (ii) décrire leurs impacts sur les dynamiques observées à l'échelle des territoires, dans chacune des deux zones identifiées (ouest et sud de la France), dans les départements « cœurs » d'une part et les départements « périphériques » d'autre part.

Les résultats de ce travail sont présentés sous forme d'article scientifique rédigé en anglais, dans le Chapitre 4 de Résultats.

² Au cours de son stage, (Dewitte, 2021) a comparé les parts de mélanges d'espèces au niveau des petites régions agricoles et au niveau des départements, pour tester leur lien avec les facteurs pédoclimatiques. N'ayant pas observé de différences de répartition des mélanges entre les deux échelles, elle conclut que la répartition des mélanges est possiblement liée à l'influence d'instances départementales, ou en tout cas, qu'elle ne dépend pas uniquement de facteurs pédoclimatiques.

Nous identifions trois types de dynamiques à l'échelle des exploitations : *Essais* (Type 1), correspondant à une **adoption des mélanges céréales-légumineuses sur une période courte** (inférieure à deux ans dans la majorité des cas), **suivie d'un arrêt traduisant probablement un arrêt de la pratique après des essais infructueux** ; *Adoption puis constance* (Type 2), correspondant à une **adoption graduelle, probablement à partir d'une phase de test réussie, avant d'atteindre un plateau** ; et *Parts initialement élevées puis augmentation* (Type 3), correspondant à une **intégration des mélanges sur une grande part des terres labourables de l'exploitation, suivie d'une augmentation au cours du temps**. Dans les départements « cœurs », les dynamiques de type *Adoption puis constance* sont responsables de l'augmentation des surfaces de mélanges observée entre 2015 et 2022, alors que dans les départements « périphériques », ce sont les dynamiques de type *Parts initialement élevées puis augmentation* qui dominent.

Avant chaque article scientifique rédigé en anglais, nous présentons un résumé de l'article en français. Il est à noter que les introductions d'article peuvent être redondantes avec l'introduction générale de la thèse, notamment les premiers et deuxièmes paragraphes qui rappellent les bénéfices des cultures associées et les freins à leur adoption. Entre chaque chapitre de résultats, nous présentons une conclusion en français du chapitre précédent afin de faire une transition vers le chapitre suivant.

La démarche de recherche de la thèse est schématisée dans la Figure 9.

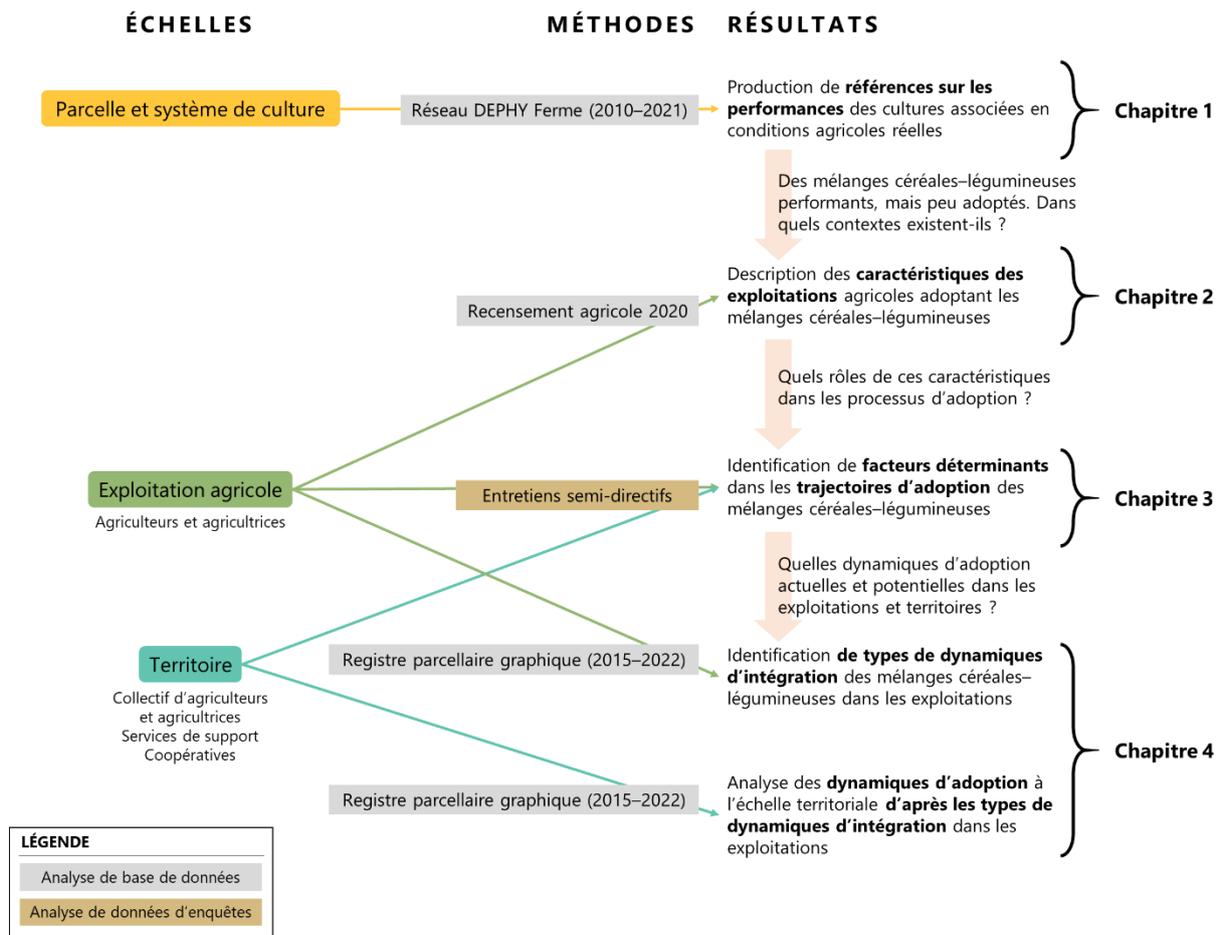


Figure 9 : Démarche de recherche de la thèse, basée sur une approche mixte et multi-échelles, et principaux résultats associés.

RÉSULTATS

CHAPITRE 1 : UTILISATION D'INTRANTS CHIMIQUES ET PERFORMANCES DES CULTURES ASSOCIÉES EN CONDITIONS AGRICOLES

CLÉS DE LECTURE

Ce chapitre est découpé en deux sous-chapitres:

- Le premier, écrit en **français**, traite des impacts des **mélanges variétaux de blé** sur l'utilisation des **pesticides** et de leurs performances, en termes de **rendements** et **marges brutes**
- Le second, écrit en **anglais** car publié dans une revue internationale à comité de lecture, traite des impacts des **mélanges d'espèces** sur l'utilisation de **pesticides** et **fertilisants** azotés minéraux et de leurs **marges brutes** (les rendements n'étant pas détaillés pour chaque espèce du mélange, nous ne les avons pas étudiés)

Dans les deux cas, les analyses ont été réalisées à partir de données du réseau DEPHY, et suivant la **même méthode** :

1. Sélection des systèmes de culture à étudier et des indicateurs agronomiques pour les décrire
2. Appariement de chaque système de culture contenant un mélange avec un système de culture aux caractéristiques proches mais contenant une culture pure (avec prise en compte de l'année pour les mélanges variétaux, mais pas pour les mélanges d'espèces par manque de données disponibles) d'après des distances euclidiennes calculées à partir des indicateurs sélectionnés à l'étape 1
3. Test statistique de comparaison par paires

La seule différence méthodologique se situe entre les étapes 2 et 3 : dans le sous-chapitre 1.2 sur les mélanges d'espèces, une étape supplémentaire a été nécessaire car pour certains mélanges d'espèces, il existait plusieurs appariements possibles (i.e. même valeur de distance euclidienne) avec des conduites en espèces pures – ce qui n'était pas le cas dans le jeu de données sur les mélanges variétaux, dans le sous-chapitre 1.1. Dans le sous-chapitre 1.2, nous avons alors choisi de tester toutes les combinaisons et de faire une analyse de la variabilité des résultats selon les combinaisons. Cette analyse de variabilité est expliquée dans la section 2.4 du sous-chapitre 1.2.

Ainsi, dans le sous-chapitre 1.1 sur les mélanges variétaux de blé, la méthode reprend celle publiée dans l'article intégré au sous-chapitre 1.2, sans l'étape d'analyse de variabilité des combinaisons. Certaines parties de la méthode du sous-chapitre 1.2 seront donc redondantes à la lecture : description du réseau DEPHY (section 2.1), sélection et caractérisation des systèmes de cultures (section 2.3), description des indicateurs IFT et marges brutes (section 2.4).

SOUS-CHAPITRE 1.1 : IMPACTS ET PERFORMANCES DES MÉLANGES DE VARIÉTÉS DE BLÉ EN CONDITIONS AGRICOLES

1 Introduction

Les mélanges variétaux consistent à cultiver plusieurs variétés d'une même espèce sur une même parcelle. Comme spécifié dans l'introduction de la thèse, cette pratique présente des avantages agronomiques, notamment sur le contrôle des bioagresseurs (Borg et al., 2018). Sur le blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.) en particulier, des études ont permis de montrer l'efficacité des mélanges variétaux pour limiter la propagation de maladies telles que la rouille jaune et la septoriose (Finckh et al., 2000 ; Mundt et al., 1995 ; Tooker & Frank, 2012). Concernant la production, par rapport à des cultures de variétés pures de blé tendre, on peut espérer grâce aux mélanges variétaux, un gain de rendement (*overyielding*) de 3,5% jusqu'à 6,2% dans le cas d'années à forte pression (Borg et al., 2018). Ces gains de rendement ne sont cependant pas systématiques, et l'avantage des mélanges variétaux de blé sur les productions se situerait plutôt au niveau de la stabilisation des rendements d'une année sur l'autre (Reiss & Drinkwater, 2018). Toutefois, l'Expertise Scientifique Collective (ESCo) sur la diversité végétale (Tibi et al., 2023) pointe un manque de consensus sur la régulation des adventices, et un consensus de la littérature décrivant un effet plutôt faible sur la régulation des maladies aériennes, et d'amplitude très variable sur les pathogènes aériens. En 2019, à l'issue de trois années d'essais, l'institut technique agricole grandes cultures Arvalis pointait quant à lui des « différences rarement significatives » entre les mélanges de variétés de blé et les variétés pures de blé (Arvalis, 2019).

Pourtant, depuis 2021, les mélanges variétaux de blé sont la première « variété » cultivée en France. Ceci pose alors la question des motivations des agriculteurs et agricultrices qui adoptent cette pratique, ainsi que des avantages de la pratique au sein des exploitations agricoles, notamment en termes de régulation des bioagresseurs et de production. Actuellement, nous disposons de peu d'informations permettant de conclure sur les liens entre mélanges de variétés de blé et utilisation de pesticides dans les exploitations agricoles.

Le blé tendre d'hiver étant la première culture en France (34% des terres labourables en 2020 ; Agreste, 2020), il existe un fort enjeu de réduction de l'utilisation des pesticides sur

cette culture, et les mélanges variétaux pourraient aider à relever ce défi, au vu du taux d'adoption croissant de cette pratique depuis 2015 (Introduction générale, Figure 3).

Ainsi, afin de mieux comprendre les intérêts des mélanges variétaux de blé tendre dans les exploitations agricoles, et leur place dans la transition agroécologique, nous présentons dans la suite une analyse quantitative des effets des mélanges de variétés de blé tendre sur l'utilisation de pesticides et sur la production dans des exploitations agricoles en France.

2 Matériel et méthodes

2.1 La base de données du réseau DEPHY FERME

Le réseau DEPHY FERME est un réseau de fermes de démonstration, lancé en 2010 avec le plan Ecophyto, dont il constitue l'une des actions phares. L'objectif du réseau DEPHY est de démontrer qu'il est possible de réduire les utilisations de pesticides en changeant les pratiques agricoles. Les agriculteurs et agricultrices rejoignent ce réseau sur la base du volontariat et bénéficie d'un accompagnement en groupes locaux par une personne dédiée (les ingénieurs et Ingénieurs Réseau DEPHY). Dans sa phase test, en 2010, le réseau DEPHY comptait 178 fermes ; en 2023, il en comptait 2000. Le réseau couvre sept des principaux secteurs de production en France (grandes cultures, polyculture-élevage, maraîchage, horticulture, cultures tropicales, viticulture et arboriculture).

Outre le travail d'accompagnement, le réseau DEPHY vise aussi à « mutualiser les données de références sur les systèmes de culture (SdC) économes en produits phytopharmaceutiques au sein d'un réseau national couvrant l'ensemble des filières de production et en associant les différents partenaires, et valoriser le rôle des fermes appartenant à ce réseau » (EcophytoPIC, 2024). Ainsi, chaque année, un système de culture par ferme est suivi et décrit par des ingénieures et ingénieurs Réseau DEPHY, ce qui permet d'alimenter une base de données (le système d'information Agrosyst) avec des données sur les cultures conduites et les itinéraires techniques (ex : intrants, travail du sol), mais aussi sur les performances économiques (ex : productions, charges).

Pour ce travail de recherche, nous avons utilisé une extraction de la base de données réalisée en janvier 2023 par l'équipe Agrosyst d'INRAE. Entre 2010 et 2023, on dénombre dans la base de données 27 711 systèmes de culture–années, toutes cultures confondues.

2.2 Sélection et caractérisation des systèmes de cultures

Nous avons centré notre étude sur les mélanges variétaux de blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L., désigné « blé » dans la suite) avec l'objectif de comparer leurs performances à celles de cultures de variétés pures de blé, notamment en termes d'utilisation des pesticides et de production.

Le réseau DEPHY visant à réduire l'utilisation des pesticides, les agriculteurs et agricultrices du réseau sont susceptibles de mettre en œuvre une diversité de pratiques en ce sens. Il peut donc être délicat d'attribuer une éventuelle variation d'utilisation des pesticides à une seule pratique, qui serait celle des mélanges variétaux. Pour limiter ce biais, nous avons développé une méthode afin de comparer chaque culture en mélange à une culture en variété pure dans des systèmes de cultures proches.

En nous inspirant du travail de Lechenet et al. (2016), nous avons décrit les systèmes de culture contenant du blé avec 36 variables agronomiques susceptibles d'avoir un effet sur l'utilisation de pesticides (Annexe 1). Ces variables ont été calculées à partir de données disponibles dans la base de données du réseau DEPHY, et concernent la diversité de la rotation de cultures (proportion et nombre de cultures différentes), la longueur de la rotation, les périodes de semis des différentes cultures du système, le travail du sol et l'irrigation.

Nous avons restreint nos données aux systèmes de grande culture et polyculture-élevage, dans lesquels se trouvent la majorité des cultures de blé, et exclu les systèmes en agriculture biologique, qui auraient biaisé notre analyse du fait des restrictions d'usage de pesticides auxquelles ils sont soumis. Les systèmes de culture qui n'ont pas pu être décrits de manière complète (données manquantes sur la rotation et les opérations de semis notamment), ont été exclus également. Enfin, nous n'avons travaillé que sur la période allant de 2019 à 2021 : à partir de 2019, dans le formulaire d'entrée des données, une case à cocher a été introduite pour indiquer si la culture renseignée était un mélange variétal, enlevant toute confusion³. Après 2021, nous ne disposons plus d'assez de données pour constituer des paires par année. En effet, nous disposons de 23 systèmes de culture complètement décrits et contenant du blé en 2022 (avec seulement un système contenant du blé en mélange) contre

³ Dans le système d'information Agrosyst, il est possible de renseigner plusieurs variétés pour une même culture. Seulement, avant l'introduction de la case à cocher, un doute pouvait subsister sur la nature de la culture : les variétés renseignées pouvaient être considérées comme les variétés constituant un mélange de variétés, ou bien comme étant plusieurs variétés cultivées pures dans un même système de culture.

107 en 2021, probablement parce que les données de 2022 n'avaient pas encore toutes été saisies dans le système d'information au moment de l'extraction. Nous avons finalement obtenu 287 systèmes de culture–années contenant au moins une culture de blé en variété pure (190 en grande culture et 97 en polyculture-élevage) et 32 contenant au moins une culture de blé en mélange de variétés (9 en grande culture et 23 en polyculture-élevage) complètement décrits par les 36 variables agronomiques.

2.3 Analyses statistiques par comparaison de paires

Les couples mélange variétal–variété pure ont été construits en utilisant la distance euclidienne entre les systèmes de cultures. Nous avons d'abord calculé une matrice de distances euclidiennes (fonction "dist", R package "stats", R-software version 4.1.3) entre les systèmes de cultures à partir des 36 variables agronomiques (toutes quantitatives). Toutes les données ont été centrées et réduites avant le calcul de la matrice. Dans la base de données du réseau DEPHY, l'utilisation des pesticides est en général plus faible dans les systèmes de polyculture-élevage que dans ceux de grandes cultures. Nous avons donc couplé chaque système de culture contenant un mélange variétal de blé avec le système de culture contenant une culture pure de blé le plus proche (d'après la distance euclidienne), du même type de système de production (grande culture ou polyculture-élevage), de la même année, et dans la même région géoéconomique ainsi que définie par une étude du CERESCO & Terres Inovia (2021) (Annexe 2). Par exemple, un système de culture de 2021 contenant un mélange variétal de blé en grande culture a été couplé avec un système de culture de 2021 contenant un blé pur en grande culture de la même région géoéconomique. Les couples ont été construits sans chercher de correspondance entre les variétés impliquées dans les mélanges et dans les cultures pures et ce pour plusieurs raisons : (i) les variétés n'étaient pas toujours renseignées, (ii) dans certains cas, plusieurs variétés possibles étaient renseignées et nous ne pouvions pas trancher (ex : « Chevignon OU LG Absalon » pour un blé en variété pure) et (iii) compte-tenu de notre échantillon déjà réduit du fait de nos critères de sélection, ajouter une contrainte sur les variétés aurait encore réduit notre échantillon. Finalement, nous obtenons 36 couples⁴ à

⁴ Nous obtenons 36 couples alors que nous n'avions que 32 systèmes de culture–années contenant des mélanges variétaux de blé. Cela signifie donc que parmi ces 32 systèmes de culture–années, il en existe un ou plusieurs contenant au moins deux mélanges variétaux de blé avec des conduites différentes. Dans la suite, pour simplifier, nous parlerons de 36 systèmes de culture appariés.

partir desquels nous réalisons nos analyses. Parmi ces 36 couples, nous en comptons 8 en 2019, 11 en 2020 et 17 en 2021.

En utilisant ces 36 couples, nous avons comparé l'utilisation des pesticides, les rendements et les marges brutes entre mélange variétal de blé et culture pure de blé. Nous avons utilisé l'Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT) comme métrique pour l'utilisation des pesticides. Cet indicateur est utilisé pour surveiller la fréquence et l'intensité des pesticides appliqués à différentes échelles (culture, système de culture, groupe de systèmes de culture). Dans notre étude, nous considérons l'IFT à l'échelle de la culture, d'après la formule suivante (Pingault et al., 2009) :

$$IFT = \sum_T \frac{Dose\ appliquée_T}{Dose\ de\ référence_T} * \frac{Surface\ traitée_T}{Surface\ totale\ T}$$

Pour chaque traitement T sur la culture considérée, la dose appliquée par hectare est normalisée par la dose de référence par hectare. L'IFT à l'échelle de la culture est alors la somme pondérée de toutes les doses normalisées pour la culture considérée. Nous avons utilisé comme dose de référence la dose inscrite pour le produit sur la cible visée (adventice, champignon, insecte) pour protéger la culture considérée, d'après la base de données d'autorisation de commercialisation (E-Phy, ANSES, 2023). Pour les traitements de semences, l'IFT est calculé sur la quantité de semences traitées : par exemple, si toutes les semences sont traitées, alors l'IFT vaut 1 ; si la moitié des semences est traitée, alors l'IFT vaut 0,5.

Nous avons considéré les IFT pour quatre catégories :

- Tous les types de pesticides (ex : herbicides, fongicides, insecticides, traitements de semences, corvifuges, molluscicides), ainsi que les régulateurs de croissance, mais produits de biocontrôle exclus ;
- tous les herbicides, sauf produits de biocontrôle
- tous les fongicides, sauf traitements de semences et produits de biocontrôle
- tous les insecticides, sauf traitements de semences et produits de biocontrôle.

Nous n'avons pas analysé les IFT des régulateurs de croissance, ou des pesticides de type corvifuges et molluscicides qui étaient tous agrégés dans une catégorie « Autres » dans la base de données. A l'échelle nationale, ces produits représentent en moyenne 7,8% de l'IFT total du blé (IFT de 0,4, par rapport à un IFT total de 5,1), d'après l'Enquête Pratiques culturales en grandes cultures 2021 (Agreste, 2024). De même, les traitements de semences, qu'ils soient de nature fongicide ou insecticide, étaient tous agrégés dans une catégorie

unique « Traitements de semences », donc nous avons choisi de ne pas les inclure dans notre analyse. A titre d'information, l'IFT traitements de semences est en moyenne de 1,0 à l'échelle nationale (Agreste, 2024).

Comme indicateurs de production, nous avons utilisé le rendement ($q \text{ ha}^{-1}$) et la marge brute (€ ha^{-1}), définie comme suit :

$$\text{Marge brute} = \text{Produit brut} - \text{Charges opérationnelles}$$

où le produit brut est le produit entre le rendement et le prix de vente (donné par les ingénieurs et ingénieures réseau DEPHY en charge d'alimenter le système d'information Agrosyst avec les données des fermes DEPHY) et les charges opérationnelles désignent les dépenses liées à l'achat des intrants. Dans Agrosyst, une valeur de produit brut est calculée et attribuée aux productions autoconsommées sur la ferme (pour l'alimentation de l'élevage par exemple), correspondant à la valeur qu'elles auraient eue si elles avaient été vendues. Pour pouvoir comparer les marges brutes entre des fermes avec différents niveaux d'autoconsommation, nous avons utilisé l'indicateur de marge brute calculé dans le système d'information Agrosyst qui prend en compte toutes les productions, qu'elles soient vendues ou autoconsommées, en attribuant la valeur de vente réelle aux production vendues, et en calculant une valeur marchande pour les productions autoconsommées à partir d'un référentiel des prix de production, calculé en prenant en compte les indices des prix des produits agricoles à la production publiés par l'INSEE (Jolys et al., 2016).

Nous avons donc comparé les IFT, les rendements et les marges brutes entre des cultures de blé en variétés pures et en mélanges. Nous avons utilisé des tests des rangs signés de Wilcoxon car l'hypothèse de normalité n'était pas respectée dans nos données (d'après une inspection visuelle des données et un test de Shapiro-Wilk). Le test des rangs signés de Wilcoxon permet de comparer deux groupes d'observations en spécifiant que chaque observation d'un groupe est appariée avec une observation de l'autre groupe.

3 Résultats

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus sur l'utilisation des pesticides puis sur les indicateurs de production (rendements et marges brutes). Lorsque nous parlons d'une « réduction » (ou d'une « augmentation »), cela désigne une valeur de l'indicateur plus

faible (ou plus élevée) dans le cas du mélange variétal, en comparaison avec la variété pure associée.

3.1 Utilisation de pesticides

Dans nos données appariées, nous observons en 2019 une augmentation de l'IFT tout pesticide entre le blé cultivé en variété pure et le blé cultivé en mélange (8/8 cas, Figure 1.1.1). En 2020, parmi les 11 paires, nous observons une augmentation de l'IFT tout pesticide dans six cas et une diminution dans cinq. En 2021, sur les 17 paires, nous comptons un seul cas pour lequel l'IFT a augmenté, contre 16 pour lesquels il a diminué. Toutefois, d'après les tests statistiques sur l'échantillon total (soit 36 paires toutes les années confondues), les différences sur l'IFT tout pesticide entre le blé cultivé en mélange variétal et le blé cultivé en variété pure ne sont pas significatives ($p > 0,05$, Figure 1.1.4).

Nos résultats montrent une augmentation significative de l'IFT herbicides dans le cas du blé cultivé en mélange variétal, de +0,42 en moyenne (soit +27,2%, $p < 0.01$), avec 8/8, 8/11 et 9/17 cas en 2019, 2020 et 2021 respectivement (Figure 1.1.1), pour lesquels l'IFT herbicides est plus élevé sur le mélange que sur la variété pure.

Concernant l'IFT fongicides, nous montrons une réduction de -0,27 en moyenne (soit -19,2%, $p < 0,05$) sur les mélanges variétaux en comparaison aux variétés pures. Nous observons une réduction particulièrement marquée en 2021 (Figure 1.1.1), avec 16/17 cas concernés.

Concernant l'IFT insecticides, nos résultats ne montrent pas de différence significative ($p > 0,05$) entre variétés pures et mélanges, celui-ci étant nul dans la majorité des cas.

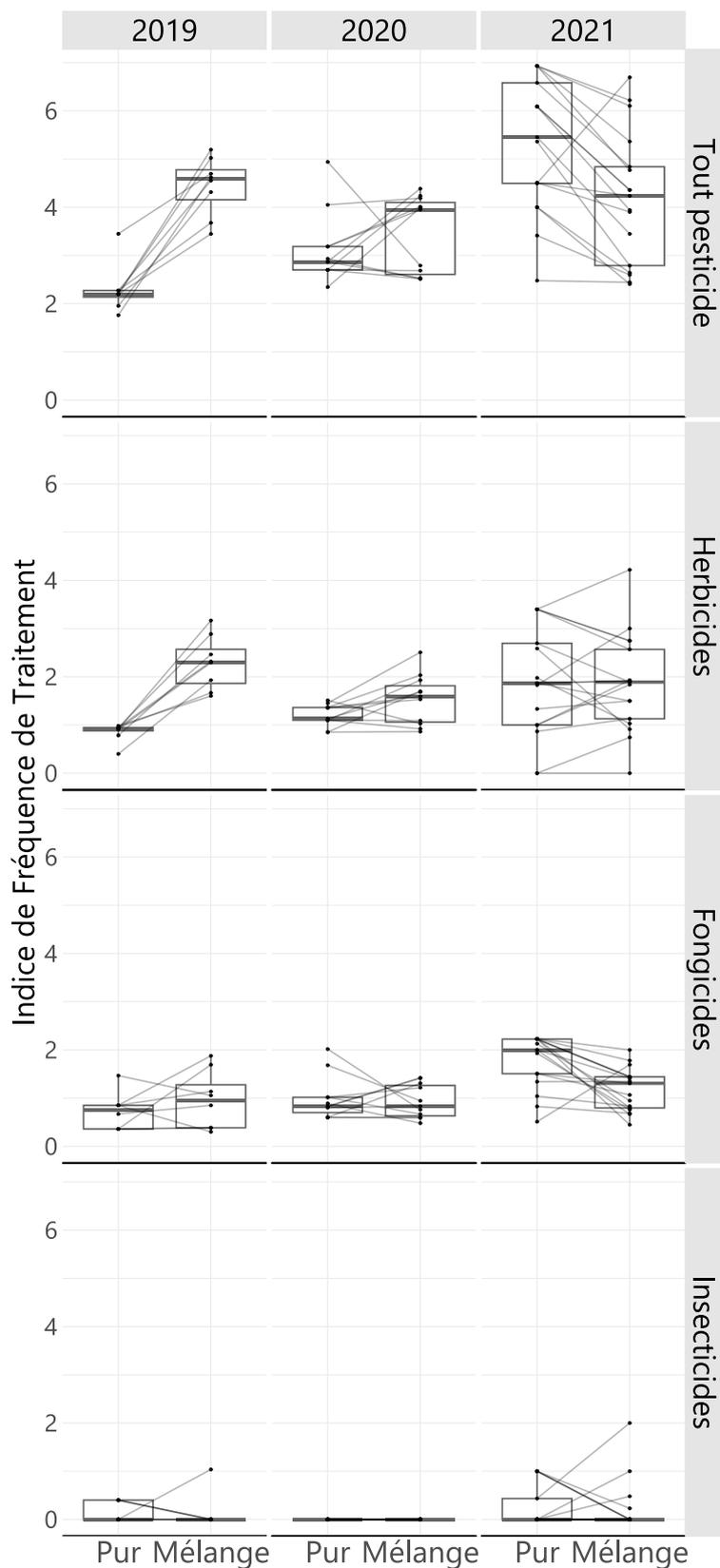


Figure 1.1.1 : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires sur le blé tendre d'hiver en variété pure et en mélange variétal. Les boîtes à moustaches représentent les valeurs d'IFT pour chaque observation dans chaque groupe. Les points noirs représentent les observations individuelles dans chaque groupe, et les lignes relient chaque mélange à la culture pure correspondante.

3.2 Rendements et marges brutes

Nos résultats montrent une plus grande disparité des rendements obtenus par les mélanges variétaux (Figure 1.1.2), et une réduction significative du rendement de $-4,50 \text{ q ha}^{-1}$ en moyenne soit $-5,0\%$ ($p < 0,05$, Figure 1.1.4).

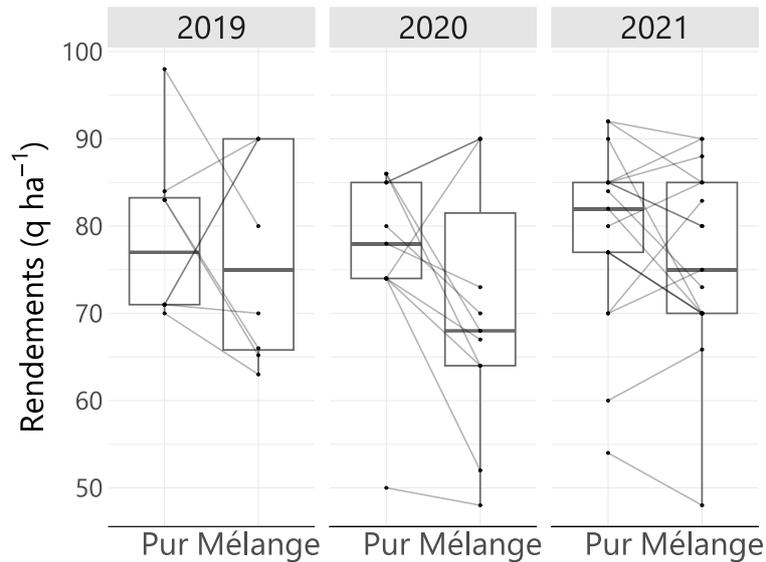


Figure 1.1.2 : Rendements du blé tendre d'hiver en variété pure et en mélange variétal. Les boîtes à moustaches représentent les valeurs de rendement pour chaque observation dans chaque groupe. Les points noirs représentent les observations individuelles dans chaque groupe, et les lignes relient chaque mélange à la culture pure correspondante.

Sur les marges brutes, nous observons également une réduction dans la plupart des cas : 8/8 en 2019, 8/11 en 2020, 13/17 en 2021 (Figure 1.1.3). Cette réduction est significative et est en moyenne de -215 euro ha^{-1} , soit $-14,9\%$ ($p < 0,001$, Figure 1.1.4).

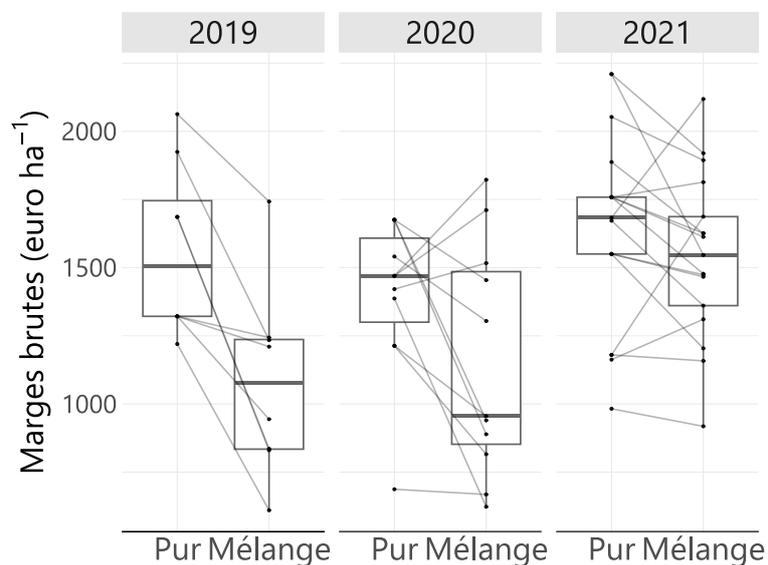


Figure 1.1.3 : Marges brutes du blé tendre d'hiver en variété pure et en mélange variétal. Les boîtes à moustaches représentent les valeurs de marge brute pour chaque observation dans chaque groupe. Les points noirs représentent les observations individuelles dans chaque groupe, et les lignes relient chaque mélange à la culture pure correspondante.

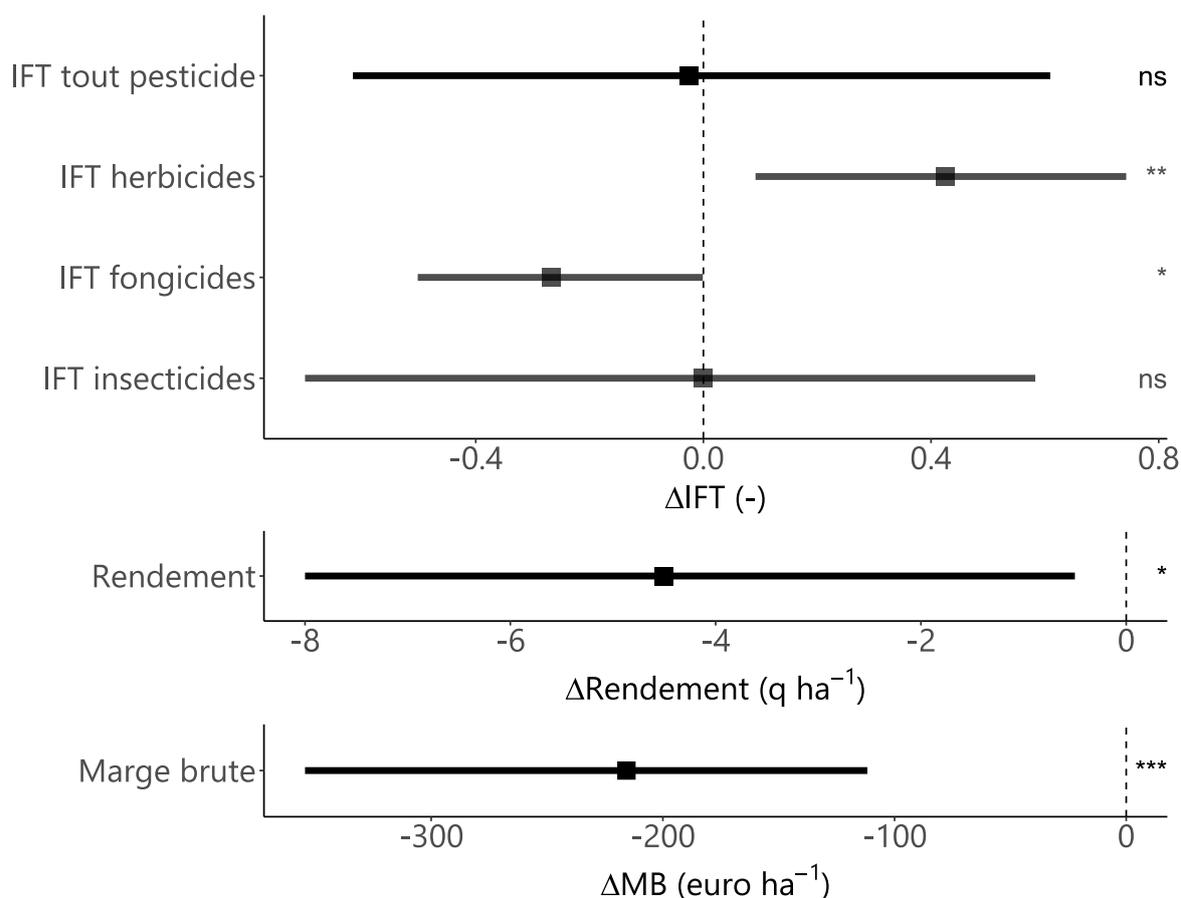


Figure 1.1.4 : Différence moyenne entre la variété pure et le mélange variétal pour les Indicateurs de Fréquence de Traitements phytosanitaires (Δ IFT), les rendements (Δ Rendement) et les marges brutes (Δ MB), estimée par les tests de rangs signés de Wilcoxon. Les points représentent la différence moyenne et les lignes représentent l'intervalle de confiance à 95%. Une valeur négative correspond à une réduction dans le groupe des mélanges variétaux en comparaison au groupe des variétés pures. Les codes de significativité (ns = $p > 0,05$; * = $p \leq 0,05$; ** = $p \leq 0,01$; *** = $p \leq 0,001$) s'appliquent aux tests de rangs signés de Wilcoxon.

4 Discussion

4.1 Effets des mélanges variétaux de blé sur l'utilisation des pesticides

Nos résultats ont montré une augmentation significative de l'utilisation d'herbicides avec les mélanges variétaux. A notre connaissance, peu d'études ont porté sur le lien entre mélange variétal de blé et régulation des adventices. Certaines d'entre elles pointent une absence de différence de compétitivité entre les variétés pures et les mélanges variétaux (Kaut et al., 2009 ; Lazzaro et al., 2018). L'utilisation accrue d'herbicides sur les mélanges dans nos résultats porte surtout sur l'année 2019, pour laquelle les traitements herbicides sur les variétés pures étaient particulièrement faibles, avec un IFT moyen de 0,85 alors que la moyenne nationale se situait à 1,8 en 2021 (Agreste, 2024).

Pour 18 des 36 mélanges étudiés, nous avons pu retrouver les dates de désherbage et les avons comparées aux dates de semis. En effet, les désherbages de pré-semis ou pré-levée et de post-levée ne répondent pas aux mêmes logiques : en pré-semis et pré-levée, le traitement herbicide est plutôt préventif, alors qu'en post-levée, il est plutôt curatif. Finalement, sur 13 mélanges qui avaient un IFT herbicides plus élevé que leur culture pure correspondante, 11 étaient concernés par des traitements de pré-semis et/ou pré-levée. Ce type d'interventions, souvent systématiques (Compagnone et al., 2008), va aussi dans le sens d'une simplification du travail pour les agriculteurs et agricultrices.

Dans le réseau DEPHY, les variétés cultivées en mélange sont globalement les mêmes que celles cultivées en variété pure (Coupery, 2023), donc il est peu probable qu'il y ait une différence de compétitivité face aux adventices entre les mélanges variétaux et les cultures pures dans notre étude. Cependant, en prenant en compte des critères sur les traits de compétitions comme la surface foliaire ou l'élongation précoce pour constituer l'association de variétés, il pourrait être envisageable de créer des mélanges plus compétitifs. Or, ces traits ne sont habituellement pas présents dans les catalogues de variétés, et les rajouter risquerait de complexifier encore davantage les choix de variétés pour les agriculteurs et agricultrices, alors que la compétitivité face aux adventices ne semble pas être un objectif habituellement recherché par les agriculteurs et agricultrices (Coupery, 2023).

D'après nos résultats, les mélanges variétaux permettent de réduire significativement l'utilisation de fongicides en comparaison aux variétés pures. Cette réduction était particulièrement marquée en 2021, qui était une année à faible pression maladie au printemps en France (Coupery, 2023). Les agriculteurs et agricultrices s'autoriseraient donc peut-être plus d'impasses sur les traitements lorsque les risques de maladies sont plus faibles. Autrement, indépendamment de la pression de l'année, la réduction de fongicides peut également être liée à un effet d'apprentissage au cours du temps, du fait de la diffusion de plus en plus large de la pratique et des bénéfices associés (dans la presse agricole par exemple). Toutefois, nous n'avons pas pu vérifier cette dernière hypothèse car nous ne disposons pas de données suffisantes pour traiter les années 2022 et 2023. Les décisions sur les traitements fongicides peuvent aussi dépendre de la perception propre de la maladie par les agriculteurs et agricultrices : l'aversion au risque et le seuil de « tolérance » face à des signes de maladies sont variables d'une personne à une autre, et peuvent finalement impacter les doses appliquées (Gent et al., 2011).

Finalement, les mélanges de variétés de blé ne semblent pas permettre de réduction de fongicides de manière systématique. Les enquêtes menées en 2023 par Baptiste Coupery auprès de 20 agriculteurs conventionnels répartis dans la moitié nord de la France (départements du Nord, Pas-de-Calais, Somme, Lorraine, Sarthe et Vienne) vont également dans ce sens, puisque seulement la moitié des agriculteurs enquêtés déclaraient réduire leurs doses, tandis que trois déclaraient traiter à pleine dose – pour les sept agriculteurs restants, l'information manquait (Coupery, 2023).

Sur l'utilisation des insecticides, nous n'avons pas observé de différences entre les mélanges variétaux et les variétés pures. Dans les deux cas, les IFT sont plus faibles que la moyenne nationale de 0,2 (Agreste, 2024) : en moyenne 0,13 et 0,16 respectivement pour les mélanges et les purs.

Au total, la diminution des fongicides est compensée par une augmentation des herbicides, et l'IFT total ne diffère pas entre les mélanges et les variétés pures. Toutefois, cela peut être dû à un biais d'échantillonnage, car avec notre procédure de sélection et d'appariement des données, nous n'avons finalement pu étudier que 36 mélanges variétaux, répartis sur trois années. Dans ses analyses sur les données du réseau DEPHY, Coupery (2023) a comparé les variétés pures et les mélanges variétaux dans leur globalité pour chaque année, sans chercher à les apparier. Il n'a pas observé de différences significatives de l'IFT herbicides entre 2019 et 2022, mais la différence d'IFT fongicides en 2021 a également été significative dans son travail (Coupery, 2023).

4.2 Effets des mélanges variétaux de blé sur les productions

Nos résultats montrent une perte de rendement de l'ordre de $-5,0\%$, ce qui suggère que l'effet d'*overyielding* n'a pas été observé dans notre échantillon, alors qu'il s'agit de l'un des avantages les plus souvent mis en avant pour les mélanges variétaux (Borg et al., 2018). La stabilité interannuelle des rendements étant souvent un objectif recherché à travers les mélanges variétaux (Enjalbert et al., 2019), il est intéressant de suivre les rendements d'un mélange donné dans le temps.

Les données du réseau DEPHY étant renseignées chaque année, il est possible de suivre des systèmes de culture dans le temps, pour par exemple, suivre l'évolution de l'IFT (Nandillon

et al., 2024), ou d'autres performances comme les rendements et marges brutes dans notre cas. Dans notre échantillon (variétés pures et mélanges variétaux de blé dans les 36 paires étudiées), nous n'avons pu retracer les rendements et marges brutes dans le temps que pour quatre cultures de blé pur et six cultures de blé en mélange variétal, et ce sur seulement deux années dans la majorité des cas (Figure 1.1.5), ce qui ne permet pas de conclure avec robustesse sur les variations/la stabilité interannuelles des rendements. Ainsi, notre méthode ne se prêtait pas à une étude sur les variations interannuelles de rendements ou marges brutes. Retracer les variétés pures et les mélanges dans le temps avec les données du réseau DEPHY pourrait se faire – au moins dans un premier temps – sans chercher à les comparer deux à deux. Une étude plus complète sur ce volet pourrait aussi bénéficier d'une extraction plus récente de la base de données.

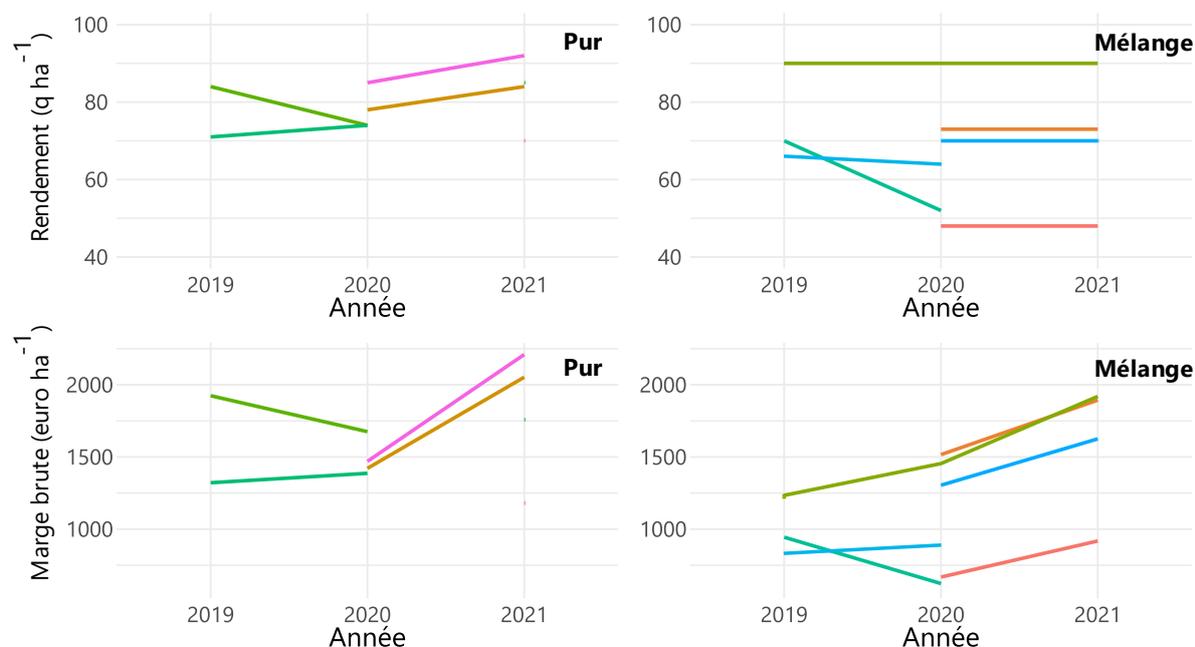


Figure 1.1.5 : Rendements et marges brutes pour quatre cultures de blé pur (gauche) et six cultures de blé en mélange variétal (droite) de notre échantillon qui ont pu être suivies dans le temps. Chaque couleur correspond à une culture.

4.3 Limites de l'étude

La principale limite de notre étude est le nombre de cas que nous avons pu étudier. En effet, nous avons restreint notre analyse aux mélanges renseignés après 2019, année à partir de laquelle une case à cocher « Mélange variétal » a été introduite dans le système d'information Agrosyst pour limiter les risques de confusion quant à la nature du blé cultivé. Sur les 433 systèmes de culture comprenant des mélanges variétaux de blé existant dans la

base de données après 2019, nous n'avons pu en décrire complètement (selon les variables agronomiques sélectionnées) et apparier que 36 d'entre eux avec un système de culture comprenant un blé en variété pure. Cette restriction a aussi limité notre capacité à conclure de manière robuste sur la stabilité des rendements et des marges brutes permise par les mélanges variétaux car nous n'avons pu suivre que six mélanges dans le temps, et quatre variétés pures de notre échantillon – et sur une durée restreinte à deux ou trois années.

Dans notre échantillon, tous les mélanges étaient constitués à partir de semences certifiées, alors que les mélanges variétaux peuvent inclure des variétés paysannes, aux caractéristiques parfois très différentes. Des associations constituées de variétés paysannes mériteraient d'être étudiées. En ne prenant pas en compte les variétés contenues dans les mélanges pour constituer nos paires, nous n'avons pas non plus étudié les liens entre caractéristiques des variétés et performances mesurées, bien que les choix variétaux puisse fortement conditionner les performances des mélanges. Toutefois, les résultats de Coupery (2023) montrent que dans le réseau DEPHY, les variétés les plus cultivées en mélange sont aussi les variétés les plus cultivées en pur.

Enfin, pour limiter les biais d'échantillonnages, plutôt que de construire les paires sur la base d'une distance minimale, il pourrait être pertinent d'établir une fourchette de distance au sein de laquelle tester plusieurs paires possibles.

5 Conclusion

Nous avons montré que les mélanges variétaux permettent bien de réduire l'utilisation de fongicides, bien que cela semble varier selon les niveaux de pression observés chaque année. En revanche, sur les aspects de production, les mélanges variétaux n'ont pas été plus performants que les variétés pures, avec une perte de $-5,0\%$ en moyenne.

Ainsi, les intérêts agroécologiques des mélanges variétaux de blé ne sont pas systématiques. Cette pratique est la plus simple des pratiques de diversification à implémenter, mais ses capacités de régulation des bioagresseurs sont aussi les plus limitées, ce qui suggère qu'elle serait surtout intéressante en combinaison avec d'autres pratiques (Tibi et al., 2023). Par ailleurs, notre étude étant basée sur le réseau DEPHY, les IFT sont déjà initialement bas en comparaison aux moyennes nationales, et les agriculteurs et agricultrices du réseau mettent en œuvre une diversité de pratiques en vue de réduire les utilisations d'intrants chimiques de

manière globale sur les systèmes de culture. Les mélanges variétaux pris de manière isolée – comme nous le faisons dans notre étude – n’ont donc peut-être pas vocation à réduire les intrants, ni même à augmenter les rendements ou marges, même au sein du réseau DEPHY.

Enfin, des avancées sur les règles d’assemblage de variétés pour la lutte contre les bioagresseurs pourraient aider les agriculteurs et agricultrices à mieux choisir leurs variétés pour répondre à un objectif de réduction des pesticides. Les mélanges variétaux constituent néanmoins un bon point de départ vers l’intégration de pratiques de diversification, car ils présentent l’avantage de simplifier le travail sur les exploitations agricoles (Enjalbert et al., 2019 ; Coupery, 2023).

SOUS CHAPITRE 1.2 : IMPACTS ET PERFORMANCES DES MÉLANGES D'ESPÈCES EN CONDITIONS AGRICOLES

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS

Les études expérimentales réalisées à ce jour ont démontré les avantages agronomiques et environnementaux des mélanges d'espèces, ce qui en fait une pratique de diversification essentielle pour réduire les intrants chimiques dans l'agriculture. Cependant, les mélanges d'espèces restent très peu pratiqués dans les systèmes de culture européens, en particulier dans les systèmes de grande culture. Peu d'études se sont focalisées sur le point de vue des agriculteurs et agricultrices ou ont utilisé des données récoltées en conditions agricoles réelles pour évaluer les performances des mélanges au sein des exploitations agricoles. Nous présentons ici une **analyse quantitative** des données recueillies dans les **fermes du réseau DEPHY**, un réseau de fermes de démonstration dont l'objectif est de montrer que l'utilisation des pesticides peut être réduite grâce à des changements dans les pratiques agricoles. Nous avons concentré notre étude sur quatre espèces principales en France : le **blé tendre** (*Triticum aestivum* L.), l'**orge** (*Hordeum vulgare* L.), le **pois** (*Pisum sativum* L.) et le **colza** (*Brassica napus* L.). En nous plaçant dans des systèmes de grande culture ou polyculture-élevage conduits en agriculture conventionnelle, nous avons effectué des **tests de comparaison par paires entre les cultures pures et les mélanges** pour chaque espèce (16 paires pour le blé d'hiver, 12 pour l'orge d'hiver, 15 pour le pois et 31 pour le colza) afin de comparer l'utilisation de **pesticides** (herbicides, fongicides, insecticides et tous les pesticides combinés), d'**engrais minéraux azotés** et la **marge brute**.

Sur les intrants, nous avons montré que :

- L'utilisation de **pesticides** était **réduite en moyenne de 40 à 50 %** dans le cas des mélanges d'espèces à base de **blé** et **d'orge** par rapport aux cultures pures de blé et d'orge, respectivement ;
- L'utilisation de **pesticides** pour le **pois** a été **réduite de 72 % en moyenne** ;
- L'utilisation d'**engrais azotés** a également été **réduite jusqu'à 38 % pour le blé**.

En revanche, dans le cas du **colza**, qui est principalement cultivé en association avec des **plantes compagnes non récoltées**, nous n'avons **pas constaté de différences significatives** dans l'utilisation de pesticides ou d'engrais entre les cultures pures et les cultures en mélanges. Cela suggère que les agriculteurs et agricultrices doivent choisir soigneusement les plantes compagnes en fonction de leurs objectifs et des services souhaités. Enfin, nos résultats montrent que les mélanges d'espèces ont un **impact négatif sur les marges brutes pour le blé**, mais que les **marges brutes sont maintenues pour les mélanges à base d'orge, de pois et de colza** par rapport aux cultures pures.

ARTICLE EN ANGLAIS – INTERCROPPING ON FRENCH FARMS: REDUCING PESTICIDE AND N FERTILISER USE WHILE MAINTAINING GROSS MARGINS

Published in *European Journal of Agronomy*, Volume 152, January 2024

Authors: Elodie Yan^a, Nicolas Munier-Jolain^b, Philippe Martin^a, Marco Carozzi^a

^a Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SADAPT, F-91120 Palaiseau, France

^b Université Bourgogne-Franche-Comté, INRAE, Institut Agro Dijon, UMR Agroécologie, F-21000 Dijon, France

DOI : 10.1016/j.eja.2023.127036

1 Introduction

Intensive and specialised agriculture primarily uses chemical inputs that harm human health (Tudi et al., 2021; WHO, 1990) and the environment, e.g., by eroding biodiversity and degrading water and soil quality (Matson et al., 1997; Tilman et al., 2002). Meeting the global demand for food and feed while reducing the negative impact of agriculture on the environment is a major present-day challenge. Diversifying agricultural systems is a suitable strategy to achieve these objectives as it enables the restoration of ecosystem services (Beillouin et al., 2021; Lin, 2011; Raseduzzaman & Jensen, 2017) and reduces dependence on chemical inputs, such as fertilisers and pesticides.

Intercropping, which consists of growing two or more crop species simultaneously on the same field (Willey, 1979), is a promising diversification practice. Experimental studies have shown that intercropping can improve weed control in arable farming by ensuring soil cover and increasing competition (Corre-Hellou et al., 2011; Hauggaard-Nielsen & Jensen, 2005). The morphological and physiological differences between the cultivated species can create barriers that limit the spread of diseases and pests (Boudreau, 2013; Finckh et al., 2000). Intercropping further improves crop quality, particularly in the case of cereal–legume associations, by increasing the amount of mineral nitrogen available in the soil and, therefore, the protein content in cereal seeds (Bedoussac et al., 2015; Li, Stomph, et al., 2023). In some cases, intercropping can stabilise or even increase yields (Lithourgidis et al., 2011; Malézieux et al., 2009). According to experimental results, intercropping is a relevant lever for reducing the use of chemical inputs while maintaining a certain quality and quantity of production (Bedoussac et al., 2015; Lithourgidis et al., 2011). Intercropping could also substantially contribute to achieving the goals of Ecophyto, the French National plan to reduce pesticide use by 50% by 2025. This plan was developed under the framework of the European Directive 2009/128/EC

and encourages the demonstration of good farming practices to reduce dependence on pesticides.

Despite all its advantages, intercropping is still a niche practice in France as well as in Europe (Mamine & Farès, 2020; Timaeus et al., 2022), particularly in non-organic farming (Verret et al., 2020). According to Land Parcel Identification System data (IGN, 2023), intercropping accounted for only 3% of French arable land in 2020. Several factors seem to limit the spread of intercropping, including technical difficulties linked to sowing, harvesting and sorting crops on farms (Mamine & Farès, 2020; Timaeus et al., 2022; Verret et al., 2020); economic issues due to limited outlets when cooperatives do not collect grain mixtures because they are not equipped to sort grains (Bedoussac et al., 2015; Mamine & Farès, 2020); and farmers' psycho-social reluctance to adopt such an innovation (Bonke et al., 2021; Bonke & Musshoff, 2020).

Though addressing these obstacles to the broader adoption of intercropping is necessary, it is also crucial to understand how farmers manage crop mixtures in practice and whether on-farm intercropping actually delivers the advantages demonstrated in field or plot experiments. Recent research based on farmer interviews, such as Enjalbert et al. (2019) and Verret et al. (2020) in France and Timaeus et al. (2022) in Germany, has moved towards understanding farmers' satisfaction with intercropping. These qualitative studies aimed to show the diversity of intercrops effectively grown and highlight the obstacles to their adoption but included only small samples of farmers.

To our knowledge, apart from field trials, no study has yet verified the performance of crop mixtures on farms, looking at both inputs (pesticides and fertilisers) and production factors. This paper presents a quantitative study of the effects of intercropping on pesticide use, nitrogen fertilisation and gross margins of major crops in France based on data collected from farms across the country. Our analysis aimed to show the effects of intercropping under actual farming conditions and highlight this practice's agronomic and environmental benefits.

2 Material and methods

2.1 Data from a demonstration farm network: The DEPHY network

The DEPHY network is a French nationwide demonstration farm network created in 2010 as part of the Ecophyto National Plan. The DEPHY network aims to demonstrate that reducing the use of pesticides is possible through changes in agricultural practices. The

network started with 178 farmers at its inception, and by 2016, more than 3000 farmers had joined and committed to reducing their pesticide use. The network covers seven major French production sectors (i.e., arable field crop, crop–livestock mixed farming, vegetables [both outdoor and protected], ornamental crops, tropical crops, viticulture and arboriculture). Participating farmers are gathered into local groups of 10 to 15 and regularly share their experiences with each other. One cropping system per farm is monitored and described year after year. Information on crops grown and management details, such as fertilisation, pesticide use, tillage and economic performance, is collected and entered into a database (the AGROSYST Information System). The database used for this study included 27,711 farm–years between 2010 and 2023.

2.2 Crop species

We focused our study on four of the most cultivated crops in France that may also be grown as intercrops: winter wheat (*Triticum aestivum* L.), winter barley (*Hordeum vulgare* L.), peas (*Pisum sativum* L.) and rapeseed (*Brassica napus* L.). According to the French annual agricultural statistics (Agreste, 2020a), winter wheat (referred to as “wheat” hereafter) was the most cultivated crop in France in 2020, covering approximately 34% of the country’s total arable crop area. Winter barley (referred to as “barley” hereafter) was the third most cultivated (behind maize) with approximately 10% of the arable crop area. Although maize was the second most cultivated crop, we did not focus on this crop as we could only identify three intercropped maize in the database. Rapeseed was the most cultivated oilseed crop and peas were the most cultivated protein crop, with 9% and 2% of the arable crop area, respectively.

Because the DEPHY network aims at reducing pesticide use, farmers belonging to the network are likely to implement multiple practices to this end. Therefore, reductions in pesticide use cannot be easily attributed to a single practice – in our case, intercropping. To ensure that any differences in pesticide use, nitrogen fertiliser use, and gross margin actually resulted from intercropping, we compared the intercrops involving wheat, barley, peas or rapeseed with their corresponding sole crop (i.e., sole wheat, barley, peas or rapeseed) grown in cropping systems in which we noted similar characteristics.

2.3 Selection and characterisation of the cropping systems

We focused our analysis on two production sectors out of the seven available in the DEPHY database: the arable field crop and crop–livestock mixed farming, as these production sectors included wheat, barley, peas and rapeseed. Inspired by the work of Lechenet et al. (2016), we selected cropping systems with wheat, barley, peas and rapeseed either intercropped or as sole crops and, from the database, computed 36 agronomic variables that may affect the use of pesticides. These variables concern diversity in the crop sequence (e.g., proportion and number of different crops), length of the crop sequence, sowing periods, tillage and irrigation and are detailed in Annex 1.

Organic farms were excluded due to the restricted use of chemical pesticides, which would have introduced bias in our analysis. Moreover, we excluded farms with incomplete information on crop succession and sowing operations. Finally, our dataset was narrowed down to n=2252 cropping system–years (1067 for arable field crops, 1185 for crop–livestock mixed farming) fully described by the 36 selected agronomic variables. Table 1.2.1 shows the repartition of sole crops and intercrops between field crop and crop–livestock production system for each studied crop.

Table 1.2.1: Number of farm–years with sole crops and intercrops involving wheat, barley, peas or rapeseed.

	Wheat	Barley	Peas	Rapeseed
Number of cropping systems with sole crops	1813	936	122	860
- field crop production system	881	465	90	491
- crop–livestock production system	932	471	32	369
Number of cropping systems with intercrops	16	12	30	31
- field crop production system	4	4	5	21
- crop–livestock production system	12	8	25	10

2.4 Paired comparison and statistical analysis

The intercrop–sole crop pairs were selected using the Euclidean distance between cropping systems. First, we calculated a matrix of Euclidean distances (function “dist”, R package “stats”, R-software version 4.1.3) between cropping systems based on the 36

agronomic variables (Annex 1). All data were normalised before the matrix computation. In the DEPHY database, pesticide use for wheat, barley and rapeseed is generally lower in crop–livestock mixed farming than in arable field crop farming (Annex 4). Therefore, we paired each cropping system that included an intercrop with the closest cropping system that included the corresponding sole crop based on the minimal distance within the same production sector (arable field crop or crop–livestock mixed farming) and within the same geoeconomic area, as defined by CERESCO & Terres Inovia (2021), based on pedoclimatic conditions, production potential and socio-technical context (Annex 4). For example, each wheat-based intercrop grown in a crop–livestock mixed farm was compared with the sole wheat crop from the least-distant cropping system in another crop–livestock mixed farm and within the same geoeconomic area.

Some intercrops had several corresponding sole crops with the same minimal distance. Considering all the possible couples in our analysis would have biased the results as it would have multiplied the observations from the same intercrop, thus over-estimating the effects of the intercrop. To avoid such biases, we chose to perform the analysis on each possible combination and evaluate the deviation between these combinations. For example, if an intercrop had two possible corresponding sole crops (i.e., with the same minimal distance to the intercrop), we created a dataset for each and performed the analysis (i.e., the paired comparisons for pesticide use, nitrogen fertilisation and gross margin, detailed hereafter) on each dataset. Then, we calculated the coefficient of variation between the results of each of the two analyses to test the variability of the datasets. Figure 1.2.1 illustrates this methodology using an example with three intercrops: intercrop A is paired with sole crop A1, and intercrops B and C both have two possible sole crops to pair with (sole crops B1 and B2, and sole crops C1 and C2, respectively). In this example, there are four possible combinations, leading to four datasets on which the analyses would be performed.

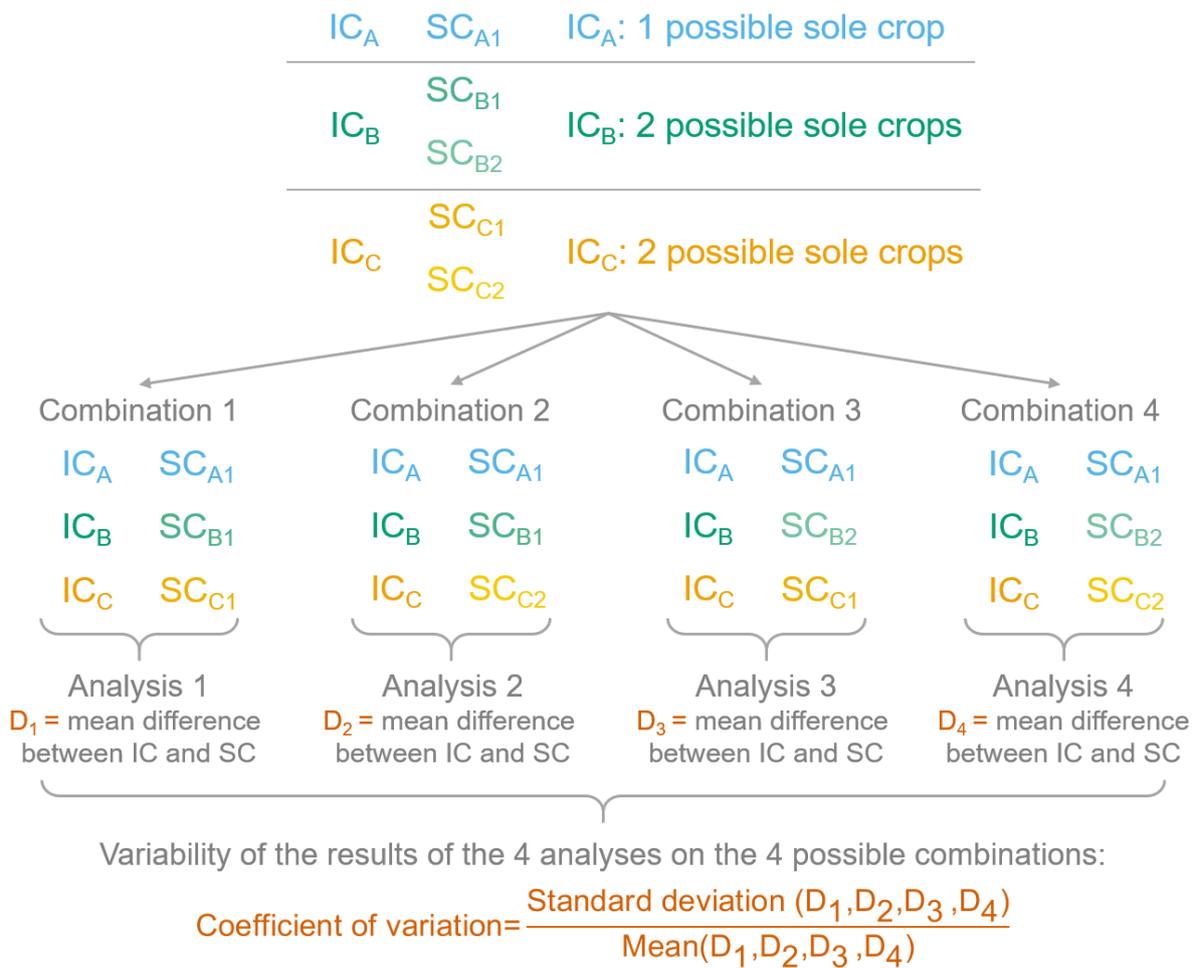


Figure 1.2.1: Methodology used to test the variability of the datasets when one intercrop (IC) could be paired with several equidistant sole crops (SCs).

Using the sole crop-intercrop pairs, we compared pesticide use, fertiliser inputs and gross margins between intercrops and sole crops. We used the Treatment Frequency Index (TFI) as a metric for pesticide use. This index is used to monitor the frequency and intensity of pesticides applied at different spatial scales (e.g., crop, cropping system, groups of cropping systems). In our study, we considered the TFI at the crop scale following Pingault et al. (2009):

$$TFI = \sum_T \frac{\text{Applied Dose}_T}{\text{Reference Dose}_T} * \frac{\text{Treated area}_T}{\text{Total area}_T}$$

For each treatment T on the considered crop, the applied dose per hectare is normalised to the reference dose per hectare. The crop-scale TFI is then calculated as a weighted sum of all normalised doses for the considered crop, with weights being the ratio of the treated area over the total area of the considered crop. The reference dose we used to compute TFI was the unique registered dose for the plant protection product on the considered crop for the targeted pest/weed/disease, based on the marketing authorisation database (E-Phy, ANSES,

2023). For the seed coating, the TFI is computed over the quantity of treated seeds: if all seeds were treated, then the TFI is 1; in the case of an intercrop with, for example half the seeds treated and the other half not treated, then the TFI is 0.5. Our study used TFI computed for four distinct categories:

- All types of pesticides (e.g., herbicides, fungicides, insecticides, seed coating, fumigants, molluscicides) plus growth regulators, excluding biopesticides and “low-risk” pesticides according to French legislation
- All herbicides, excluding biopesticides and “low-risk” pesticides according to French legislation
- All fungicides, excluding seed coating, biopesticides and “low-risk” pesticides according to French legislation
- All insecticides, excluding seed coating, biopesticides and “low-risk” pesticides according to French legislation

We chose not to analyse in details the TFI for growth regulators or pesticides such as fumigants and molluscicides as they were all aggregated in one “Other” category (so we could not tell them apart). Similarly, all types of seed coating (insecticide seed coating and fungicide seed coating) were aggregated in a total “Seed coating” category, so we did not analyse the TFI for seed coating in detail either.

We used the total amount of mineral nitrogen applied to the crop during the whole growing period (in kg N ha⁻¹) as a metric for fertilisation inputs.

We used the gross margin (€ ha⁻¹) as a metric for crop profitability, defined as:

$$\text{Gross margin} = \text{Gross product} - \text{Operating costs}$$

where the gross product is the product of yield and selling price (provided by the DEPHY “hub coaches” who coordinate the DEPHY groups and are also in charge of filling in the DEPHY database with farmers’ data) and operating costs include, e.g., seed, seed coating, fertilisation, pesticide and irrigation costs. In the database, crops that were self-used on the farm (e.g., for animal feed) were assigned a gross product value corresponding to the value they would have had if they had been sold. In order to compare gross margins between farms that may have different levels of self-use, the farm gross margin was calculated taking into account both the self-used and the sold parts of the production. We chose to analyse the gross margin rather than the gross product because we assumed that intercrops can affect the gross product (by affecting yields) as well as the operating costs, and the gross margin better reflects

the balance between the effects of intercropping on the gross product and those on the operating costs.

Finally, we compared the TFI, N fertilisation and gross margin between the sole crops and intercrops using Wilcoxon signed-rank test (or paired samples Wilcoxon test), as normality of our data was not confirmed for all indicators. This test compares two groups of observations with the specification that an observation from one group is paired with another observation from the other group. Figure 1.2.2 recapitulates the study methods, from cropping system selection to data analysis.

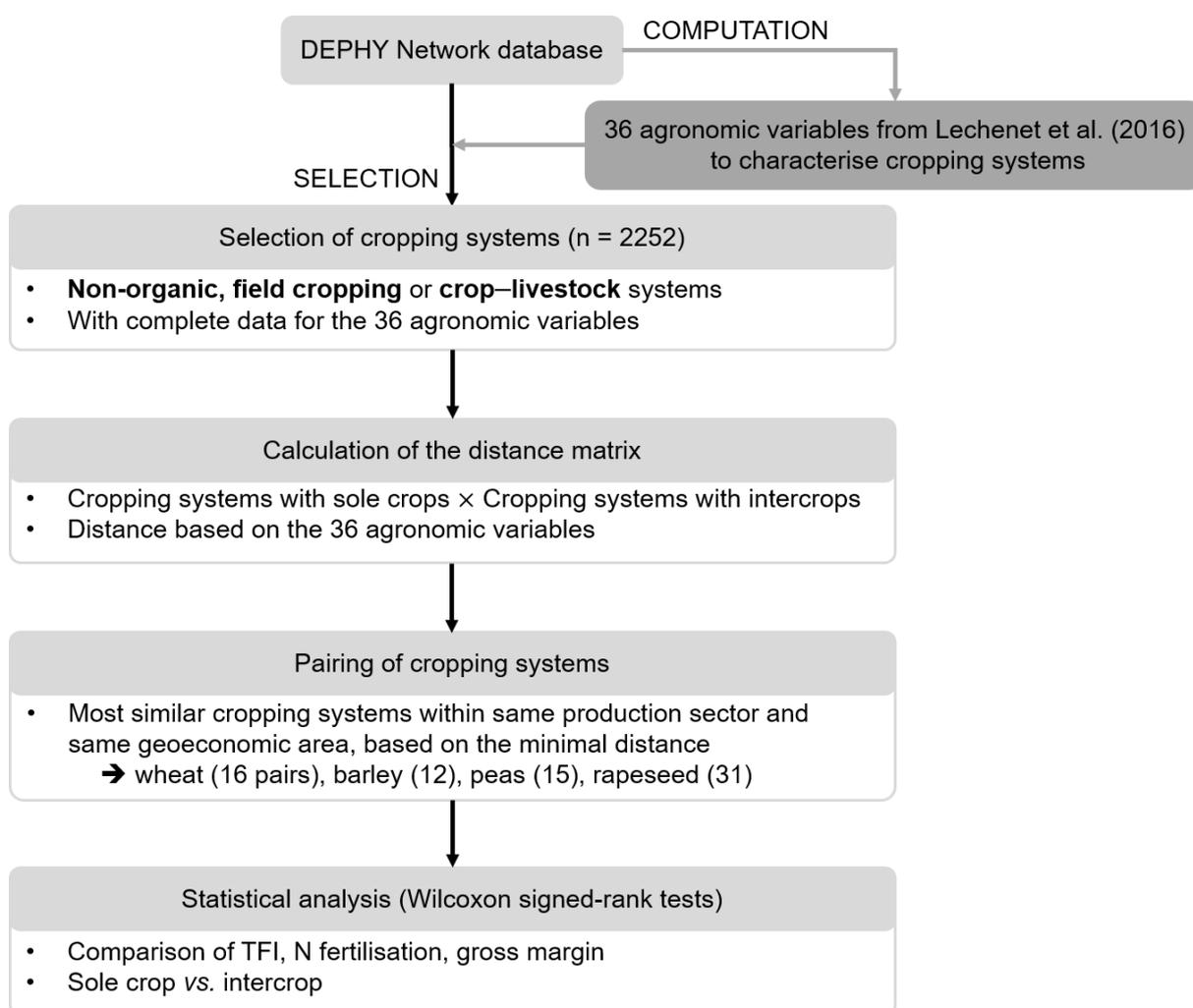


Figure 1.2.2: Flowchart of the study methods, from data selection and pairing to statistical analysis. TFI, treatment frequency index; N, nitrogen.

3 Results

In this section, we first present the results of the analyses conducted over all possible combinations between intercrops and sole crops for the studied crops. Then, we present the results of the paired comparisons of TFI, N fertilisation and gross margin for one combination. In the following, an increase (or decrease) in an indicator refers to an increase (or decrease) in that indicator for the intercrop compared with the corresponding sole crop.

3.1 Variability of intercrop–sole crop combinations

We obtained one possible combinations for wheat (each intercrop only had one sole crop at the minimal distance), two for barley (one intercrop had two equidistant sole crops), 32 for peas (three intercrops had two to four equidistant sole crops) and 24 for rapeseed (four intercrops had two to three equidistant sole crops). In each possible combination, we had 16 pairs for wheat, 12 for barley, 15 for peas and 31 for rapeseed. For wheat, barley, and rapeseed, we were able to pair each intercrop identified in Table 1.2.1 to a sole crop within the same production sector and the same geoeconomic area. For pea, as there were less possible sole crops (122 in total), we could not manage to pair all the 30 intercropped peas identified in Table 1.2.1 by respecting the criteria on production sector and geoeconomic area. The location of the pairs for each crop species in the different geoeconomic areas are shown in Annex 4.

To assess the variability of our results, we computed the coefficient of variation of the mean intercrop – sole crop difference over all the possible combinations (Figure 1.2.1) for each species and indicator (TFI, N fertilisation, gross margin). Between the two possible combinations for barley crops, the coefficients of variation for TFI, N fertilisation and the gross margin were 0%. For the 15 combinations of pea crops, the coefficients of variation for TFI varied from 0.0006% for insecticides to 11% for fungicides. The coefficient of variation for N fertilisation of peas was 2.5%, and that for the gross margin was 22%. For the 24 combinations of rapeseed crops, the coefficients of variation for TFI varied from 0% for both insecticides and fungicides, to 0.01% for herbicides. The coefficient of variation for N fertilisation of rapeseed was 0% and that for the gross margin was 0.4%. Wheat had a unique combination, so calculating a coefficient of variation was not relevant in this case.

For barley and rapeseed, the p-values were homogeneous for all indicators across all the different combinations, which means that the significance of the results was stable across

the combinations. For peas, the results were significant for total, fungicide and herbicide TFI and N fertilisation ($p < 0.05$), but they were not significant for the insecticide TFI in 16 of the 32 combinations (p -value varied between 0.035 and 0.059 over the combinations). Overall, we found little variability in the results across the different combinations. Therefore, in the following sections, we present the results for a random combination for barley, peas and rapeseed, and we present the results of the unique combination for wheat. Data on TFI, N fertilisation and gross margin corresponding to the presented combinations are represented on boxplots in figures 3, 4 and 5 respectively. Results of the Wilcoxon signed-rank tests for the presented combinations are reported in Figure 1.2.6.

3.2 Pesticide use

Our results show a significant overall reduction in the TFI for intercrops compared with sole crops for wheat, barley and peas (Figure 1.2.6). Considering all the pesticide categories, TFI was reduced on intercropped wheat by -1.18 (or -42.5% , $p < 0.01$) on average compared with sole wheat (Figure 1.2.6). This reduction was of a similar magnitude for intercropped barley compared with sole barley crops (-1.87 or -51.0% , $p < 0.01$) and was the highest for intercropped peas compared with sole pea crops (-2.67 or -72.0% , $p < 0.05$) (Figure 1.2.6). We also noticed that the interquartile range for intercropped pea TFI was much smaller than that of sole peas, though we did not observe such a difference between sole crops and intercrops for the other species (Figure 1.2.3). For both wheat and peas, only one intercrop has a higher TFI than its corresponding sole crop, for peas, there are only two (Figure 1.2.3). Rapeseed sole crops and intercrops showed no significant difference in the TFI ($p > 0.05$).

The herbicide TFI in intercrops was significantly reduced for barley (-0.94 , $p < 0.05$) and peas (-0.75 , $p < 0.05$) compared with sole crops (Figure 1.2.6). We noted a non-significant decrease in the herbicide TFI for intercropped wheat (-0.73 , $p > 0.05$) and a non-significant increase of $+0.27$ in the herbicide TFI for rapeseed cultivated in intercrops (Figure 1.2.6). However, this increase was not significant ($p > 0.05$).

A reduction in the fungicide TFI was observed for all intercrops, though this reduction was not significant for wheat and rapeseed ($p > 0.05$). The fungicide TFI was reduced by -0.63 ($p < 0.05$) for barley and -1.20 ($p < 0.05$) for peas (Figure 1.2.6).

For insecticides, our results showed no significant difference in the TFI for wheat, barley and rapeseed ($p > 0.05$). In particular, for barley all insecticide TFI equal to zero, except for one intercrop (Figure 1.2.3), which also explains why there is no confidence interval on Figure 1.2.6. For peas, we observed a significant average reduction of -1.0 ($p < 0.05$; Figure 1.2.6).

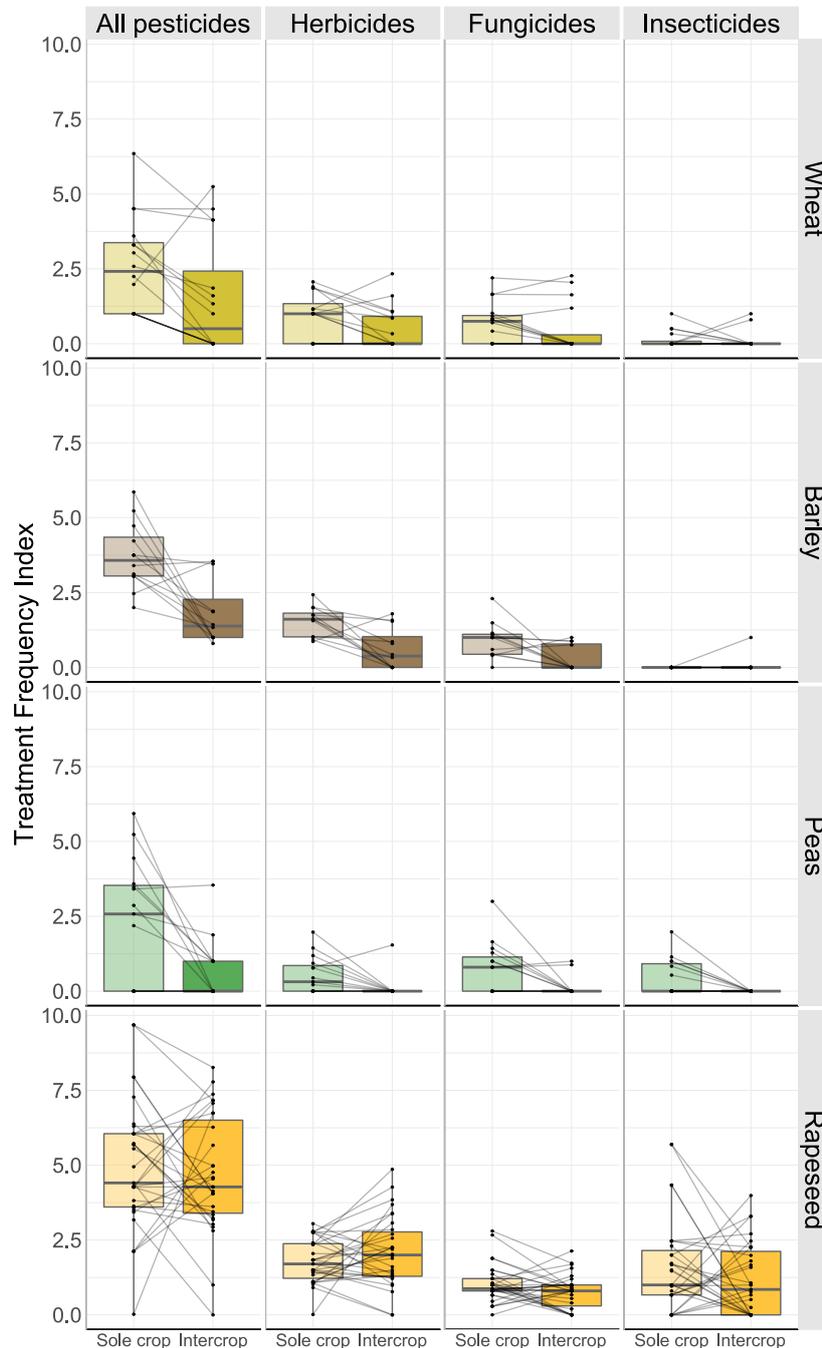


Figure 1.2.3: Treatment Frequency Index for wheat, barley, pea and rapeseed sole crops and intercrops. The boxplots are based on the TFI values for each individual in each group. Black dots represent the individual observations in each group, and black lines connect each intercrop to its corresponding sole crop.

3.3 Nitrogen fertilisation

Our results show a significant reduction of $-61.4 \text{ kg N ha}^{-1}$ (or -37.9% , $p < 0.01$) applied to intercropped wheat (Figure 1.2.6). Although not statistically significant ($p > 0.05$), we observed an average reduction of $-28.3 \text{ kg N ha}^{-1}$ (or -21.5%) for intercropped barley compared with sole barley crops (Figure 1.2.6). Peas, on the other hand, showed a significant increase of $+40.3 \text{ kg N ha}^{-1}$ ($p < 0.001$) (Figure 1.2.6) for intercrops compared with sole crops, which in most cases ($n=9$) did not receive any fertilisation (Figure 1.2.4). For rapeseed, the results did not show any significant difference ($p > 0.05$) between fertilisation on intercrops and sole crops. However, we observed lower variability in the amount of mineral nitrogen applied to intercrops versus sole crops (Figure 1.2.4).

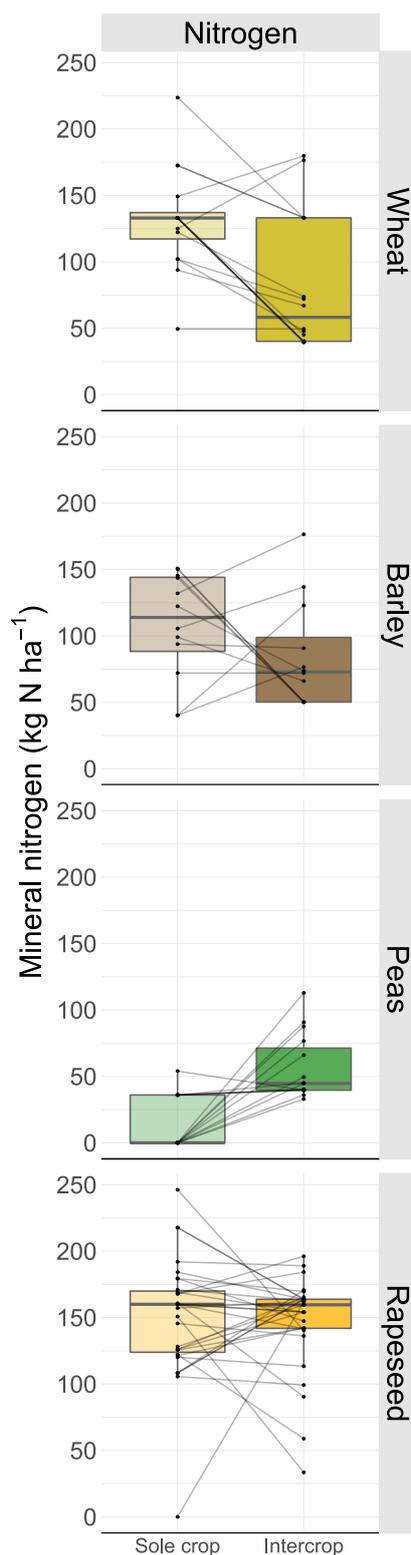


Figure 1.2.4: Amount of mineral nitrogen applied to sole crops and intercrops for wheat, barley, peas and rapeseed. The boxplots are based on the amount of mineral nitrogen applied to each individual in each group. Black dots represent the individual observations in each group, and black lines connect each intercrop to its corresponding sole crop.

3.4 Gross margin

Our results show a significant reduction in the gross margin for intercropped wheat (-339 € ha^{-1} on average, or -24.1% , $p < 0.05$). We also observed a reduction in the gross margin for intercropped barley (-168 € ha^{-1} on average, or -18.5%), but this reduction is not significant ($p > 0.05$). For intercropped peas and rapeseed, our results showed non-significant increase ($p > 0.05$) in gross margins of respectively $+67 \text{ € ha}^{-1}$ (or $+34.2\%$) and $+172 \text{ € ha}^{-1}$ (or $+74.2\%$) compared with sole crops (Figure 1.2.6). The gross margins for intercropped wheat, barley and peas had lower variability than the corresponding sole crops (Figure 1.2.5).

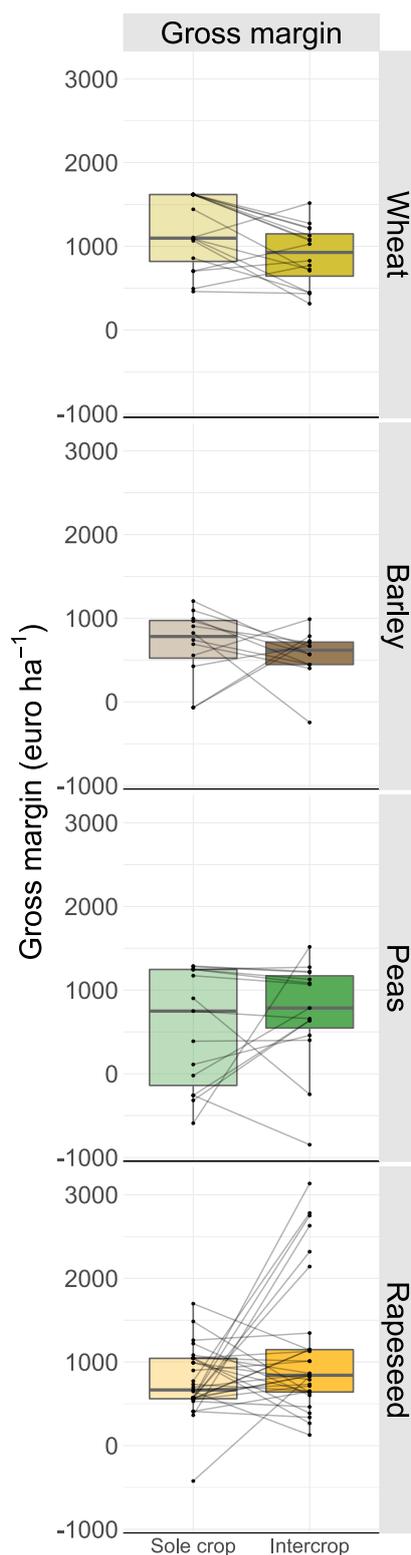


Figure 1.2.5: Gross margin of sole and intercropped wheat, barley, peas and rapeseed. The boxplots are based on the gross margin of each individual in each group. Black dots represent the individual observations in each group, and black lines connect each intercrop to its corresponding sole crop.

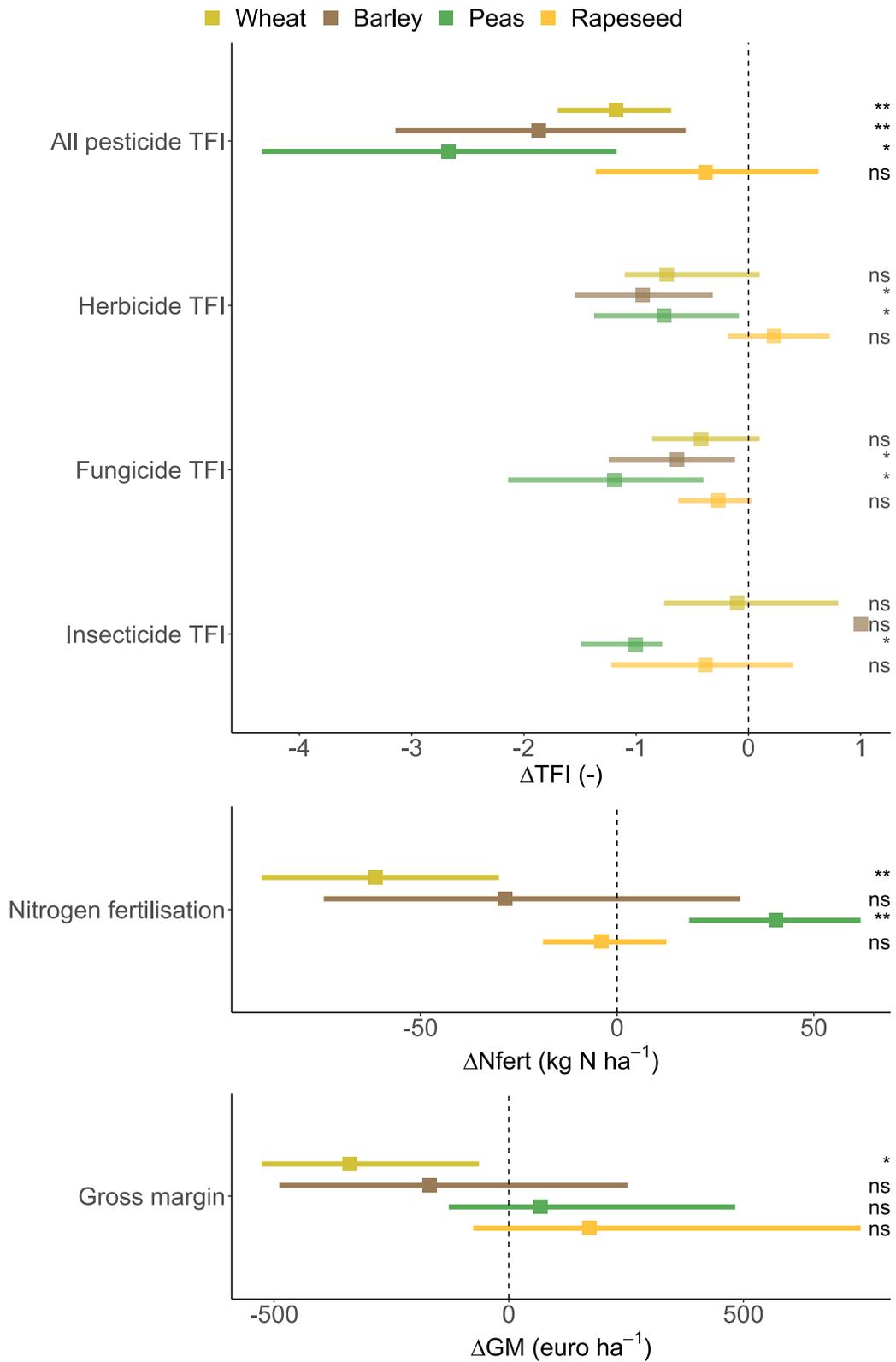


Figure 1.2.6: Average difference between the sole crop and intercrop groups for the Treatment Frequency Indexes (Δ TFI), nitrogen fertilisation (Δ Nfert) and gross margins (Δ GM), estimated by the Wilcoxon signed-rank tests. Points represent the average difference and lines represent the 95% confidence intervals. A negative value indicates a reduction in the intercrop group compared to the sole crop group. The significance codes (ns = $p > 0.05$; * = $p \leq 0.05$; ** = $p \leq 0.01$; *** = $p \leq 0.001$) apply to the Wilcoxon signed-rank tests.

4 Discussion

4.1 Limited number of situations

Our data show a limited number of non-organic farms growing wheat-, barley-, pea- or rapeseed-based intercrops. The majority of the wheat, barley and pea intercrops studied were grown in crop–livestock mixed farms. Verret et al. (2020) and Timaeus et al. (2022) observed similar repartitions, which can be explained by the sorting difficulties that hinder the adoption of intercrops in arable field crop farming (Mamine & Farès, 2020), in which the production is optimised for human food and better remunerated than for animal feed. In the case of wheat–peas intercrops, broken pea grains remaining in the wheat after sorting can negatively affect the wheat flour, which in turn can impact the bread making process (Dabija et al., 2017). On the contrary, cereal–legume intercrops are advantageous in crop-livestock mixed farms as they allow farmers to adapt the composition of the feed ration according to their goals and to increase self-sufficiency for animal feed production (Verret et al., 2020). Most of the rapeseed-based intercrops studied were grown in arable field crop farms. This difference with the other types of intercrops studied can be explained by the nature of the intercrops: rapeseed is mainly intercropped with companion plants that are not harvested, so sorting difficulties are less critical.

4.2 Effects of intercropping on pesticide use

We showed that intercropping enabled TFI reductions of 42 to 50% for wheat- and barley-based intercrops and 72% for pea-based intercrops. The overall TFI was, on average, 1.5 for intercropped wheat, 1.8 for intercropped barley and 0.6 for intercropped peas (Annex 3), which are below the national averages of 5.1 for wheat, 4.4 for barley and 4.6 for peas in France, according to the 2017 “Pratiques culturales” (cropping practice) national survey conducted on 28,000 plots representative of French agriculture (Agreste, 2017). This survey is conducted every five years, but the results of the latest survey (2022) are not available yet. Though our results do not show a significant overall reduction in the TFI for intercropped rapeseed, the average TFI (4.3) was still lower than the national average of 5.7 (Agreste, 2017). It is also worth noting that in the DEPHY data, the average TFIs for pure stands of wheat, barley and peas were lower than the national average, whereas the TFI for pure rapeseed in arable field crop farms in the DEPHY data was equal to the national average (Annex 4).

Our analysis showed a reduction in herbicide use for intercropped barley and intercropped peas. One reason for this might be that the number of available herbicide molecules that are selective for both/all mixed crops and can efficiently control weeds is often limited (more limited than for sole crops). Moreover, in our data, barley was often mixed with legumes, such as peas, thus creating an intercrop highly competitive with weeds (Corre-Hellou et al., 2011; Gu et al., 2021; Hauggaard-Nielsen et al., 2008). Barley and peas were also involved in more complex mixtures with at least another cereal and/or legume (e.g., barley–oat–pea–vetch; Annex 3). Such intercrops have a high coverage potential that can help suppress weeds (Pelzer et al., 2014), thus reducing the need for herbicides. Grown as a sole crop, peas have low competitive ability against weeds (Lemerle et al., 1995). Our results confirmed that intercropping peas can foster stronger competitiveness against weeds: of the 15 sole pea crops studied, 9 received herbicide treatments, whereas only one intercropped peas was treated with herbicide. Though herbicide TFI were not significantly different between intercropped and sole wheat, it is worth noticing that only two intercropped wheat have higher herbicide TFI than their corresponding sole crops (Figure 1.2.3), and all the wheat–legume intercrops have null herbicide TFI (Annex 3) so the competitive ability of wheat–legume intercrops may still apply. As for rapeseed, we did not observe a significant difference in herbicide use, although it seems that in some cases, more treatments were applied to intercropped rapeseed than sole rapeseed crops. In our dataset, rapeseed was mainly intercropped with legume companion plants that are not harvested (e.g., faba beans, white clover and/or common vetch). Companion plants can help reduce weeds in rapeseed crops but cannot totally suppress weeds (Lorin et al., 2015; Verret et al., 2017), and some plants have better control over weeds than others. According to Emery et al. (2021), spring faba beans and clover are better suited to controlling weeds than winter faba beans and peas. Herbicides are then likely to be used if the farmer is unsatisfied with the weed control provided by the companion plant (Verret et al., 2020). Moreover, though most companion crops are frost-sensitive legumes, frost may not be enough to destroy them, so chemical weeding may still be necessary.

Our results show a net reduction in fungicide use for wheat-, barley- and pea-based intercrops. Although the reduction was not significant for wheat, we found that of the 16 sole wheat crops studied, 10 were treated with fungicides, whereas only four wheat intercrops received fungicides. Notably, no wheat–legume intercrops received fungicides. Eleven of the 12 sole barley crops studied received a fungicide treatment, whereas only four barley intercrops

were treated with fungicides. Only two pea intercrops were treated with fungicides (vs. eight sole pea crops). These observed reductions in fungicide treatments are consistent with the barrier effect created by the species mixtures, which limit the spread of diseases (Boudreau, 2013; Finckh et al., 2000). We did not observe any differences in fungicide treatments in rapeseed intercrops versus sole crops. According to Cadoux & Sauzet (2016), no study has yet shown the effect of companion plants on rapeseed diseases. Furthermore, the barrier effect observed in wheat-, barley- and pea-based intercrops is less likely to work for rapeseed because the rapeseed companion plants are destroyed (either by frost or weeding, usually during the winter) and cannot mechanically protect the rapeseed until the end of its growing cycle.

We did not observe any decrease in the insecticide TFI, except for pea-based intercrops. The insecticide TFI was already close to zero in the wheat and barley sole crops and could therefore hardly be decreased by intercropping. Insecticide treatments for cereals, such as wheat and barley, are primarily done through seed coating, which was not included in our insecticide TFI metric. Our data (Annex 3) show that of the 16 pure wheat stands, 14 were sown using coated seeds, and one of the remaining two, that was not sown using coated seeds, received an insecticide treatment. Among all the wheat-based intercrops, six were sown using coated seeds, whereas none of the wheat–legume intercrops (n=9) used coated seeds. Barley seed coating was used for both sole crops and intercrops (12 sole crops, 10 intercrops). Regarding peas, we observed a reduction in the insecticide TFI for intercrops, which suggests that the mixture may have helped establish natural predators of pea pests (Puliga et al., 2023) and/or created a barrier effect (Ratnadass et al., 2012). For rapeseed, there was no difference in the insecticide TFI between sole crops and intercrops. The effects of companion plants on rapeseed pests in the literature are nuanced: although companion plants can favour natural predators and create a barrier or even a repellent effect, these effects may not necessarily be sufficient to reduce the use of insecticides (Cadoux et al., 2015). Furthermore, depending on the chosen companion plants, the effects on insects are not always beneficial. In an experiment by Emery et al. (2021), faba bean companion plants did not reduce the damage caused by pollen beetles compared with sole rapeseed crops, and the association with berseem clover even resulted in more significant damage. Lastly, the rapeseed–companion plant association can be effective against adult cabbage stem flea beetles but not always against larvae (Breitenmoser et al., 2020).

4.3 Effects of intercropping on mineral nitrogen fertilisation

Our results showed a 38% reduction in the amount of mineral nitrogen applied to intercropped wheat compared with sole wheat. This result is in line with other research showing that cereal–legume intercrops enable better use of soil nitrogen (e.g. Jensen et al., 2020; Rodriguez et al., 2020). However, this decrease was less marked for intercropped barley. Although fertilisation needs can be reduced by cereal–legume intercrops, depending on the farmer’s objectives, mineral fertilisation can be employed as an adaptation tool. If they aim to obtain fodder, then even a small amount of nitrogen will result in higher productivity for a barley–pea intercrop, as Cowden et al. (2020) reported. If the farmer needs to grow a larger proportion of cereals than legumes, then applying mineral nitrogen will negatively affect biological nitrogen fixation by the legumes, reducing their growth (Ghaley et al., 2005; Naudin et al., 2010). This also explains the increase in nitrogen applied to intercropped peas in our results, whereas no application was necessary for sole pea crops. Conversely, combining rapeseed with companion plants has a major advantage as it helps improve the nitrogen nutrition of the rapeseed via the indirect transfer of nitrogen through the mineralisation of the companion plant residues (Cadoux et al., 2015; Lorin et al., 2016). However, our analysis did not show any significant reduction in the amount of nitrogen applied to the intercropped rapeseed, though it was reduced for 19 out of the 31 rapeseed intercrops. The need for fertilisation for rapeseed-based intercrops can be highly dependent on various factors, such as the date of the destruction of the companion plant (the use of herbicides can lead to later destruction than by frost, thus reducing the period of mineralisation of the companion plant), the soil mineral nitrogen content and the species chosen as companion plants (Lorin et al., 2016). However, for the 19 cases where nitrogen fertilisation was reduced, the average reduction was 32 kg N ha⁻¹ (Figure 1.2.4). This finding is consistent with the results of Lorin et al. (2016), which show that choosing the best legumes for the circumstances can reduce nitrogen fertilisation by 20–40 kg ha⁻¹. This reduction is also close to that of 30 kg N ha⁻¹ observed by Cadoux et al. (2015).

4.4 Effects of intercropping on gross margins

For wheat, there were only four cases out of 16 in which the gross margin of the intercrop was better than that of the sole crop, thanks to improved gross production and lower production costs for the intercrops (Annex 3). This may be linked to the intercrops’ greater

resilience to weeds and diseases (Li, Stomph, et al., 2023), possibly resulting in a reduction in herbicide and fungicide use. Otherwise, in 12 cases, gross production was lower in intercrops than in sole crops and lower production costs did not compensate for this reduction, so there was a significant gross margin loss. Conversely, in the case of barley, a possible increase in intercropping production costs was offset by higher gross production, which limited the reduction in the gross margin or even improved it. For peas, in 6 out of the 15 cases, lower production costs compensated for lower gross production thus resulting in better gross margin, and in one case, lower cost production and better gross production led to a better gross margin than the corresponding sole crop (Annex 3). Pea production can be improved in intercrops thanks to the staking function of cereals, which limits the lodging of the pea and therefore allows for a better harvest (Kontturi et al., 2011; Verret et al., 2020). The reduction in pesticide-related costs partly offset the increase in nitrogen-related costs. All in all, our results tend to show a decrease in gross margins for intercropped cereals compared to sole cereals (–24 % for wheat to –18% for barley), but increase in gross margins for intercropped legumes (+34% for peas). As cereals such as wheat and barley are often intercropped with legumes such as peas, a decrease on one side (cereals) may be compensated by an increase on the other side (legumes).

We observed higher gross production for intercropped rapeseed in 17 out of the 31 cases (Annex 3). In all 17 cases, this resulted in a higher gross margin (even with additional production costs in seven cases). We did not observe any significant differences in the use of pesticides or nitrogen fertilisation between rapeseed intercrops and sole crops, but intercropping rapeseed tended to improve GMs. Depending on the farmers' objectives, rather than reducing inputs, intercropping rapeseed with companion plants could be a lever for improving production without changing crop management practices. However, some farmers who grew rapeseed with companion plants to promote biocontrol and limit pesticide use eventually abandoned the practice as they did not consider it effective enough in this respect (Verret et al., 2020).

4.5 Limitations of the study and perspectives

Our study compared sole crops and intercrops grown under conditions that were as similar as possible, in terms of pedoclimatic conditions, socio-technical contexts and farming practices. We confirmed an overall reduction in TFI for intercrops compared with sole crops for

wheat, barley and peas, suggesting that intercrops effectively reduced pesticide use in different soil and climate contexts. However, we only focused on four of the most cultivated crops in France. It could be interesting to complete this study with other crops, such as maize. Indeed, as stated in section 2.2, we could not include maize in our study because the database used only presented data for three intercropped maize. In France, intercropped maize is becoming increasingly popular with the maize-lablab intercrop so more data might soon be available to complement our study.

Regulatory aspects on pesticides result in a restricted list of products allowed for use on intercrops and this could have an impact on the TFI. However, such impacts might be stronger on herbicides than on insecticides or fungicides, as using a non-certified herbicide on the intercrop can have consequences such as the destruction of one or several species of the intercrop. In our study, we could not assess the weight of the regulatory aspects on the TFI reduction. In order to better understand the farmers' decisions regarding pesticide use on intercrops, we believe it would be relevant to carry out on-farm surveys with for instance, farmers of the DEPHY network.

For N fertilisation, we only considered mineral fertilisation as we were not able to assess the actual usable amount of nitrogen contained in different types of manures. We were also unable to estimate the fraction of nitrogen released over time, e.g. when organic fertilisation was only applied on the crop rotation head.

One of the most cited obstacles to intercropping is the cost for sorting (e.g. Mamine & Farès, 2020). In our study, sorting costs were not considered as they were not available in our data. However, as most of the cereal–legume intercrops studied are cultivated in crop–livestock mixed farms, they are most likely to be used as such to feed animals, without previous sorting. In the case of rapeseed–based intercrops, most of them being rapeseed–companion plant intercrops, with the companion plant being destroyed at some point, they do not need sorting either.

Finally, farmers' decisions regarding inputs are not conditioned solely by the agronomic variables we used: social aspects, particularly those concerning both the farmer and their farm, can influence these decisions (Darnhofer et al., 2012; Salembier et al., 2015), but no information on these factors was reported in our database. Thus, a more comprehensive study of farmers is needed to better understand their motivation for intercropping and the associated crop management strategies.

5 Conclusion

Our study showed that intercrops enabled conventional arable field crop and crop–livestock mixed farms to reduce pesticide use by 40 to 50% for wheat- and barley-based intercrops and up to 72% for pea-based intercrops. The effect of intercropping on herbicide use was particularly strong, with a decrease of more than 60% for barley and 80% for peas. The effect of fungicides and insecticides was also striking for peas, with reductions of 83% and 100%, respectively. This effect was less clear for insecticides used on wheat and barley as these two crops benefit more from seed coating than insecticide sprays. According to our results, intercropping has the potential to reduce mineral nitrogen fertilisation by up to 38% for wheat without entirely eliminating the need for fertilisation. Finally, by improving production and/or reducing production costs, intercropping does not harm gross margins for barley-, pea- and rapeseed-based intercrops, but has a negative impact for wheat-based intercrops. Rapeseed intercropping mostly consisted in growing rapeseed with unharvested companion plants, and we could not demonstrate any significant effects of this intercropping on pesticide use or nitrogen fertilisation. Plants' trait values can be used to help design rapeseed-companion plant intercrops in accordance with the ecosystem services farmers sought after (Ouattara et al., 2023). Finally, our results show that intercropping efficiently reduces chemical inputs in actual farming conditions, but the effectiveness depends on the types of intercrops. Based on our research, intercropping should be integrated into a broader strategy of integrated pest management. According to the DEPHY data, few farmers grow intercrops in France, especially in conventional arable field crop farms. In order to better promote intercropping, it is necessary to highlight the farming conditions under which intercrops are grown as well as the reasons leading farmers to adopt this practice.

CONCLUSION DU CHAPITRE 1 SUR LES PERFORMANCES DES MÉLANGES ET TRANSITION

Dans ce chapitre, nous avons montré des effets variables des cultures associées sur l'utilisation d'intrants chimiques. Pour les mélanges variétaux de blé tendre, la réduction de fongicides ne semble pas systématique. En revanche, en mélangeant différentes espèces de céréales entre elles ou avec des légumineuses, il est possible d'atteindre des réductions d'utilisation de pesticides plus conséquentes. De même, concernant la production, nous n'avons pas montré de meilleurs rendements pour les mélanges variétaux en comparaison aux variétés pures. Concernant la stabilité interannuelle des rendements conférée par les mélanges, nous manquons de données pour une conclusion robuste. Pour les mélanges d'espèces, nous avons observé de meilleures marges brutes sur le pois en mélange, mais des marges réduites sur le blé en mélange. Pourtant, dans les deux cas (mélanges variétaux de blé et mélanges d'espèces), nous observons une augmentation des surfaces concernées en France.

Initialement, nous avons émis l'hypothèse que les mélanges de variétés, aujourd'hui largement adoptés en France, pourraient être une première étape avant de se lancer dans les mélanges d'espèces. Toutefois, chez les agriculteurs enquêtés par Baptiste Coupery (2023), aucun n'envisageait de cultiver des mélanges d'espèces, alors que certains cultivaient des mélanges de variétés depuis plusieurs années déjà. Aussi, il semblerait que les mélanges de variétés soient souvent cultivés en conditions conventionnelles, tandis que les mélanges d'espèces sont surtout cultivés en agriculture biologique, comme en témoigne le faible nombre de cas en agriculture conventionnelle rencontrés dans la base de données du réseau DEPHY. Ainsi, le taux d'adoption croissant des mélanges variétaux s'expliquerait surtout par leur simplicité de mise en œuvre et par des avantages observés par les agriculteurs et agricultrices sur leur travail, et les motivations ne seraient pas toujours liées à une volonté de réduction des intrants chimiques ou d'accroissement des rendements à intrants constants. En revanche, pour les mélanges d'espèces, le taux d'adoption croît mais les surfaces restent faibles (Figure 4) alors que leur potentiel pour réguler les bioagresseurs et ainsi réduire les intrants chimiques est plus consensuel (Tibi et al., 2023), et qu'ils peuvent également présenter des avantages économiques au sein des exploitations, notamment en ce qui concerne les mélanges céréales-légumineuses.

Dans la suite, nous nous concentrons donc sur les mélanges céréales-légumineuses, afin de mieux comprendre les facteurs liés à leur adoption en France.

CHAPITRE 2 : FACTEURS LIÉS A L'ADOPTION DES MÉLANGES CÉRÉALES–LÉGUMINEUSES DANS LES EXPLOITATIONS AGRICOLES FRANÇAISES

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS

Les mélanges céréales–légumineuses sont une pratique de diversification qui offre de nombreux avantages, en particulier dans les systèmes à faibles niveaux d'intrants de type agriculture biologique. Cependant, leur adoption reste faible dans les exploitations agricoles européennes conventionnelles, car des obstacles techniques et économiques freinent son développement. Ces dernières années, en France, nous observons une augmentation des parts de mélanges céréales–légumineuses dans les terres labourables. Trois zones – dans l'ouest, l'est et le sud de la France – semblent particulièrement dynamiques. **Les objectifs de cette étude étaient (i) d'identifier les facteurs liés à l'adoption des mélanges céréales–légumineuses au niveau national en France et (ii) de mettre en évidence des facteurs plus spécifiques dans chaque région cible.**

Nous avons analysé les **données du recensement agricole 2020** pour **43 968 exploitations** agricoles représentatives des systèmes agricoles français de grandes cultures, d'élevage et de polyculture–élevage. En nous basant sur la littérature, nous avons identifié les facteurs clés liés à l'adoption des mélanges céréales–légumineuses et les avons mis en relation avec 42 variables disponibles dans les données du recensement agricole. Au niveau national, les plus importantes de ces variables ont été identifiées et interprétées à l'aide d'une **forêt aléatoire** et d'un **arbre de classification et de régression (CART)**. Nous avons modélisé une forêt aléatoire pour chacune des trois zones identifiées dans l'ouest, l'est et le sud de la France, afin de repérer des spécificités locales.

Au **niveau national**, les mélanges céréales–légumineuses étaient fortement liés à l'**agriculture biologique** et à la présence d'animaux d'**élevage**, en particulier de **ruminants**. Ces mélanges se retrouvent dans les exploitations disposant d'une grande **autonomie alimentaire pour les bovins et les ovins**. En outre, ils étaient fréquemment observés dans les exploitations disposant d'un **système de stockage des céréales**, ce qui pourrait indiquer une autonomie alimentaire, une transformation à la ferme ou une commercialisation en dehors des coopératives agricoles. L'**appartenance à une coopérative d'utilisation des machines agricoles** était également un facteur déterminant, probablement parce que ces coopératives permettent aux agriculteurs d'avoir accès à des machines spécifiques et offrent des possibilités d'échange de connaissances sur leurs pratiques.

Des facteurs similaires ont été identifiés au niveau local ; dans les zones **ouest** et **est**, l'**agriculture biologique** et l'**autonomie alimentaire** pour le bétail étaient essentielles. Dans la zone **sud**, cependant, la **capacité de stockage des céréales à la ferme était dominante**, probablement en raison des efforts déployés de longue date pour atteindre l'autonomie alimentaire.

Cette étude exhaustive des exploitations agricoles françaises a permis d'identifier les facteurs clés fortement liés à l'adoption des mélanges céréales-légumineuses. Cette connaissance est essentielle pour promouvoir cette pratique, que ce soit par le biais de politiques publiques nationales ou de services locaux d'accompagnement des agriculteurs et agricultrices. La méthodologie proposée peut être facilement reproduite pour étudier d'autres pratiques agricoles à différentes échelles spatiales.

ARTICLE EN ANGLAIS – MAIN CHARACTERISTICS OF FRENCH FARMS ADOPTING CEREAL–LEGUME INTERCROPPING: A QUANTITATIVE EXPLORATION AT THE NATIONAL AND LOCAL LEVELS

Published in *Agricultural Systems*, Volume 223, February 2025

Authors: Elodie Yan^a, Philippe Martin^a, Marco Carozzi^a

^a Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SADAPT, F-91120 Palaiseau, France

DOI : 10.1016/j.agsy.2024.104196

1 Introduction

Agriculture has the dual challenge of producing enough output to meet the demands of a growing population while maintaining temporal stability (Foley et al., 2011). Additionally, the increasing emphasis on the sustainability of production – namely its environmental, economic, and social aspects – demands the adoption of diverse and effective farming practices at both the parcel and farm scales (Wezel et al., 2020). Crop diversification is one of the leading sustainable actions promoted within the framework of the European Union’s agricultural policy (Galioto & Nino, 2023) and can be implemented using, e.g., cover crops, crop rotations, intercropping, and agroforestry. Although cover crops and crop rotations often come with trade-offs between environmental and economic benefits (Rosa-Schleich et al., 2019), intercropping practices appear to offer more mutually beneficial solutions (Nie et al., 2016; Pelzer et al., 2012).

Intercropping is the practice of growing two or more crop species simultaneously on the same field (Willey, 1979). Plot and field experiments have demonstrated the effectiveness of intercropping in controlling the spread of diseases, insects, and weeds. Cereal–legume intercrops are particularly beneficial: cereals can act as stakes for legumes, which tend to lodge easily (Kontturi et al., 2011), and legumes fix nitrogen from the atmosphere, leaving soil nitrogen available for cereals. This arrangement can result in better harvest quality; specifically, cereal grains grown in intercrops exhibit a higher protein content compared with pure cereal crops (Bedoussac et al., 2015; Li, Stomph, et al., 2023; Pelzer et al., 2012). Intercropping cereals and legumes is also more effective in controlling weeds than sole cereals or sole legumes thanks to the higher soil coverage, even though legumes are weak competitors (Carton et al., 2020; Corre-Hellou et al., 2011; Leoni et al., 2022). Moreover, cereals and legumes protect each other from diseases and pests by creating natural barriers due to the height differences

between the plants, which limits the spread of spores, or by “covering the tracks” for insects, resulting in insects failing to locate their host plant due to non-host plants odours masking the host plants’ (Lopes et al., 2016; Mansion-Vaquié et al., 2020). Altogether, these advantages can result in better yield stability in intercrops compared with sole crops (e.g., Raseduzzaman & Jensen, 2017) and can lead to decreased usage of chemical inputs, such as pesticides and fertilisers, on farms (Jensen et al., 2020; Yan et al., 2024).

The European Union aims to encourage the implementation of diversification practices in agricultural production with the cross-compliance requirements of the Common Agricultural Policy (CAP). However, spatial and temporal diversification, supported by the EU since the 2013 CAP reform, have had varying and sometimes inconsistent effects across the member states (Galioto & Nino, 2023). In France, the area cultivated with cereal–legume intercrops has more than doubled in recent years, increasing from approximately 64,000 ha in 2015 to approximately 178,500 ha in 2021, according to the French Land Parcel Identification System (IGN, 2023). Nevertheless, this increase remains modest, representing only 1% of arable land in 2021. By way of comparison, winter wheat, the leading cereal grown in France, represented 29% of arable land in 2021, whereas peas, the leading legume grown in France, represented 1% (IGN, 2023). The farmers’ low adoption of cereal–legume intercropping can be explained by technical obstacles related to sowing, harvesting, and sorting equipment as well as economic constraints; for example, some agricultural cooperatives do not collect intercrops, the farmers may struggle to find sufficient outlets, and the crops must comply with standards for breadmaking processes (Fares & Mamine, 2023; Magrini et al., 2016; Verret et al., 2020). Together with farmers’ risk aversion, these difficulties are strong blocking factors to intercrop adoption that cannot be solved solely at the farm level (Bonke & Musshoff, 2020; Timaeus et al., 2022). However, by tracking on-farm legume-based intercrops in France, Verret et al. (2020) showed that some farmers have successfully implemented cereal–legume intercrops on their farms and are experiencing many of the advantages identified by field experiments. Verret et al. (2020) also highlighted the motivations and technical conditions for successful intercropping, indicating that cereal–legume intercrops are commonly adopted on organic and/or mixed crop–livestock farms. To enhance support for extension services aimed at assisting farmers in adopting this practice, it is essential to identify the factors conducive to its adoption on farms. In France, the adoption of cereal–legume intercropping varies geographically, as shown in Figure 2.1. Three areas, specifically those surrounding the

departments⁵ of Loire-Atlantique in Western France, Aveyron in Southern France, and Jura in Eastern France, have shown a notable rate of cereal–legume intercropping. This variation suggests that local factors, potentially specific to these areas, may also play a role in the adoption of the practice.

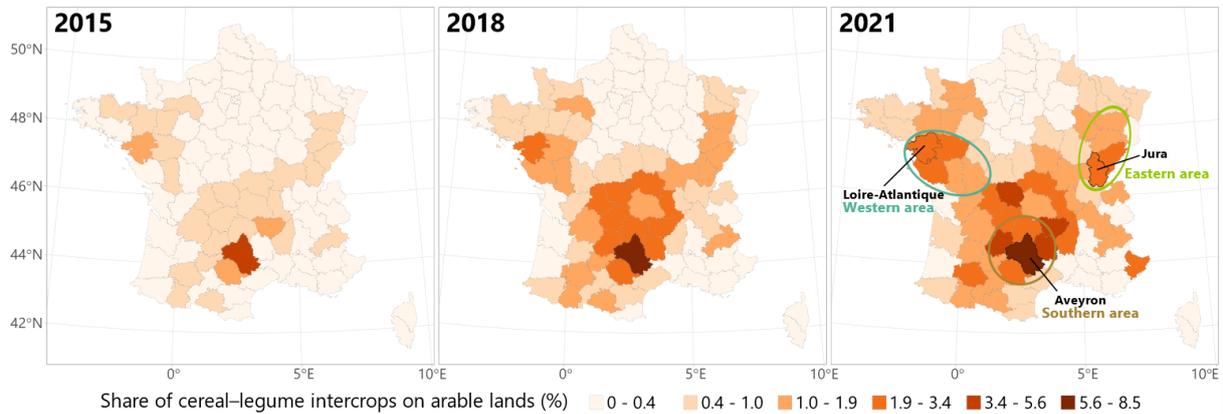


Figure 2.1: Share of cereal–legume intercroppings on total departmental arable lands in 2015, 2018, and 2021 in French departments, based on data from the French Land Parcel Identification System.

In this paper, we present a quantitative study that aimed to identify the main characteristics of the French farms adopting cereal–legume intercroppings. We built upon and extended previous qualitative studies based on a limited number of farm surveys, which suggested that **organic farming** and **animal husbandry** are significant factors influencing the adoption of cereal–legume intercropping in France (e.g., Timaeus et al., 2022; Verret et al., 2020). However, the literature suggests that there are more factors than just these two and that local differences may explain different diffusion dynamics. Indeed, as cereal–legume intercroppings are considered an agroecological practice (Altieri et al., 2015; Duru et al., 2015), we hypothesise that they are more likely to be adopted on farms involved in **agroecological initiatives** (e.g. Ha et al., 2023). Studies showing the ability of cereal–legume intercroppings to compete with weeds also suggest that the practice might be linked to **conservation agriculture** practices (e.g. Peigné et al., 2016). As stated in the previous paragraph, cereal–legume intercroppings currently lack outlets, especially concerning long channel and agricultural cooperatives that mainly collect crops for further industrial transformation. Therefore, we hypothesise that cereal–

⁵ French departments are the equivalent of Level 3 of the EU Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS3)

legume intercrops are more likely to be grown on farms for sale through alternative channels, such as **local distribution networks** (e.g. Casagrande et al., 2017), and possibly with previous **on-farm processing** to increase their added value (e.g. Thomopoulos et al., 2018), or even used for other purposes such as the **production of biogas** on farm (e.g. Himanen et al., 2016). Our last hypothesis regarding the factors linked to the adoption of cereal–legume intercropping is that the exchange of knowledge, advice and experience between farmers can favour the adoption of innovative agriculture practices (e.g. Chantre & Cardona, 2014), so the **belonging to groups of farmers** may also enhance the adoption of cereal–legume intercropping.

The objectives of this study were (i) to identify the main farm characteristics associated with the adoption of cereal–legume intercrops at the national level in France and (ii) to highlight more specific characteristics that could explain the particular dynamics observed locally, based on our hypotheses regarding the links between the presence of cereal–legume intercrops and organic farming, the presence of livestock, the involvement in agroecological schemes and practices, conservation agriculture, the types of distribution networks, on-farm transformation, the production of biogas and the belonging to group of farmers.

2 Materials and methods

2.1 Dataset

Information on the composition of French farms was obtained from the 2020 French Agricultural Census data. The census is conducted once every 10 years to provide an exhaustive photograph of the national agricultural situation. In 2020, the survey was conducted using two questionnaires. The first was administrated to all 450,000 farms of Metropolitan France and French overseas departments and regions. The second questionnaire, which was more detailed, was administered to a representative sample of 70,000 farms. For our analysis, we focused on data from the second questionnaire, which provided information on farm structure, crop and livestock production, fertilisation and animal dejection management, diversification activities, marketing channels, and workforce.

Using these data, we studied the absence or presence of cereal–legume intercrops on farms located in Metropolitan France. Farms where arable crops were not cultivated, such as those specialised in viticulture, perennial crops, market gardening, or horticulture, were

excluded. We ultimately furnished our database with information on 43,968 farms specialised in arable crops, mixed crop–livestock, or livestock farming. From this sample, we found cereal–legume intercrops on 2,548 farms (6%).

Based on a literature review, we identified factors that may be linked to the adoption of cereal–legume intercrops at the farm level. We then selected 42 variables from our database to represent those factors (Table 2.1). At the farm level, we identified that the type of production, particularly the presence of livestock, can play a role in whether a farm adopts cereal–legume intercropping. Fodder intercrops are easy to implement (Himanen et al., 2016), and intercrops in general can be used as animal feed on farms (Thomopoulos et al., 2018). In our database, variables 3 and 14–28 (Table 2.1) represent the type of production and the presence of livestock. According to Navarrete et al. (2015), organic farming can also be linked to the adoption of intercropping because it encourages crop diversification (variables 4 and 5). We determined that conservation agriculture is likely to involve intercropping to achieve higher soil coverage and increase competition with weeds, thereby reducing tillage (Casagrande et al., 2017; Lemken et al., 2017; Peigné et al., 2016). Variables 6–9 represent conservation agriculture practices. Other agroecological practices should also be considered, including reducing chemical inputs and relying more on the services plants provide (e.g., Casagrande et al., 2017; Verret et al., 2020). Involvement in “private certificate schemes” can also reinforce farmers’ intention to adopt intercropping (Ha et al., 2023). Variables 9–13 represent agroecological practices and schemes. The production of biogas (variable 42) from anaerobic digestion of agricultural sources may also be linked to the adoption of intercropping, as the energy cover crops used are usually crop mixtures. Regarding the relationship between the farm and its global environment, the literature indicates that the post-harvest process and marketing channels can influence the adoption of intercropping. On-farm sorting and transformation, as well as direct selling, are potential levers, whereas relying on traditional channels with agricultural cooperatives is more of a barrier (Casagrande et al., 2017; Himanen et al., 2016; Thomopoulos et al., 2018). Variables 29–38 represent the different marketing channels and on-farm transformations in our database. Finally, involvement in groups of farmers or farm machinery cooperatives and having access to training sessions (variables 39–41) support the adoption of new agricultural practices (Chantre & Cardona, 2014; Ha et al., 2023; Himanen et al., 2016). Table 2.1 provides further details on all 42 variables considered in this study, which will help in interpreting the results in Section 3.

Table 2.1: Description of the 42 variables selected from the 2020 French Agricultural Census and the related hypotheses tested in the analysis.

ID	Variable name	Variable description	Variable nature	Tested factors and hypotheses	References
1	Total_area	Total useable agricultural area	Numeric (hectares)	Farm characteristics	
2	Eco_dimension	Economic dimension	Factor		
3	Farm_type	Type of farming	Factor		
4	Prop_organic	Proportion of area certified in organic agriculture	Numeric	Organic farming Organic farming fosters crop diversification, and case studies highlight that cereal–legume intercrops are mainly grown in organic farming conditions.	Casagrande et al., 2017; Ha et al., 2023; Verret et al., 2020
5	Prop_organicConv	Proportion of area under conversion to organic agriculture	Numeric		
6	Prop_plough	Proportion of area ploughed	Numeric	Conservation agriculture Some studies have linked intercropping to conservation agriculture (e.g., for weed control).	Casagrande et al., 2017; Lemken et al., 2017; Peigné et al., 2016
7	Prop_conservation	Proportion of area under conservation agriculture	Numeric		
8	Prop_direct	Proportion of area with direct seeding	Numeric		
9	HVE	High Environmental Value certification (in French: HVE certification)	Boolean	Agroecological practices In low-input systems, intercropping can result in better yields than sole cropping. Case studies often cite reducing chemical inputs as one objective of intercropping; participation in “private certificate schemes” strengthens the intention to adopt intercropping.	Bedoussac et al., 2015; Casagrande et al., 2017; Ha et al., 2023; Verret et al., 2020
10	Other_QualEnv	The farm is engaged in a quality or environmental approach other than DEPHY (network of demonstration farms committed to reducing pesticides), HVE (High Environmental Value), or GIEE (Environmental and Economic Interest Group)	Boolean		
11	Prop_agroforestry	Proportion of area with agroforestry	Numeric		
12	GIEE	Environmental and Economic Interest Group	Boolean		
13	DEPHY	DEPHY Farm	Boolean		

14	Dens_cattle	Stocking density of cattle	Numeric	Livestock Fodder intercrops are easy to implement, and sorting is not always necessary before feeding intercrops to animals. In case studies, intercrops are mainly found in livestock or mixed crop–livestock farming systems.	Casagrande et al., 2017; Himanen et al., 2016; Lemken et al., 2017; Thomopoulos et al., 2018; Verret et al., 2020
15	Dens_sheep	Stocking density of sheep	Numeric		
16	Dens_goats	Stocking density of goats	Numeric		
17	Dens_pigs	Stocking density of pigs	Numeric		
18	Dens_poultry	Stocking density of poultry	Numeric		
19	AutoFodder_cattle	Fodder autonomy for cattle	Factor		
20	AutoConcen_cattle	Concentrate autonomy for cattle	Factor		
21	AutoFodder_sheep	Fodder autonomy for sheep	Factor		
22	AutoConcen_sheep	Concentrate autonomy for sheep	Factor		
23	AutoFodder_goats	Fodder autonomy for goats	Factor		
24	AutoConcen_goats	Concentrate autonomy for goats	Factor		
25	AutoConcen_pigs	Concentrate autonomy for pigs	Factor		
26	AutoConcen_hen	Concentrate autonomy for laying hens and pullets	Factor		
27	AutoConcen_poultry	Concentrate autonomy for other poultry	Factor		
28	AutoConcen_duck	Concentrate autonomy for ducks and geese	Factor		
29	Prop_coop	Proportion of sales to an agricultural cooperative	Numeric	Marketing channels Sorting intercrops is a central issue, and agricultural cooperatives that are not equipped to sort the intercrops refuse to collect them. In case studies, very few farmers sell their intercrops to agricultural cooperatives.	Casagrande et al., 2017; Himanen et al., 2016; Thomopoulos et al., 2018
30	Local_network	Marketing in local distribution network	Boolean		
31	Prop_directSale	Proportion of direct sales to consumer	Numeric		
32	Prop_oneInterm	Proportion of sales to consumer with one intermediary	Numeric		
33	Prop_longChannel	Proportion of sales to the private sector (long channel)	Numeric		

34	Prop_saleService	Proportion of sales of services as part of integration or boarding of animals	Numeric		
35	Stock_farm	Grain stocking capacity on farm	Numeric (tonnes)		
36	Transfo	Transformation of agricultural products	Boolean	On-farm transformation On-farm transformation, along with local distribution networks, can be more profitable for farmers and enable them to sell diversification crops, including intercrops that may not be collected by agricultural cooperatives.	Casagrande et al., 2017
37	Transfo_cer	Transformation of cereals	Boolean		
38	Transfo_olea	Transformation of oleaginous	Boolean		
39	Exchange_group	Group for exchanges on experiences, results, or trainings	Boolean	Involvement in groups of farmers, exchanges with other farmers Sharing knowledge and past experiences is important for wider adoption of intercropping. Networks facilitate the diffusion of techniques (references, help, advice), and trainings can foster the adoption of new agricultural practices. Farmers who often interact with other farmers are more likely to adopt intercropping.	Casagrande et al., 2017; Chantre & Cardona, 2014; Ha et al., 2023; Himanen et al., 2016; Mamine & Farès, 2020
40	Machinery_group	Farm machinery cooperative	Boolean		
41	Work_otherFarm	Work on other farms or other non-agricultural work	Boolean		
42	Sale_biogas	Sale of biogas	Boolean	Production of biogas Intercropping can produce feedstock to produce biogas.	Himanen et al., 2016

2.2 Variable selection: Balanced Random Forest

To characterise the farms on which cereal–legume intercroops are grown, we first aimed to identify which of the 42 selected variables best-separated farms with intercroops (“Presence” group) from those without (“Absence” group). To do this, we used a random forest algorithm (Breiman, 2001), which is a machine-learning classification method. Random forests are based on multiple decision trees. Each decision tree parts the data according to a set of variables from the given 42. At each node, one variable is used to split the data into two subsamples, and each subsample is then further divided based on another variable, and so on. In the end, the decision tree provides a representation of the variables capable of parting the Presence and Absence groups. The random forest algorithm then averages the results of all the computed decision trees and ranks the variables according to their importance in discriminating between the two groups. The importance of a variable is given by the mean decrease in impurity, a measure of how effectively the variable helps to split the data. The higher the mean decrease in impurity, the more important the variable.

The Presence cases in our dataset accounted for only 6% of the observations, resulting in an unbalanced classes problem in which the class of interest (Presence) was the minority. In such cases, conventional classification algorithms are unlikely to perform well because they try to indifferently minimise the error rate (Fernández et al., 2018, p. vii). In our case, an error rate of 6% may seem low in absolute terms – as it would mean that 94% of the data are correctly classified – but it could hide the fact that none of the Presence observations have been correctly classified. Indeed, in order to minimise the error rate, the algorithm could classify all the observations in the Absence category, and have an error rate of 6% only in total, but it would represent an error rate of 100% for the Presence observations. Classification methods such as random forests can be adapted to manage these unbalanced data. In balanced random forests, for example, in each iteration of the random forest algorithm, a sample is taken from the minority class and a sample of the same size is randomly drawn from the majority class (Chen et al., 2004).

As the Presence cases only represent a minority in the dataset (6%), we used the balanced random forest method with undersampling. We first created a training sample and a test sample by randomly drawing 80% ($n = 35,174$) and 20% ($n = 8,794$) of the dataset, respectively. Then, in the training set, we randomly drew as much Absence data as we had

Presence data (i.e., $n = 2,085$, Table 2.2). We used a 10-fold cross-validation, which means that we repeated this operation 10 times, and each time over 1,500 trees. We thus obtained a final random forest model trained on a balanced dataset. We then applied this final model to the test sample to measure the model’s performance using the area under the receiver operating characteristic (ROC) curve. The ROC curve represents the true-positive rate (probability of a farm being classified in the Presence group when cereal–legume intercroops are indeed present on the farm) as a function of the false-positive rate (probability of a farm being classified in the Presence group when there are no cereal–legume intercroops on the farm). An area under the ROC curve of 0.5 means the classifier makes random guesses. An area under the ROC curve of 1 means the classifier makes perfect predictions.

Table 2.2: Summary of the number of cases (total, Presence, and Absence) at each step of the analysis.

Step	Level	Total	Whole dataset		Training set		Test set	
			Presence	Absence	Presence	Absence	Presence	Absence
Original dataset	France	43,968	2,548	41,420	/	/	/	/
Balanced random forest (undersampling^a)	France	43,968	2,548	41,420	2,085	2,085 ^a	463	8,331
CART with (oversampling^b)	France	79,640 ^b	38,220 ^b	41,420	32,591	33,159	8,177	8,261
Random forests per area	Western	4,056	433	3,623	335	2909	98	714
	Eastern	1,027	84	943	69	752	15	191
	Southern	2,125	512	1,613	424	1276	88	337

^a Undersampling by randomly selecting as many Absence cases as Presence cases in the training set.

^b Oversampling by duplicating Presence cases to get a balanced ratio between Absence and Presence cases before constituting the training and test sets.

CART, classification and regression tree.

2.3 Roles of the features for the adoption of cereal–legume intercroops

Based on the variable importance measured by the random forest, we selected the variables that were most important in discriminating the Presence and Absence groups to deepen our understanding of their role in the adoption of intercropping. These variables were used in a classification and regression tree (CART, Breiman et al., 1984), another decision tree algorithm, to classify our data into the two groups and provide a more detailed characterisation of the farms belonging to each group. CART constructs a binary tree structure by recursively partitioning the input data based on feature values. For our classification problem, the

algorithm identifies the optimal split at each node to minimize the class impurity. To limit the risks of overfitting, we chose to prune the tree using the complexity parameter value that would give a balance between the complexity of the tree (i.e. the number of splits and, therefore, the interpretability of the tree) and its predictive ability, based on the cross-validation error. From our tests on different complexity parameter values, we determined that the cross-validation error did not decrease significantly after the seventh split, which coincided with a complexity parameter of 0.009.

As with the random forest, we first needed to solve the issue of the imbalanced dataset. Although the subsampling method worked well with the random forest, that resulted in an average tree over 1,500 trees, it is not possible to obtain an average CART. For this analysis, we chose to oversample our data, so we penalised the CART more heavily when one observation was classified incorrectly. This way, we gave more weight to the Presence data, multiplying it 15 times to obtain a dataset with 38,220 Presence cases and 41,420 Absence cases, i.e., a ratio of 48% to 52%. We used a training sample (80%, $n = 65,750$, Table 2.2) and a test sample (20%, $n = 16,438$, Table 2.2). The CART was trained on the training sample, and the obtained model was tested on the test sample to measure its predictive performance by measuring the area under the ROC curve.

2.4 Local factors

Using data from the French Land Parcel Identification System from 2015 to 2021, we mapped the evolution of the area cultivated with cereal–legume intercroops. We identified three regions in which cereal–legume intercropping had spread from hotspots (Figure 2.1). The first hotspot was located around the Loire-Atlantique department, and we designated this first area the Western area. The second hotspot was located around the Jura department, and the third around the Aveyron department. We designated these the Eastern and Southern areas, respectively. The Western area was dominated by arable crop farming, with 30% of the useable agricultural area (UAA) dedicated to this type of farming. The main product was winter wheat, which represented 15% of the UAA. Mixed crop–livestock, dairy cattle, and meat cattle farms represented 16%, 16%, and 15% of the UAA, respectively (Table 2.3). The distribution of farm types in the Western area was comparable to the national distribution but with larger farms (+20 ha on average) and lower winter wheat yields (-14 q ha^{-1} on average) in 2020.

Additionally, the Western area exhibited a larger proportion of organic farmland at 13% of the UAA versus 9.5% of the national UAA (Table 2.3). The Eastern area was largely dominated by livestock farming systems, with dairy cattle farms accounting for 53% of the UAA (Table 2.3). The next most prevalent systems were arable crop, mixed crop–livestock, mixed dairy and meat cattle, and dairy cattle farms, which accounted for 13%, 10%, 10%, and 9% of the UAA, respectively (Table 2.3). Hence, the Eastern area was mainly covered by permanent grassland (60% of the UAA), and the main crop, winter wheat, accounted for 9% of the UAA (Table 2.3). Compared with the national statistics, the Eastern area's farms were larger (+28 ha on average), with a slightly higher mean winter yield and proportion of organic farmland in 2020 (Table 2.3). The Southern area was also dominated by livestock farming systems, with meat cattle farms representing 38% of the UAA and sheep and goat farms representing 25% of the UAA. Arable crop farms only accounted for 10% of this area's UAA (Table 2.3); grasslands mainly covered the agricultural area, with 59% of the UAA dedicated to permanent grassland and 14% dedicated to temporary grassland. The most commonly grown crop was winter wheat, making up 3.8% of the UAA. The mean farm size was similar to that on the national scale (–1 ha), and the proportion of organic farmland was higher (12% of the UAA; Table 2.3). Of the three areas studied, the Southern area had the lowest mean winter wheat yield in 2020 (47.3 q ha⁻¹, i.e., –21.2 q ha⁻¹ compared with the national mean; Table 2.3).

Table 2.3: Principal agricultural characteristics of the Western, Eastern, and Southern areas compared with the national scale (France), based on data from the 2020 French Agricultural Census and the 2020 annual agricultural statistics (Agreste, 2020a), which provide information on the mean winter yield in 2020.

Area	Western	Eastern	Southern	France
Climate	Temperate, oceanic to altered oceanic	Mountain/semi-continental	Mountain/altered oceanic	/
Useable agricultural area (UAA, ha)	2,243,952	869,662	1,605,158	26,745,875
Types of farming (% of UAA)	30% arable crop 16% mixed crop–livestock 16% dairy cattle 15% meat cattle 8% pig and poultry	53% dairy cattle 13% arable crop 10% mixed crop–livestock 10% mixed dairy and meat cattle 9% dairy cattle	38% meat cattle 25% sheep and goats 10% arable crop 10% dairy cattle 7% mixed dairy and meat cattle	36% arable crop 15% meat cattle 14% mixed crop–livestock 14% dairy cattle 6.5% sheep and goats
Main production (% of UAA)	23% permanent grassland 15% winter wheat 14% temporary grassland 8.3% maize (fodder and silage) 8.2% maize (grain) 6.1% sunflower 3.8% rapeseed	60% permanent grassland 9.0% winter wheat 7.0% temporary grassland 4.6% maize (fodder and silage) 4.3% winter barley 3.3% rapeseed 3.0% maize (grain)	59% permanent grassland 14% temporary grassland 3.8% winter wheat 3.2% winter barley 2.7% alfalfa	29% permanent grassland 16% winter wheat 6.8% temporary grassland 6.5% maize (grain) 5.0% maize (fodder and silage) 4.4% winter barley 4.2% rapeseed
Mean farm size (ha)	89	97	68	69
Mean winter wheat yield in 2020 (q ha⁻¹)	54.2	70.0	47.3	68.5
Organic farming (% of UAA)	13	11	12	9.5

To better understand the reasons behind the observed local diffusion of intercropping, we used the CART obtained from nationwide data to classify the cases in the three regions. If the CART was able to classify the local data correctly, it would mean that the farm characteristics associated with the presence of cereal–legume intercrops are not specific to local contexts. Otherwise, we would attempt to identify those local features by running random forests on the local data.

2.5 Calculations and Statistical Analysis

To handle our classification problem, we chose to use a random forest algorithm, as this method is robust to noise and variance, not prone to overfitting and can handle high-dimensional datasets with both categorical and numerical data (Breiman, 2001). Also, random forests are an ensemble method, based on the aggregation of multiple decision trees, which makes them more reliable than single decision trees. However, random forests can be difficult to interpret, and therefore, we chose to perform a decision tree using a set of features selected based on the feature importance given by the random forest. We chose to use a Classification and Regression Tree model as it also handles large datasets and is easy to interpret and implement, which was an important criterion as we wanted to propose a replicable methodology.

Statistical analyses were carried out using R version 4.3.1 (R Core Team, 2023). We used the package *caret*, version 6.0-94, for the random forests and the balanced random forest (Kuhn, 2008). The CART was built with the package *rpart*, version 4.1.19 (Therneau et al., 2023). The ROC validations were computed with the package *ROCR* (Sing et al., 2005). Access to the French Agricultural Census data was made possible within a secure environment offered by the Centre d'accès sécurisé aux données (CASD; Ref. 10.34724/CASD).

3 Results

3.1 Key variables associated with the presence of cereal–legume intercropping

The balanced random forest resulted in an area under the ROC curve of 0.915, thereby validating our model, in accordance with Mandrekar (2010) who considers that an AUC of 0.8 to 0.9 is “excellent” and more than 0.9 is “outstanding”. Figure 2.2 shows the importance of the top 20 selected variables. The proportion of land under organic farming (*Prop_organic*) on the farm was the most important variable in discriminating Presence cases from Absence cases. The second most important variable was the farm’s grain storage capacity (*Stock_farm*). The top 10 most important variables include those linked to livestock, such as feed autonomy for cattle (*AutoConcen_cattle*, third position) and sheep (*AutoConcen_sheep*, ninth position) and stocking density (*Dens_cattle*, seventh position). Variables pertaining to the farm structure were also significant, including the total agricultural area in use (*Total_area*, fourth position) and the

type of farming, such as arable, mixed crop–livestock, or livestock farming (*Farm_type*, eighth position). Furthermore, we identified two variables associated with soil tillage: the proportion of ploughing (*Prop_plough*) and conservation farming (*Prop_conservation*), which ranked fifth and sixth, respectively. Finally, belonging to a farm machinery cooperative (*Machinery_group*, tenth position) was also discriminant in terms of presence or absence of cereal–legume intercrops. In the top 20 most important variables were those associated with marketing channels as well as other variables linked to livestock, farm structure (economic dimension), and tillage (direct seeding). The variables associated with diversification activities did not play a strong role in the Presence/Absence classification, nor did those related to the farmers’ environmental or quality approaches other than organic farming. The balanced random forest results show the relative importance of the variables in explaining the presence or absence of cereal–legume intercrops on farms. However, it is unclear which values of these variables actually dictate the Presence/Absence classification. Consequently, we chose to further investigate the values of the 10 most important variables with the CART model, according to the results of the balanced random forest shown in Figure 2.2.

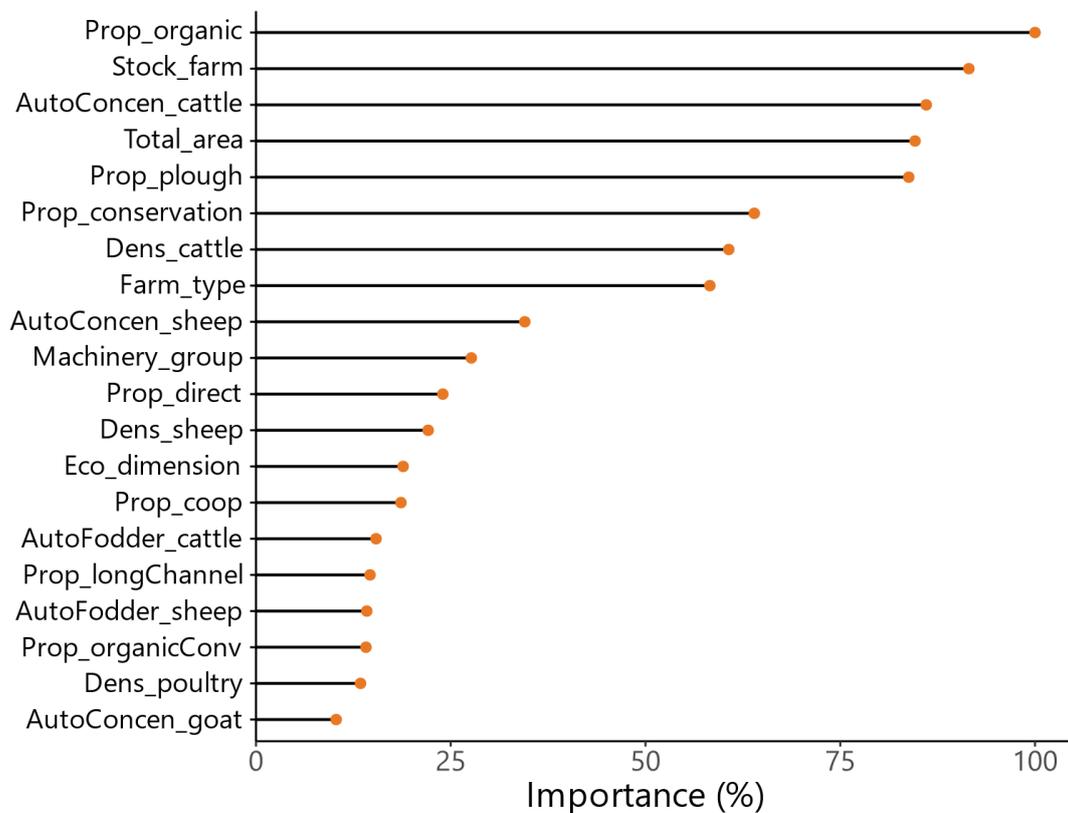


Figure 2.2: National-level balanced random forest variable importance plot. The importance is scaled from 0% to 100% relative to the first most important variable.

The CART model was validated based on its area under the ROC curve value of 0.83. The classification tree separated the Presence and Absence cases based on six of the top 10 variables identified by the random forest. The proportion of the farm's land under organic farming was the first variable in the classification tree, with a threshold of 43% of the total farm UAA (Figure 2.3). However, the majority of farms (82%) in the sample had between 0% and 10% of their land under organic farming versus 80%–100% of the land on the remaining farms (17%). Therefore, we can consider the split as operated between two categories: less than 10% or more than 80% of UAA under organic farming. The presence of cattle or sheep farming, even with minimal feed autonomy, were also strongly linked to the presence of cereal–legume intercropping. For grain storage capacity, another significant factor, the results show a split at 8.5 or 9.5 tonnes, although the majority (95%) of the French farms below this split did not have any grain storage capacity. Given that the average on-farm grain storage capacity in France is 579 tonnes (CERESCO & Systra, 2020), the split could be considered to represent binary yes/no responses to the existence of on-farm grain storage. Furthermore, the classification tree indicated that cereal–legume intercropping was more adopted in livestock farming with cattle, sheep, goat, or other herbivore production than in arable farming, mixed crop and/or mixed livestock farming, and livestock farming with pig or poultry production. Belonging to a farm machinery cooperative also appears to be associated with the adoption of cereal–legume intercropping.

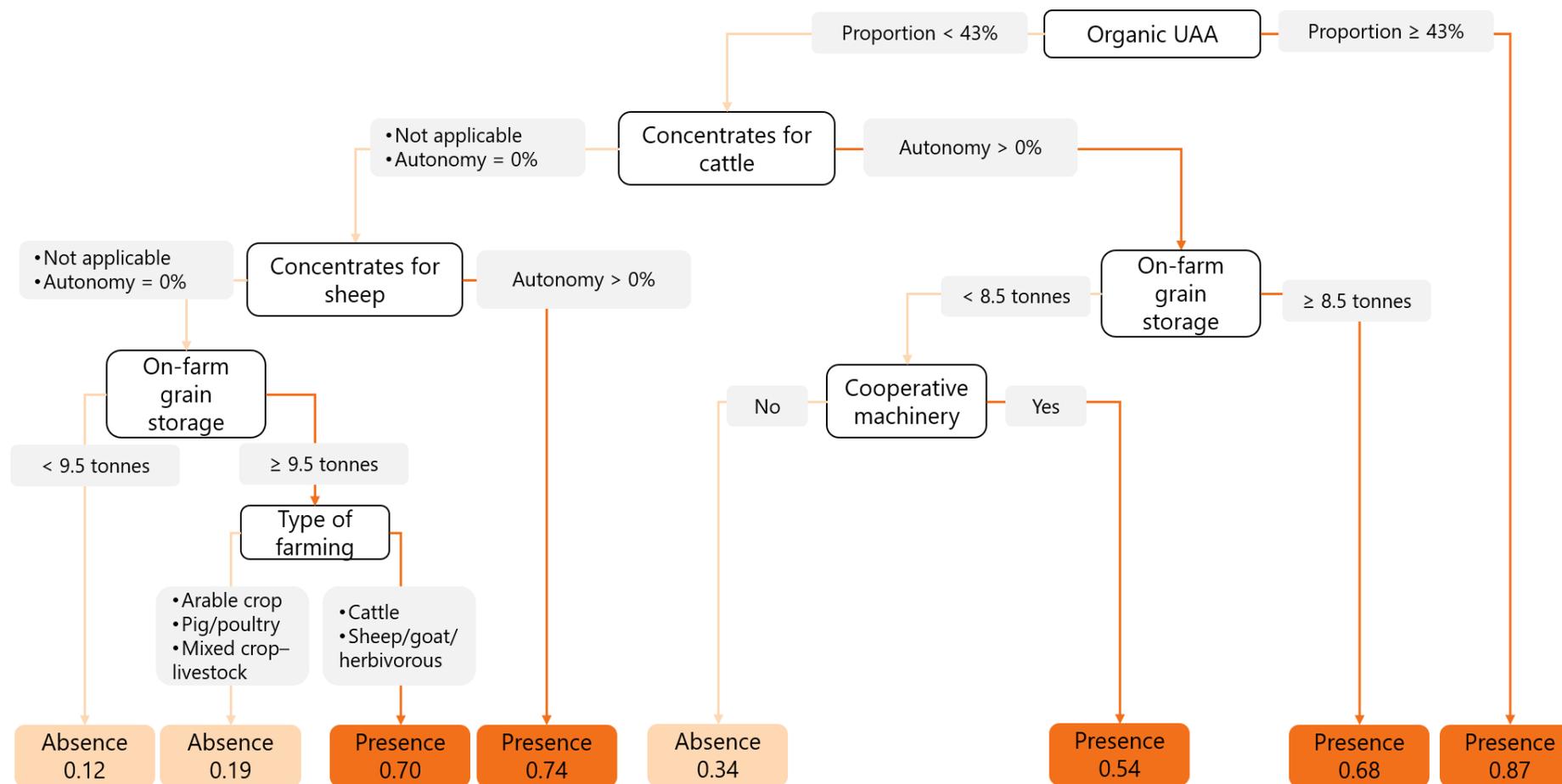


Figure 2.3: Classification tree obtained with the CART algorithm applied at the national level. The numbers in the Absence and Presence boxes give the probability of one observation being classified as Presence following the path. UAA, useable agricultural area.

3.2 Variables for local adoption of cereal–legume intercropping

The CART trained on national data and tested on data from the three regions (presented in Section 2.4) yielded satisfactory predictions, with areas under the ROC curves of 0.80, 0.79, and 0.73 for the Western, Eastern, and Southern areas, respectively. However, the tree's performance was not as robust as on the national data, prompting further investigation into the local factors that are linked to the presence of cereal–legume intercrops on farms. A classic random forest was trained for each area, resulting in areas under the ROC curves of 0.85, 0.85, and 0.86 for the Western, Eastern, and Southern areas, respectively.

The top 10 most important variables in all three areas were similar to those at the national scale (Figure 2.4). In the Western area, nine of the top 10 variables were the same as those at the national level; only the belonging to a farm machinery cooperative (*Machinery_group*) was absent. In this area, the proportion of land under organic farming (*Prop_organic*) was predominant compared with the other variables; the second most important variable (*AutoConcen_cattle*) only contributed approximately 34.8% of the *Prop_organic* variable contribution.

In the Eastern area, eight of the top 10 variables were the same as those at the national level; feed autonomy for sheep (*AutoConcen_sheep*) and belonging to a farm machinery cooperative (*Machinery_group*) were absent. In this area, the proportion of land under direct seeding (*Prop_direct*) and the selling to an agricultural cooperative (*Prop_coop*) were more important than at the national level (Figure 2.4). The proportion of land dedicated to organic farming (*Prop_organic*) remained the most important variable. Finally, in terms of variable importance, this area had the ranking closest to that of the national level.

In the Southern area, eight of the top 10 variables were the same as those at the national level. Sheep stocking density (*Dens_sheep*) and direct seeding proportion (*Prop_direct*) were more important than the type of farming (*Farm_type*), which was absent from this area's top 10 along with the belonging to a farm machinery cooperative (*Machinery_group*; Figure 2.4). In this area, the proportion of land cultivated under organic farming (*Prop_organic*) fell to the fifth position.

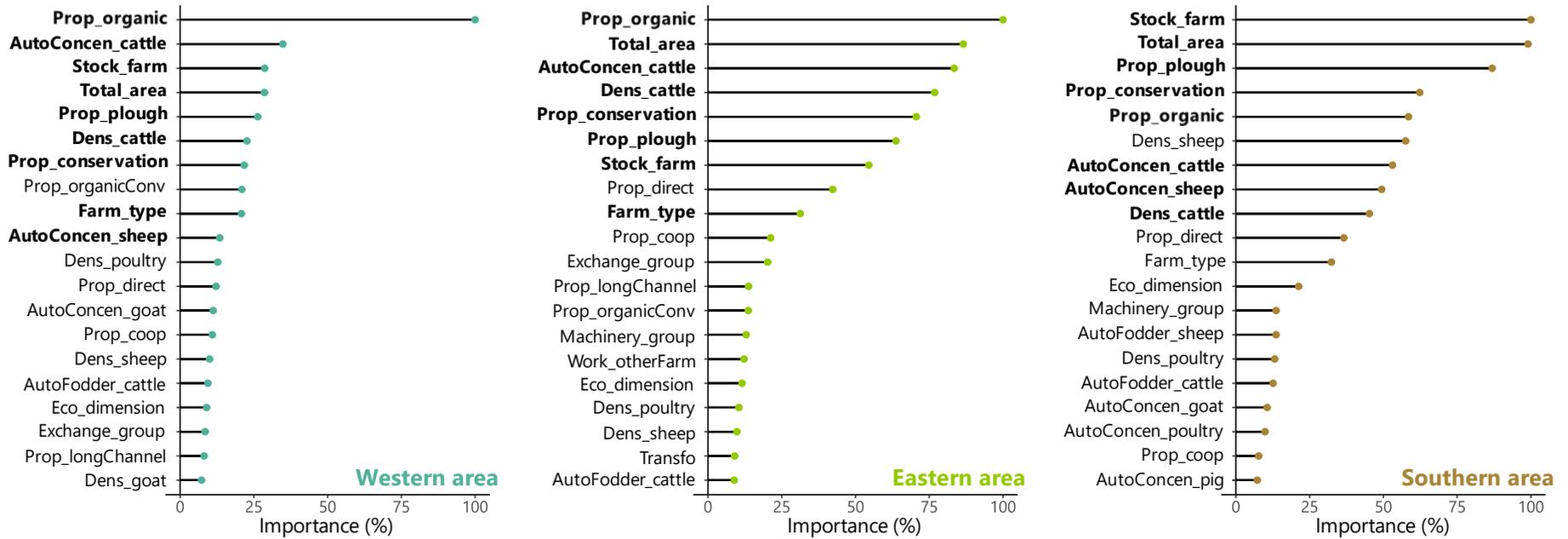


Figure 2.4: Random forest variable importance plots for the Western, Eastern, and Southern areas. In each plot, the importance is scaled from 0% to 100% relative to the first most important variable. Variables in bold are the common variables between the top 10 at the national level and the top 10 at the area level.

4 Discussion

4.1 Factors associated with the adoption of cereal–legume intercropping at the national scale

The results of this study show that organic farming is strongly associated with the presence of cereal–legume intercrops in French farms, which is in line with the hypotheses drawn from previous case studies in the literature that organic farming is a major factor fostering the adoption of cereal–legume intercrops. This result can be linked to various features of organic farming. Restrictions on the chemical inputs allowed in organic farming oblige farmers to seek alternative solutions to controlling weeds, pests, and diseases, including crop diversification and intercrops in particular. Crop diversification offers acceptable performance in terms of yield and quality of production (A. S. Lithourgidis et al., 2011; Pelzer et al., 2012). Furthermore, in France, organic agricultural cooperatives collect and sort binary intercrops (e.g., wheat–faba bean, triticale–pea) to sell through their channels (Corre-Hellou et al., 2013). Such market opportunities for organic cereal–legume intercrops can contribute significantly to facilitating their adoption in organic farming. Cereal–legume intercrops are uncommon outside of organic farming systems, and they are mainly observed in livestock farming situations (Lemken et al., 2017; Verret et al., 2020), often ruminant farming with cattle and goats rather than monogastric farming. Pig and poultry systems are primarily driven by cost-efficiency, with precise feed rations that vary according to the animals' physiological stage. Therefore, in monogastric systems, breeders need to evaluate the composition of the intercrops, so sorting is necessary and the use of intercrops for animal feed becomes more challenging (Casagrande et al., 2017). As a result, intercrops are less likely to be used as monogastric feed. In conventional pig and poultry farming, which represent 98% and 94% of the pig and broiler stock, respectively, according to the French Agricultural Census, the feed mainly consists of high–nutritive value and low–water content material that is easy to transport and stock. Our data indicate that 51% of the conventional pig farms and 89% of the conventional broiler farms have a concentrate autonomy of less than 25%, indicating that this type of feed is easily available on the market.

In ruminant farms, on the other hand, feed rations are more flexible, particularly in the context of meat production – in dairy production, the milk protein and fat rates must be respected, which necessitates more precise feeding. Our findings indicate that a significant

proportion of cattle (90%) and sheep farms (89%) growing cereal–legume intercrops had a fodder autonomy of more than 90%, compared with 83% of the cattle farms and 76% of the sheep farms that did not grow cereal–legume intercrops. Moreover, farms growing cereal–legume intercrops demonstrated higher concentrate autonomy: 33% of the cattle farms and 26% of the sheep farms with cereal–legume intercrops had over 90% concentrate autonomy versus only 13% of the cattle farms and 18% of the sheep farms without cereal–legume intercrops. Indeed, one of the main advantages of cereal–legume intercrops for breeders is to enhance feed autonomy (Verret et al., 2020) because they help secure the fodder stock and constitute a balanced alternative to soya meal, which is mainly imported in France.

The presence of grain storage on the farm was also identified as one of the main characteristics of the farms adopting cereal–legume intercropping. Grain storage is likely to be associated with livestock farming, as harvested grains are stored to feed the animals, thereby ensuring the farm’s self-sufficiency in concentrate feeds. However, on-farm grain storage can also reveal a particular marketing strategy in arable farming outside of the traditional agricultural cooperative channels. On average, the storage capacity on arable crop farms is higher than on cattle and sheep farms: 700 tonnes versus 109–192 tonnes, respectively. Harvested crops stored on arable farms are likely sold through channels other than cooperatives, which enables arable farmers to avoid the problem of intercrops going uncollected by storage organisations that are not equipped to sort them. Furthermore, we assume that the storage capacity on these arable crop farms exists so the intercrops can be sorted on the farm before being sold (for food or feed). However, this hypothesis could not be verified with the available data.

The belonging to a farm machinery cooperative also appears in our results to be associated with the adoption of cereal–legume intercropping. This association is likely present because the machinery cooperatives provide access to specific and costly agricultural equipment through joint investments. Therefore, farmers can overcome technical obstacles related to sowing, harvesting, and even sorting (Mamine & Farès, 2020). The farm machinery cooperative can also act as a vector for innovation by providing space for farmers to share their practices and experiences (Darnhofer et al., 2010; Himanen et al., 2016). This way, farmers can draw inspiration from the experience of their colleagues who are growing intercrops and adopt the practice themselves (Ha et al., 2023).

The CART did not use the variables related to ploughing, soil conservation, or the UAA. The French Agricultural Census questionnaire defined ploughing as deep tillage of at least 15 cm and turning over with a plough. Soil conservation was defined as deep tillage without turning over (using a chisel or decompactor) or with reduced turning (using disc or tine stubble cultivators or a rotavator). On the farms with cereal–legume intercrops, we noted more areas using soil conservation techniques (median of 10% of areas cultivated using these techniques for the Presence group vs. 3% for the Absence group) and slightly fewer areas using ploughing techniques (median of 20% of areas using ploughing for the Presence group vs. 24% for the Absence group). These differences may not be clear-cut enough for the classification tree to use them to separate the Presence and Absence groups. Nevertheless, this suggests that farmers growing intercrops are more likely to be involved in other agroecological approaches such as soil conservation techniques. A perspective to improve our method could be using a C4.5 algorithm (Quinlan, 1992) that is a classification tree algorithm based on entropy measures and that allows multiple partitioning, and not only binary partitioning, as does the CART algorithm. Therefore, the C4.5 algorithm may be helpful in interpreting the roles of variables related to ploughing, soil conservation or the UAA, that were not handled by the CART.

4.2 Local factors

In all three areas, the UAA was ranked as the second most important variable separating the Absence and Presence groups (*Total_area*, Figure 2.4). Looking more closely at the data, we noted that farms growing cereal–legume intercrops tended to have a greater UAA than those that were not. Specifically, farms with intercrops in the Western, Eastern, and Southern areas were on average 11, 65, and 51 ha larger, respectively, than those without. Based on the crop types grown in the three areas, it is evident that farms with cereal–legume intercrops have higher forage and grass coverage than farms without (on average, +28, +48, and +47 ha in farms with intercrops in the Western, Eastern, and Southern areas, respectively). Therefore, we suggest that the observed difference in UAA between farms with and without cereal–legume intercrops is partly due to the variations in forage and grass areas, which reflect the presence of animals or at least crops for animal feed.

In the Western and Eastern areas, just as observed at the national level, the proportion of farm area under organic farming (*Prop_organic*, Figure 2.4) was the most discriminating

factor between the Presence and Absence groups. However, we noted that the proportion of farm area in the process of conversion to organic farming was also among the top 10 variables in the Western area. Adoption of cereal–legume intercropping began earlier in the Western area than in the Eastern area (Figure 2.1), so knowledge of the practice may have diffused more widely, leading farmers to adopt cereal–legume intercropping earlier in the process of conversion to organic farming than in the Eastern area.

In the Eastern area, the proportion of direct seeding (*Prop_direct*, Figure 2.4) emerged as the eighth most important variable for discriminating between the Presence and Absence groups. In the Presence group, the area under direct seeding was on average +27 ha larger than in the Absence group (36 ha vs. 9 ha, respectively). However, this factor was less helpful in discriminating between the groups at the national level, as the average difference was only +3 ha for the Presence group. In the Eastern area, marketing through agricultural cooperatives (*Coop*, Figure 2.4) was also one of the top 10 factors for classifying the Absence and Presence groups. However, it is not possible to conclude why this factor seems more discriminating in this area than in the others or at the national level as the rate of marketing via cooperatives does not differ significantly between the Presence and the Absence groups. Yet the variable sits in the tenth position, so it is not surprising that we cannot identify significant differences when considering only this variable (without interactions with the first nine variables).

In the Southern area, the proportion of farmland cultivated under organic farming was only the fifth most important variable, whereas on-farm grain storage was ranked first. In this area, which is dominated by cattle and sheep farming and has low-potential land compared to the national average (Table 2.1), cereal–legume intercropping has been practised for many years with the aims of improving feed autonomy for the livestock sector and securing production against climate hazards and diseases (Clouet et al., 1986). On-farm storage could be an indicator of this self-sufficiency, and livestock farming currently seems to be a more discriminating factor than conversion to organic farming in this area. However, via the diffusion of agriculture innovation, the presence of cereal–legume intercrops in livestock farms in the area may have influenced their adoption on other farms and even fostered the conversion to organic farming.

Besides the local factors, our investigation revealed that the first eight factors identified on a national scale were present in each of the three focus areas. These factors included organic farming, on-farm grain storage, and the presence of livestock with a certain degree of feed

autonomy. However, given the structure of our study, this finding was not unexpected; the three zones we studied in more detail accounted for 38% of the total area cultivated with cereal–legume intercrops in France in 2020.

4.3 Contributions of the study for the adoption of cereal–legume intercrops

In this paper, we present an exhaustive analysis on 43,968 farms representative of the French arable crops, mixed crop–livestock and livestock farming systems in 2020. Therefore, our study complements the case studies that have been conducted so far and that helped formulate hypotheses on the barriers and levers to the adoption of cereal–legume intercrops. Although our methods and results do not allow us to conclude on causal links between the farm characteristics highlighted and the adoption of the practice, they still give insights on some levers that could be tested to foster the adoption. Indeed, we showed that the belonging to a farm machinery cooperative is one of the main characteristics of the farms adopting cereal–legume intercrops. In the French context, farm machinery cooperatives are local groups of farmers that invest together and share machinery and/or workforce. Those farm machinery cooperatives also provide spaces for the farmers to exchange on their practices. Therefore, at the farm and farmer’s scale, it could be relevant to initiate local collective actions to help farmers overcome technical or material barriers (through farm machinery cooperatives or other groups of farmers, for example). The association we showed between the presence of cereal–legume intercrops and organic farming, feed autonomy for the livestock and on-farm grain storage can refer to the use of cereal–legume intercrops. In organic farming, outlets exist in long distribution networks for binary cereal–legume intercrops. Such outlets are still lacking in conventional farming, so intercrops are mainly used on farms for animal feed, or possibly on-farm transformation. At the supply chain scale, for cereal–legume intercropping to diffuse beyond organic and/or livestock farms, it seems necessary to secure the outlets and develop market opportunities.

4.4 Relevance of our method and limits of the study

Our study had some limitations and may raise questions about our method choices. First, our study is based on a random forest approach to identify the most important variables in discriminating the Presence from the Absence cases. However, one limit of the random forest approach is that we could not directly interpret the contribution of each variable to the

classification in the Presence or Absence groups. An alternative method for our aim would be to use a logistic regression, which allows a binary classification of the data and is easier to interpret as the estimates given for each predictor variable can reflect its positive or negative impact on the probability of finding cereal–legume intercropping on farms. However, logistic regressions assume independence between the predictor variables (42 variables detailed in Table 2.1), and a linear relationship between those predictor variables and the logit of the outcome (in our case, the probability of presence of cereal–legume intercropping). Those assumptions were not met in our dataset, and we used variables that might be correlated, as we wanted to rank the 42 predictor variables and also understand their potential interactions to characterise the farms that adopt cereal–legume intercropping. Therefore, the logistic regression does not seem ideal to address our research questions. Additionally, Couronné et al. (2018) conducted a comparative study between logistic regression and random forest and concluded that random forest “copes better with large numbers of features” and “performs better than [logistic regressions] in the presence of a non-linear dependence pattern between features and response”.

Another element we wanted to discuss is the oversampling method (presented in Section 2.3) that was used to penalise the CART model by giving more weight to the minority observations, i.e., those in the Presence group. To do this, we chose to replicate these observations, which carried a risk of overfitting as the CART model could potentially learn the data too well and give a biased result. To counter this risk, we added noise to two randomly selected variables for each replicate. For instance, we modified the value of the UAA and the value of the proportion of ploughing while keeping the values within the actual range of the data. In the end, the CART obtained was very similar to the tree shown in Figure 2.3, but with an additional node on cattle density. However, after analysis, we noticed that this node was empty, meaning that no real data was classified by this node. The node was created because of the applied noise, which ended up giving weight to a variable with inconsistent values (Annex 6).

To gain a better understanding of the relationships between the variables identified by the random forest and the presence of cereal–legume intercropping at the national level, we chose to use the first 10 variables to construct a CART as we noted a “gap” in importance values in Figure 2.2. However, we were aware that such choice might have biased the results obtained with the CART. Therefore, a further test was conducted to validate the robustness of the

approach, which involved building the CART with 36 variables selected using a recursive selection algorithm developed by Kuhn (2008). Similar results were obtained, with only the node for the type of farming missing (Annex 7). This result provides further evidence that our approach is robust for this application.

Furthermore, we strove to accurately translate the factors identified in the literature into variables for analysis, but our database did not allow us to translate them exactly. For example, sorting was frequently cited as an obstacle to the adoption of cereal–legume intercrops, but we conveyed it using variables related to cooperatives, on-farm grain storage, and on-farm transformation because the 2020 French Agricultural Census did not specifically address crop sorting (whether it be on-farm sorting, with a shared sorter in a farm machinery cooperative, or by a professional sorter). Finally, it is difficult to see how each of the identified variables operates and interacts with the others, especially for those not covered by the CART. In this respect, our results should be supplemented by more in-depth investigations into the rationale behind farmers' actions, perhaps in the three areas we identified in Western, Eastern, and Southern France.

5 Conclusion and perspectives

In this study, we demonstrated existing links between cereal–legume intercropping and various agricultural or farm characteristics on French farms, aiming to be as exhaustive as possible by using data from the French Agricultural Census. The most important characteristics were organic farming, the presence of livestock, on-farm grain storage capacity, and belonging to a farm machinery cooperative. Our analysis confirmed the hypothesis that organic farming and livestock production were strongly associated with the adoption of cereal–legume intercrops both at the national level and in smaller, dynamic areas.

Our findings raise questions about transferring the practice to other farm models: should cereal–legume intercropping expand to other types of farming than organic farming and livestock farming? If so, how? Our study shows that cereal–legume intercrops are particularly beneficial for feed self-sufficiency, which supports their development in conjunction with crop–livestock interactions.

In France, some agricultural cooperatives and agricultural and food industries are beginning to study this practice in conventional farming circuits. Identifying the farm

characteristics associated with the presence of cereal–legume intercropping can improve our understanding of their relevance for the farms' activities and thus allow us to promote them efficiently, whether at the national level (e.g., through public policies) or local levels, e.g., with the involvement of agricultural or farming support services. However, it is not possible to conclude with certainty that these characteristics can be used as levers to foster the adoption of cereal–legume intercropping. In this context, case studies on areas with observed dynamics – such as the Western, Eastern, and Southern areas identified in this study – would complement our results and prove highly valuable for a more in-depth study of the farmers' pathways that led to the adoption of the practice as well as the roles of the various factors highlighted here in these pathways.

The present study focused on a single practice, namely cereal–legume intercropping, to gain a better understanding of the apparent contradiction between the benefits it provides in the context of agroecological transition and its low adoption rate in France. We believe that the methodology proposed here can be reproduced for other practices to identify links with other practices or farm characteristics.

CONCLUSION DU CHAPITRE 2 SUR LES CARACTÉRISTIQUES D'EXPLOITATIONS AGRICOLES LIÉES A L'ADOPTION DES MÉLANGES CÉRÉALES-LÉGUMINEUSES ET TRANSITION

Nos résultats montrent que l'agriculture biologique, le stockage de grains à la ferme, la présence d'animaux d'élevage – et notamment de bovins et ovins – avec une certaine autonomie alimentaire, et l'appartenance à une CUMA sont les principales caractéristiques liées à l'adoption des mélanges céréales-légumineuses dans les exploitations agricoles françaises à orientations grande culture, élevage ou polyculture-élevage. Ces facteurs suggèrent que l'adoption des mélanges céréales-légumineuses est fortement liée à l'existence de débouchés à l'extérieur de l'exploitation (ex : organismes de collecte et de stockage collectant les mélanges en agriculture biologique, stockage des mélanges sur l'exploitation pour tri et/ou transformation ultérieure), ou de modalités de valorisation au sein de l'exploitation (ex : stockage des mélanges sur l'exploitation puis autoconsommation pour l'alimentation d'élevage). Les CUMA semblent importantes pour lever des freins matériels, *via* le partage d'outils ou de main-d'œuvre, mais aussi cognitifs, en favorisant les échanges d'expérience entre agriculteurs et agricultrices.

Toutefois, avec cette étude portant sur des caractéristiques d'exploitations en 2020, nous ne pouvons pas conclure avec certitude sur les rôles joués par ces différentes caractéristiques dans l'adoption des mélanges céréales-légumineuses. Pour cela, il nous semble nécessaire d'intégrer la vision de différents acteurs sur la pratique : agriculteurs et agricultrices, mais aussi services de supports et acteurs de l'aval. L'importance des CUMA et les dynamiques territoriales observées suggèrent que des processus d'adoption se jouent au niveau des territoires.

Dans la suite, nous cherchons à préciser dans quelles logiques d'agriculteurs et agricultrices les différentes caractéristiques identifiées sont intégrées, et le cas échéant, à mettre en lumière d'autres facteurs favorisant l'adoption des mélanges céréales-légumineuses en étudiant des trajectoires d'adoption de la pratique au sein d'un territoire.

CHAPITRE 3 : TRAJECTOIRES COLLECTIVES ET INDIVIDUELLES D'ADOPTION DES MÉLANGES CÉRÉALES–LÉGUMINEUSES

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS

Les mélanges céréales–légumineuses, malgré leurs bénéfices sur la gestion des bioagresseurs et sur les productions, sont encore peu adoptés en France. Des études telles que des traques aux innovations ont permis de préciser les freins et motivations à l'adoption des mélanges céréales–légumineuses, mais nous manquons encore de connaissances sur les conditions favorables à leur adoption puis leur perpétuation au sein des exploitations agricoles.

Nous avons identifié un groupe d'agriculteurs et agricultrices du CIVAM du Pays Châtelleraudais, en France, au sein duquel la question des cultures associées a été centrale à un moment donné. Nous avons mené des **entretiens semi-directifs** auprès de 15 agriculteurs et agricultrices de ce groupe et 7 autres types d'acteurs (technicien d'une coopérative agricole présente sur le territoire, animatrice du groupe, conseillers et conseillères agricoles intervenant sur le territoire et ailleurs) pour identifier les facteurs favorisant l'adoption des mélanges céréales–légumineuses. A partir de ces entretiens, nous avons reconstitué les **trajectoires collectives et individuelles d'adoption des mélanges céréales–légumineuses**.

Pour reconstituer les trajectoires, nous avons d'abord mobilisé le cadre d'analyse de Moulin et al. (2008) pour identifier des **phases de cohérences** et des **transformations** menant d'une phase à l'autre, puis nous avons réalisé une **typologie de trajectoires individuelles** (Chantre, 2011). Au niveau individuel, nous avons aussi cherché à **replacer les mélanges céréales–légumineuses dans le fonctionnement global des exploitations** (Capillon, 1993).

Nos résultats montrent une **trajectoire collective centrée sur la recherche d'autonomie et d'économie**, avec quatre phases de cohérence : les premières réflexions sur l'agriculture bas-intrants, la recherche d'autonomie et d'économie sur les systèmes de culture et d'élevage, la reconception des systèmes pour aller vers une agriculture sans pesticide, et une dernière phase au cours de laquelle les mélanges céréales–légumineuses deviennent une pratique de « base » dans les systèmes en agriculture biologique. En lien avec cette trajectoire collective, nous avons identifié **trois types de trajectoires individuelles** :

- La trajectoire A, *Adoption des mélanges céréales–légumineuses suivant un processus collectif*, concerne cinq agriculteurs qui ont fondé le groupe dans les années 2000, et qui ont adopté les mélanges céréales–légumineuses grâce à un **processus collectif** et en **bénéficiant de l'accompagnement d'un technicien** dans le cadre du CIVAM ;
- la trajectoire B, *Adoption en agriculture biologique profitant de voies déjà ouvertes*, concerne trois agriculteurs et agricultrice ayant rejoint le groupe plus tard, avec une

installation plus récente (entre 2017 et 2019) et directement en **agriculture biologique**, et qui ont bénéficié des connaissances acquises par les premiers – mais sans reposer autant sur la dynamique collective – adoptant ainsi les **mélanges céréales–légumineuses dès le départ**, également en lien avec leurs **convictions personnelles** ;

- la trajectoire C, *Adoption pour changer dans des systèmes conventionnels*, concerne trois agriculteurs qui après avoir rencontré des **difficultés sur leurs systèmes en agriculture conventionnelle** (ex : canicule ou sécheresse impactant les ressources fourragères), ont initié une **désintensification** reposant en partie sur l'intégration des mélanges céréales–légumineuses, et qui ont bénéficié de **conseils de la part des agriculteurs et agricultrices du groupe pour concevoir leurs mélanges**.

Dans les trois types de trajectoires individuelles, le travail **collectif** et les échanges entre pairs ont été déterminants, que cela soit pour **lever des freins cognitifs, techniques ou matériels**. Aussi, nous montrons dans notre cas d'étude qu'une fois adoptés, les mélanges céréales–légumineuses restent pratiqués sur les exploitations, mais **évoluent selon les besoins, objectifs et contraintes** des exploitations et des agriculteurs et agricultrices. **Les types d'usages et de débouchés sont déterminants pour le choix des types de mélanges**.

ARTICLE EN ANGLAIS – ADOPTION AND DEVELOPMENT OF CEREAL–LEGUME INTERCROPPING ON FARMS: ROLES OF COLLECTIVE DYNAMICS IN INDIVIDUAL PATHWAYS

To be submitted to *Agronomy for Sustainable Development*

Authors: Elodie Yan^a, Marco Carozzi^a, Philippe Martin^a

^a Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SADAPT, F-91120, Palaiseau, France

1 Introduction

Intercropping is a crop diversification practice consisting of growing two species or more on the same plot at the same time (Willey, 1979). Intra-plot species diversity enables natural regulations of crop pests, which makes intercropping a highly relevant practice in the context of ecological intensification (Doré et al., 2011; Malézieux et al., 2009). Cereal–legume intercrops particularly rely on the complementarity between species, as legumes are able to capture nitrogen from the air, thereby leaving soil nitrogen available to cereals, and cereals act as stakes for legumes so they are less prone to lodging (Bedoussac & Justes, 2010; Kontturi et al., 2011). The heterogeneity of the intercrop, with differences in height between the species and the alternation of species within the plot, creates natural barriers to insects and diseases (Boudreau, 2013; Zhang et al., 2019). Additionally, the increased soil cover conferred by the intercrop can enhance its competitiveness against weeds (Bailey-Elkin et al., 2022; Carton et al., 2020). As a result, cereal–legume intercrops require fewer inputs than sole crops, thereby reducing reliance on chemical pesticides and nitrogen fertilisation (Yan et al., 2024). Moreover, such intercrops can achieve yields comparable to, or even exceeding those of pure crops, especially in low-input conditions (Bedoussac et al., 2015; Pelzer et al., 2012) and also increase interannual yield stability (Raseduzzaman & Jensen, 2017).

In Western European systems, we note a low adoption rate of cereal–legume intercrops (e.g. Timaeus et al., 2022). In France, such intercrops represent no more than 1% of the arable lands in 2022, according to the French Land Parcel Identification System (IGN, 2023). In order to meet the goal of the French National Plan Ecophyto to reduce pesticide use by 50% by 2030, compared to the 2011-2013 average (Ministère de l’Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2024a), cereal–legume intercropping appears as one of the key practices to include in cropping systems.

Recent studies based on farm surveys or workshops involving farmers highlighted multiple obstacles to the adoption of cereal–legume intercropping (e.g. Himanen et al., 2016;

Mamine & Farès, 2020; Timaeus et al., 2022). Farmers may face technical difficulties such as the lack of certified pesticides or fertilisers suitable to use on the intercrops (Mamine & Farès, 2020), as well as the lack of information on the appropriate management methods to adopt. For instance, it can be challenging to decide which species to choose, at what density to sow, and when and how to harvest the intercrops (Bonke & Musshoff, 2020; Mamine & Farès, 2020). There are also material difficulties, such as the need to invest in specific equipment – or adapt the equipment already present on the farm – for sowing, harvesting, and potentially sorting the intercrops. A major obstacle is the lack of outlets for the harvested intercrops and the existing concerns from the industry about the quality of the harvest. This is especially true for the production of baking flour, where legume residues in wheat are often perceived as unacceptable (Timaeus et al., 2022). Among the many obstacles, Bonke & Musshoff (2020) identified the most significant as the lack of outlets, the differences in maturity between the species in the intercrops, and insufficient economic benefits, particularly in conventional agriculture systems.

Among the farmers who grow cereal–legume intercrops, several reasons explain why they decided to adopt the practice, e.g. reducing the inputs, increasing yields, and increasing self-sufficiency for animal feed on the farm (Verret et al., 2020). The characteristics of the production system and its broader environment directly influence the farmers' objectives and, hence, the choice of species to intercrop (Verret et al., 2020). In a study at a national scale, we showed that local adoption dynamics exist in France, with some regions appearing as “hotspots” and from where the practice is spreading over time (Yan et al., 2025). The diffusion of cereal–legume intercropping appears to be facilitated by some farm characteristics, especially organic farming (where outlets exist for cereal–legume intercrops), the presence of livestock (particularly ruminants, that can be fed with cereal–legume intercrops), and the belonging to an agricultural machinery cooperative, which can facilitate investments in specific equipment and foster interactions with peers (Yan et al., 2025). However, how these farm characteristics influence the adoption of cereal–legume intercropping remains unclear.

The study of adoption pathways for farming practices can help put into perspective the different determinants of practice adoption on a farm scale (e.g. Cerf et al., 2010; Mawois et al., 2019; Revoyron et al., 2022), which can be particularly useful for the dissemination of a farming practice considered innovative, such as cereal–legume intercropping. Research on the adoption of practices often mention peer-to-peer interactions as decisive, as they foster exchanges of

techniques and advice (Chantre & Cardona, 2014; Ha et al., 2023), and collectives can thus accelerate adoption processes on their territories (Goldenberg et al., 2009).

Therefore, we aimed to further investigate the adoption of cereal–legume intercropping and to identify pathways to its adoption at a territorial scale. Our objectives are to (i) identify the combinations of factors – both intra- and extra-farm – that foster the adoption of cereal–legume intercropping and (ii) study how changes in the intercrops components relate to farm characteristics along these pathways. We believe that this work can provide a better understanding of how and where to leverage strategies to promote cereal–legume intercropping, as well as the conditions under which these strategies are most effective.

2 Material and methods

2.1 Analytical framework

To study the pathways towards the adoption of cereal–legume intercropping, we used the analytical framework defined by Moulin et al. (2008). In this framework, on-farm surveys are conducted and analysed to link changing processes, farm trajectories and environmental transformation. The pathways are divided into “*phases of coherence*”, within which the farm presents the same coherence in its functioning. Within these phases of coherence, “*progressive modifications*” can occur while maintaining the same coherence. If a modification leads to a change in coherence, it is referred to as a “*transformation*” (Figure 3.1). Based on semi-directive interviews with farmers and other agricultural stakeholders, we reconstructed the pathways leading to the adoption of cereal–legume intercrops in a study area. With the farmers’ individual pathways, we drew up a typology of pathways by identifying the common combination of factors between the individual pathways (Chantre, 2011). Finally, we dove deeper into each type of individual pathway to study the development of intercropping practices on farms and their links to the other production factors (Capillon, 1993).

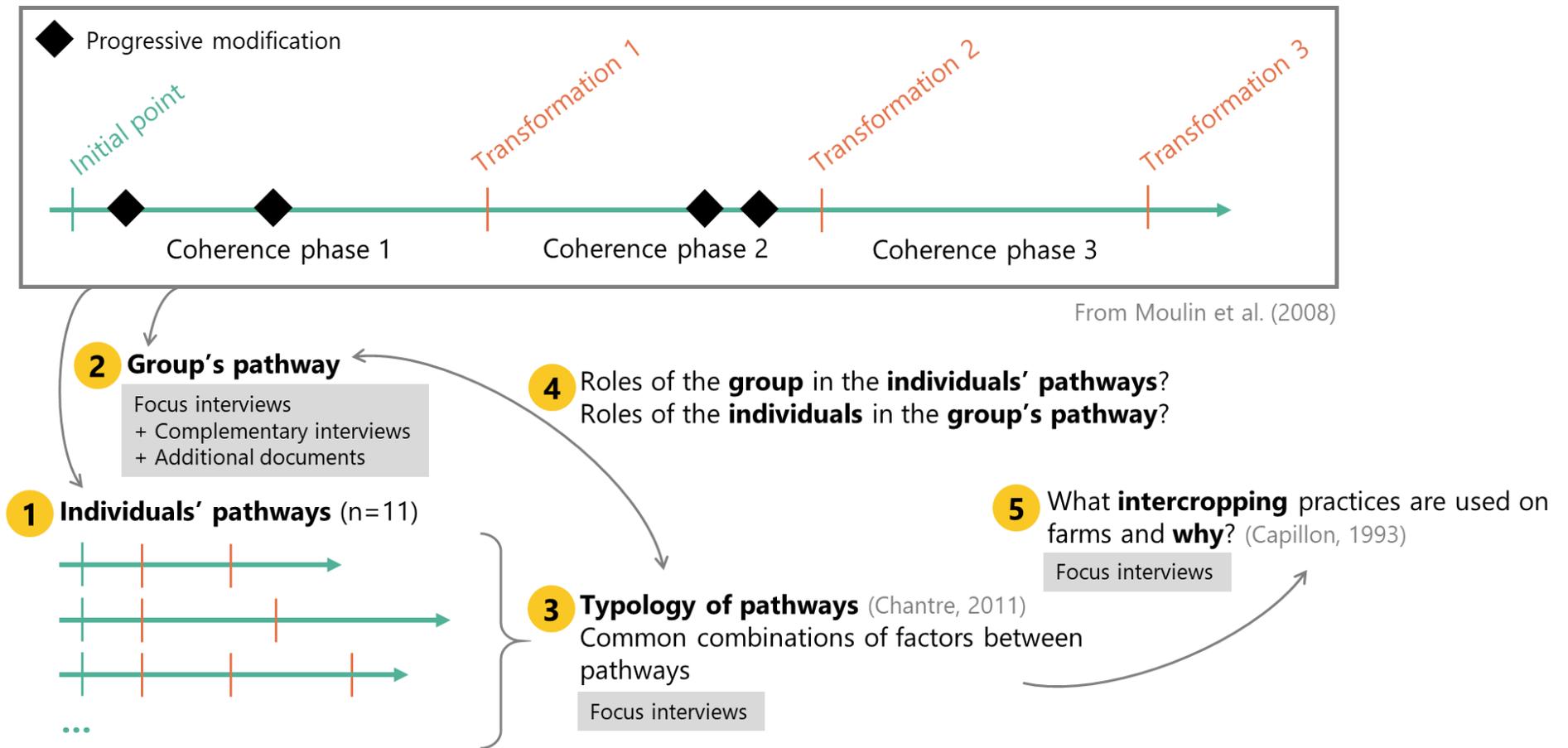


Figure 3.1: Analytical framework, adapted from Moulin et al. (2008), Chantre (2011) and Capillon (1993). The focus interviews refer to the interviews of the eleven farmers growing cereal–legume intercroppings, the complementary interviews refer to the interviews with the farmers who do not grow cereal–legume intercroppings, the agricultural advisors and the other agricultural stakeholders (Figure 3.2).

2.2 Data collection

2.2.1 Study area and survey sample

In order to study the pathways that led to the adoption of cereal–legume intercropping at a territorial scale, we used different rules and methods to identify a study area. Based on results from Yan et al. (2025), we focused on some specific areas where adoption dynamics had been observed at the French national scale. Since cereal–legume intercrops appear less developed in arable farming systems, we focused on areas oriented towards arable farming or with a significant proportion of arable farming compared to livestock farming. This focus was motivated by two reasons: (i) to understand how cereal–legume intercrops could develop in arable farming systems in a particular area when the practice remains underdeveloped in most arable farming areas, and (ii) to assess whether the practice of cereal–legume intercrops in livestock farming or mixed crop–livestock farming influences its adoption in arable farming systems. To identify a study area, we used several sources:

- Use of **databases such as the French Land Parcel Identification System or the French agricultural census** to identify areas with high proportions of cereal–legume intercrops on arable land, which stand out from the rest of France;
- search for **cooperatives or traders collecting cereal–legume intercrops**, as arable farms often need these structures to add value to their production, especially if the crops are not self-used on the farm;
- search for **national or local press articles** mentioning cereal–legume intercrops;
- look for **websites or communications** (e.g. from chambers of agriculture) that give particular attention to this practice at a local level.

We then cross-referenced the results from each of these inputs with data from agricultural statistics on the technical and economic orientation of farms in France in 2020. This allowed us to target areas predominantly oriented towards arable crops, or with a balance between arable crops and mixed crop–livestock or livestock farming.

We finally spotted a participatory research project on cereal–legume intercrops in the press, that took place between 2015 and 2017. This project was named APACH (*“Association de Plantes en Agro-écologie dans le Châtelleraudais”*, or *“Association of plants in agroecology in the Châtelleraudais”*) and involved eight farmers located in the Châtelleraudais region, in the Vienne department (Figure 3.2), and several stakeholders, including the CIVAM (*“Innovative*

Centre for the Valorisation of Farming and Rural areas”) of Pays Châtelleraudais. The CIVAM network consists of local groups (130 across France) that gather farmers and rural stakeholders who work collectively towards the agroecological transition (CIVAM, 2020).

The collective approach in the APACH project caught our attention, and we wanted to know more about its origins and implications, or in other words, how the collective dynamic influenced the individuals’ pathways for the adoption of cereal–legume intercrops and reciprocally, how the individuals influenced the collective pathway. To understand how and in which context the project was initiated, we interviewed three agricultural advisors: the current facilitator for the CIVAM du Pays Châtelleraudais, an adviser working for an agricultural cooperative collecting intercrops on the territory, and an adviser working at the departmental scale specialised in organic arable farming. The three advisers were asked about intercropping in their areas: the history and dynamics of the practice, what types of intercrops and in which types of farms they are grown, and which existing opportunities for marketing or consumption. The facilitator was asked more specific questions on the functioning of the CIVAM, its history and the APACH project.

Concerning the on-farm surveys, we first interviewed three farmers who were involved in the project, whom contacts were found in a project leaflet online. Then, following a “snowball sampling” method (Goodman, 1961), the interviewees (facilitators as well as farmers) themselves provided us with other contacts. Finally, we conducted individual surveys for fifteen farmers, twelve of whom were growing intercrops, two were not, and one of whom was described with a “hybrid” system because he was growing intercrops on a farm for which he works as an agricultural contractor, but not on his own farm. Our sample of fifteen farmers is not exhaustive as it does not cover the entire CIVAM group. However, we had the feeling that we had reached a saturation point (Savoie-Zajc et al., 2009), as the information given by the latest interviewed farmers did not enrich the information gathered from previous interviews, and when asking for new contacts, we kept on being given the same ones. Our surveys with farmers were structured as follows: first, we asked all fifteen of them to describe their farm and its environment, with aspects such as farm history, crops, livestock, marketing, sources of advice (Capillon & Manichon, 1991). Then, for farmers who were growing intercrops, we inquired about their reasons for adopting this practice, asked for details on the types of intercrops grown over time, and for their objectives, failures and successes with this practice. For farmers who were not growing intercrops, we sought to understand the reasons for this choice and

whether they would consider to test the practice in the future. The fifteen farmers surveyed were all involved in the CIVAM group.

The Vienne department has an oceanic climate characterised by cool to warm summers, cool to mild winters, and moderate rainfall distributed throughout the year. The Châtelleraudais has very heterogeneous soils, which can impact agricultural practices and potential crop yield. Most of the surveys were conducted in the Châtelleraudais (12 farmers), located in the Northern part of the Vienne, which is now dominated by arable farms. Other on-farm surveys with three farmers, also members of the CIVAM group, were carried out in the Southern part of the Vienne, where mixed crop–livestock farming is dominant. In 2020, 56% of farms in the Vienne were specialised in arable farming, while 39% were specialised in livestock or mixed farming (Agreste, 2020b).

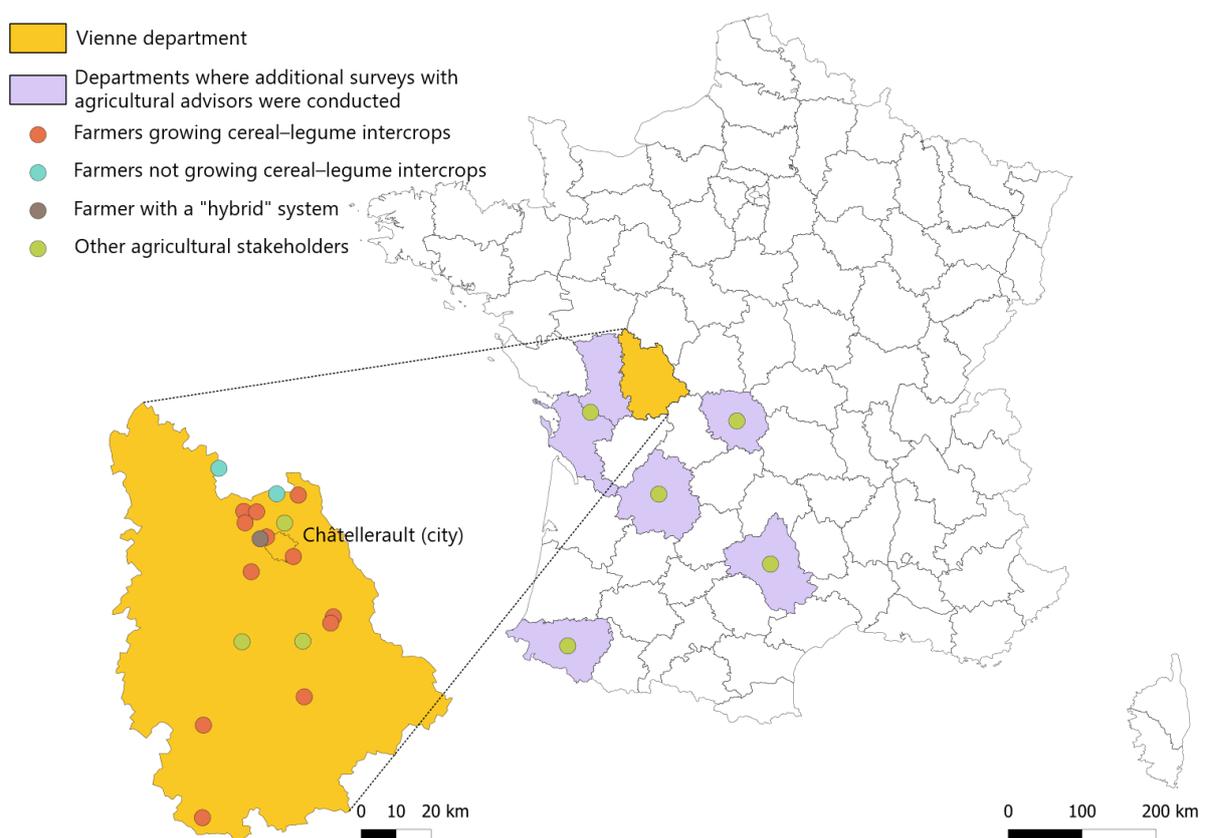


Figure 3.2: Location of the interviewees. The dots represent the farmers and other agricultural stakeholders interviewed in the study area, comprised in the Vienne department (yellow). Five agricultural advisors were interviewed outside the study area, in the Chambers of agriculture of the departments in purple.

2.2.2 Surveys of other stakeholders outside of the study area

To complete the survey carried out within the study area, we conducted additional interviews with advisers from five Chambers of agriculture⁶ (Figure 3.2), in six departments: Charente and Deux-Sèvres (those two share the same Chamber of agriculture), Haute-Vienne, Dordogne, Aveyron, Pyrénées-Atlantiques. The five advisers were all involved in another research project named CARPESO ("*Concilier Autonomie alimentaire et Réduction significative des Pesticides dans les systèmes de polycultures-Elevage du Sud-Ouest de la France*" which translates as "Conciliate feed self-sufficiency and significant pesticide reduction in mixed crop–livestock systems in South-West France") aiming at reducing pesticide use and improving feed self-sufficiency in mixed crop–livestock farming systems. These interviews provided deeper insight into the motivations for adopting cereal–legume intercrops, and helped us understand the historical context and potential for broader dissemination in the surveyed advisers' respective areas. This was useful to understand how our study area compared with other regions in France where intercrops are diffusing. However, we did not consider this second project as an additional case study, as it was centered around breeders, in departments dominated by livestock farming.

2.3 Building collective and individual pathways for the adoption of cereal–legume intercropping

To comply with the General Data Protection Regulation (Regulation (EU) 2016/679), we asked all the interviewees for their consent in recording their respective interviews, and we committed not to diffuse their data outside of our research project. As the interviewees agreed on recording their interviews, we could use the records to fully transcribe each interview, which served as the main material for building the pathways.

2.3.1 Building the collective pathway

The group's pathway towards the collective initiatives on intercropping began at its creation. We used data from the farmers' and the group facilitator's interviews to reconstruct

⁶ Chambers of agriculture are "public bodies representing French farmers and the rural world. [They] offer advisory services to farmers and other rural stakeholders, test new products, technologies and practices" (Chambres d'agriculture France, 2024). They are organised by department or group of departments.

the pathway. We cross-referenced the survey data with documents and publications produced by the CIVAM, found on-line. Therefore, we were able to reconstruct the history of the CIVAM and to identify the place of the intercrops in this history.

2.3.2 Farmers' pathways and typology

For each farmer who grew intercrops, we traced their individual pathway from the moment they first arrived on the farm, whether as an employee or farmer. We used the interview to reconstruct the farm's history, as told by the farmer, until the day of the interview. To understand the overall coherence of the farm over time, we screened the interview transcript to classify the data into eight different categories, based on the scheme of the determinants of the combination of productions (Capillon & Manichon, 1991): family-farm characteristics, farm history, physical environment (climate and soil characteristics), work conditions, equipment and buildings, environmental-related initiatives, advice and exchanges with other agricultural stakeholders, economic environment, cropping systems, and livestock characteristics. As our object of interest, we also studied the intercrops over time to trace changes in the types of intercrops and their consistency with the other changes at the farm level.

We thus created a timeline that enabled us to identify the changes that may have taken place over time. By identifying common modification sequences among farmers, we were able to identify types of pathways for the adoption of cereal–legume intercrops. Within these pathways, following Moulin et al. (2008), we identified coherence phases at the farm scale and the transformations that led to the change from one coherence phase to the next.

3 Results and discussion

3.1 Collective pathway

The group of farmers was formally established in 1999 by a dozen arable cropping farmers and breeders, all practising conventional farming. Based on the farmers' individual pathways, we highlighted that the group has been through four *phases of coherence* since its creation (Figure 3.3).

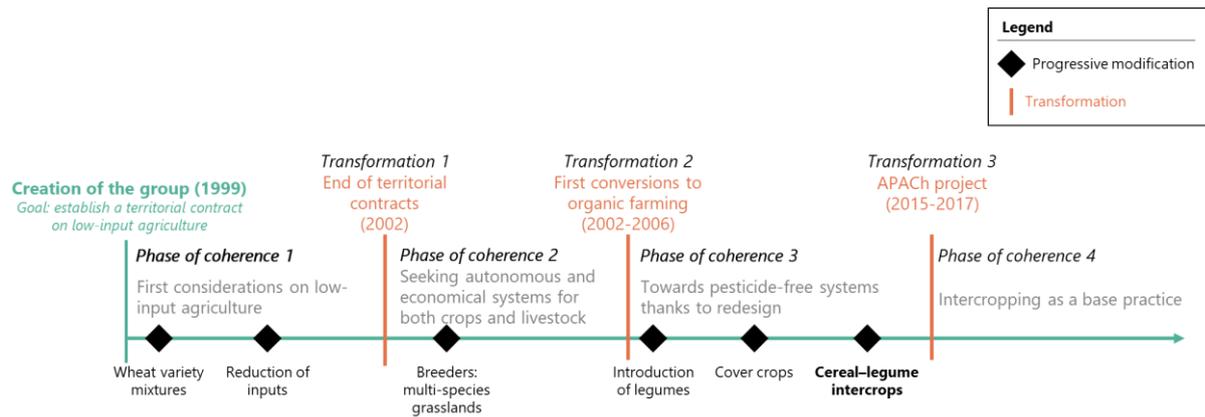


Figure 3.3: Collective pathway with four phases of coherence. The diamonds show the *progressive modifications* within the *phases of coherence*. The *transformations* between the *phases of coherence* are represented by red vertical lines.

3.1.1 Phase 1: Establishment of the group and first considerations on low-input agriculture

The group's first *phase of coherence* began in 1999 with the creation of the group (Figure 3.3). This first phase was marked by the first considerations on low-input cropping systems and the reduction of operational costs. Indeed, the group was created to establish a territorial contract on low-input agriculture. During this phase, farmers began to work together assisted by an independent technical advisor – which means that he receives no aid or subsidies from, e.g. companies or agricultural cooperatives selling inputs – and learned to detect signs of fungal diseases on their wheat so they could gradually stop the systematic fungicide treatments. They also engaged in training sessions focused on cost reduction and margin optimisation. As a result, they started growing wheat varietal mixtures, which allowed them to reduce the use of chemical products and, thus, the operational costs. However, at that time, they kept the option of using chemical products on their crops if needed.

3.1.2 Phase 2: Seeking autonomous and economical systems for both crops and livestock

From 2002 to 2006, a significant *transformation* occurred within the group, marked by the first conversions to organic farming, which led to the second phase (Figure 3.3). A general shift towards autonomous and economical systems for both crops and livestock characterised this phase. In this phase, the group kept on reducing the use of chemical inputs and started to develop more self-sufficiency by using farmer seeds, and breeders transitioned from

purchasing concentrates to cultivating grains and forage on farms to feed their animals. During this phase, the group expanded and welcome new members committed in the same objectives.

3.1.3 Phase 3: Towards pesticide-free systems thanks to redesign

After 2006, another *transformation* occurred within the group as some of its founders had converted to organic farming, and others figured that the fewer chemical inputs they used, the less they wanted to use, and converting to organic farming was eventually easier because farmers would stop wondering if they should use chemical inputs or not, as stated by one farmer: “By dint of reducing, reducing, reducing pesticides, in three years I've reduced so much that I've converted to organic farming. It was simpler. That way, at least, there's no more discussion”. This marked the beginning of the third phase, characterised by eliminating chemical control through system redesign (Figure 3.3). Farmers who had not converted to organic farming yet began learning strategies from organic farmers, such as restoring nitrogen to the soil, covering the soil to limit weed propagation, and creating natural barriers against pests and diseases.

Therefore, over this third phase which lasted until 2015, intercropping started to spread widely among the group, including in conventional farms, where the intercrops were sold to breeders. This phase was marked by the group's participation in a three-year participatory research project on species and variety mixtures. In this project, eight farmers of the group worked along with researchers to implement and study the intercrops they have been cultivating before. Together, they made observations and measurements on biodiversity, pests and diseases, and yields. Yields were considered using the Land Equivalent Ratio, defined as “the relative land area required as sole crops to produce the same yields as intercropping” (Mead & Willey, 1980). Ultimately, the results of the project validated the empirical observations of the farmers on the benefits of the intercrops, which encouraged their commitment to continue the practice.

3.1.4 Phase 4: Intercropping as a base practice

Since the conclusion of the project in 2017, the group has entered a fourth phase, which is still ongoing (Figure 3.3). Some farmers – mainly among those who participated in the participatory research project – have become experts on intercropping and keep testing new

intercrops. Consequently, these farmers became a valuable resource and other farmers, both inside and outside the group, now ask them for advice. In 2023, there was a majority of organic farmers in the group (approximately 70 to 80%, according to the group facilitator), and intercropping had become a base practice in organic farming for the group members. While intercropping is no longer the central focus of the group, the group still feeds the discussions on other sustainable practices, such as farmer seed production or cover crops, to minimise tillage in organic farming systems.

3.2 Three types of individual pathways

Among the twelve surveyed farmers who grew cereal–legume intercrops, we identified three distinct types of pathways (Figure 3.4). Here, we only present the pathways that concern eleven of the twelve farmers growing cereal–legume intercrops. The twelfth, unlike the others, did not adopt cereal–legume intercropping himself but inherited this practice when he took over his parents' farm. We could not trace with precision his parents' pathway to the adoption of cereal–legume intercropping, and besides, we estimated that the drivers for adoption were different as the context – and so the barriers and potential levers – was not the same at that time (in the 1960s).

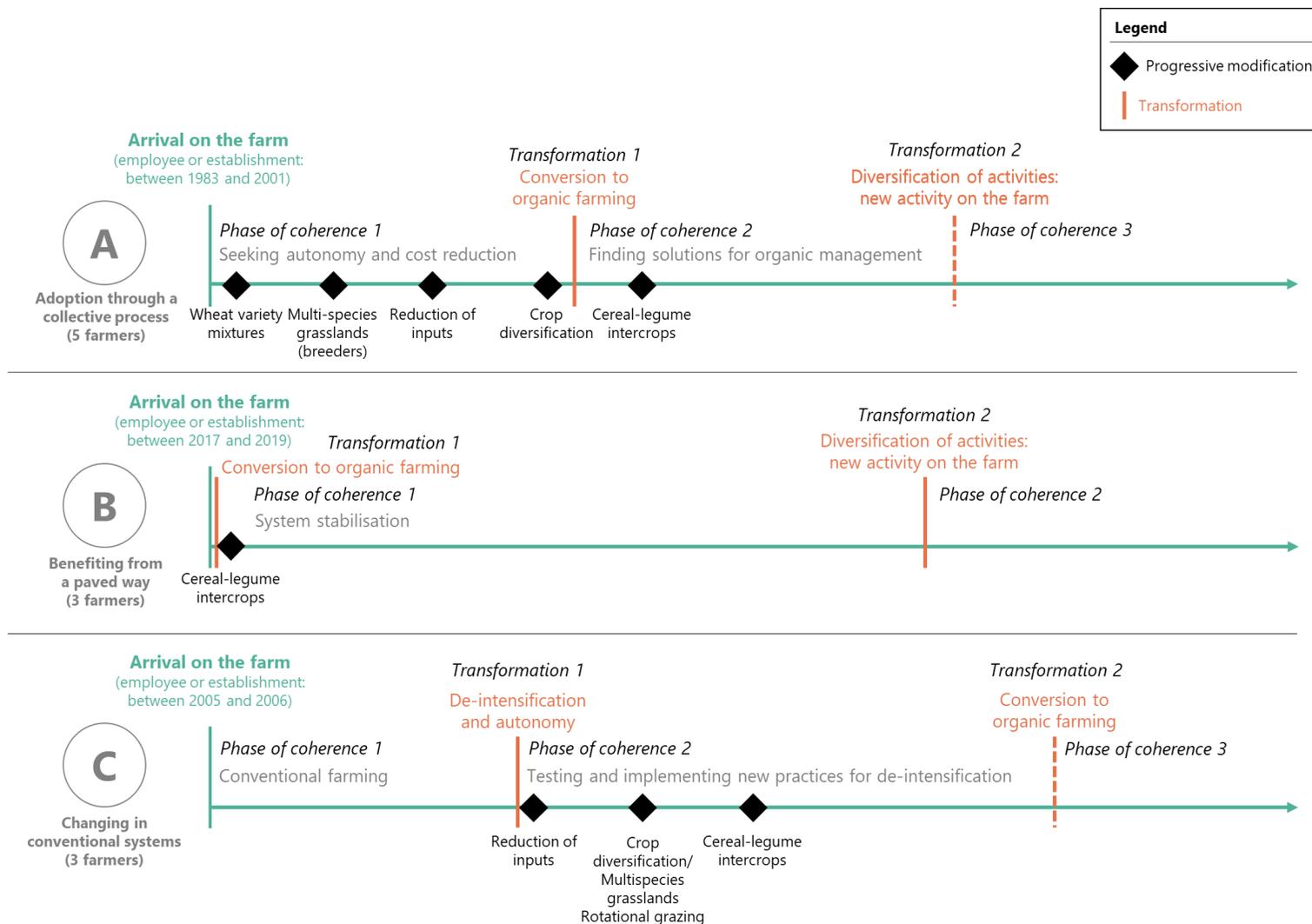


Figure 3.4: Three individual pathways. The diamonds show the *progressive modifications* within the *phases of coherence*. The *transformations* between the *phases of coherence* are represented with the red vertical lines. Dotted *transformation* lines represent *transformations* that did not concern every farmer of the pathway. For each pathway, the last *phase of coherence* was not given a name, as the previous *transformation* had just occurred at the time of the interview.

3.2.1 Type A: Adoption through a collective process

This pathway includes five farmers (two arable crop farmers and three breeders) who founded the group in the early 2000s with the aim of achieving greater autonomy and reducing costs on their respective farms. Therefore, this pathway is closely linked to the collective pathway. All farmers arrived between 1983 and 2001 on their farms. The first *phase of coherence* consisted of seeking autonomy and cost reduction. With support from independent agricultural advisers, the farmers first adopted wheat varietal mixtures to reduce the spread of diseases and, thereby, fungicide use. The three breeders also started growing multi-species grasslands to feed the livestock as they sought more self-sufficiency on animal feed. The farmers of type A progressively diversified their crops on their farms, e.g. by including legumes in the rotation (Figure 3.4). Then, the five farmers eventually converted to organic farming (the first conversion occurred in 2002). This led to the second *phase of coherence*, consisting of finding solutions for organic management. Convinced by the results obtained with wheat variety mixtures, these farmers naturally turned to cereal–legume intercrops to address problems of crop protection and nitrogen nutrition in organic farming.

3.2.2 Type B: Benefiting from a paved way

This pathway includes three arable crop farmers who joined the group more recently than farmers of type A as they arrived on their respective farms between 2017 and 2019. Unlike the early group members, these farmers entered an environment with well-documented practices when it comes to organic farming and intercropping. The first *phase of coherence* consisted in stabilising their production system and is characterised by an immediate conversion to organic farming, with the introduction of cereal–legume intercrops at the same time (Figure 3.4). At the time of the interviews, the three farmers were still in this *phase of coherence*. They were also in the process of diversifying the farm activities with e.g. a bakery or hazelnut trees. This diversification is likely to represent a *transformation* leading to a new *phase of coherence*, although the exact nature of this phase remains to be fully determined.

By joining the group at an early stage of their establishment, the farmers of type B had the opportunity to exchange knowledge with the group's founders and visit their farms, thereby acquiring inspiration. In this pathway, adopting cereal–legume intercrops was largely driven by the farmers' own perceptions of agriculture, namely a more diversified and

environmentally friendly approach, and necessarily in organic farming. The farmers in the type B pathway do not rely on the collective dynamic as much as the farmers of the type A pathway concerning intercropping. Rather, they mainly sought guidance from the experts within the group on an individual basis. However, they do rely on the collective dynamic on other issues (e.g. farmer seed production).

3.2.3 Type C: Changing in conventional systems

Type C pathway includes three breeders who arrived in their farms from 2005 to 2006 and for whom a specific event or problem (e.g. heatwave, drought) triggered a willingness to transform their conventional systems. This event led them to start a phase of de-intensification and research for more autonomy (*first phase of coherence*), in which they reduced their use of chemical inputs, enriched their crop rotation with new crops, and started growing multi-species grasslands for grazing (Figure 3.4). Eventually, they also started growing cereal–legume intercrops harvested as forage or grains for animal feed. Among them, one farmer converted to organic farming, while another one started growing cereal–legume intercrops without applying chemical input, although he was still in conventional farming. For the type C pathway, the collective dynamic played a crucial role, not only by inspiring the farmers to adopt cereal–legume intercropping but also by providing valuable knowledge and support for the design of their intercrops (e.g. crop species to choose, proportions between the species).

This pathway is likely the most common pathway for breeders to adopt cereal–legume intercrops. One of the main motivations for breeders is to secure their forage stock, and especially in environmental contexts prone to drought, as suggested by one of the agricultural advisors interviewed: “[cereal–legume intercrops] have developed a little more in recent years. And so it first appeared among beef cattle farmers, who needed to stock up [...] I think we will see an increase because of the current droughts. We've had a lot of breeders short of feed, short of fodder”.

3.3 Adopting cereal-legume intercrops to improve the farm autonomy

In the three pathways, we observed that the adoption of cereal–legume intercrops was linked to a willingness for greater autonomy, in particular among breeders who sought self-sufficiency for animal feed, which was also cited as one of the targeted objectives in Verret et

al. (2020). Cereal–legume intercroops provided a practical solution to introduce legumes in the rotation, especially in organic farming, where legumes are crucial for nitrogen fixation, but are challenging to grow without chemical pesticides, as they are sensitive to pests and diseases. Therefore, cereal–legume intercropping enables a greater autonomy in terms of nitrogen in the cropping systems (Pelzer et al., 2014). More generally, when it comes to crop diversification practices, farmers can be motivated by more autonomy and flexibility as they can get away from the constraints imposed by dominant value chains (Revoyron et al., 2022).

3.4 Relying on a group to adopt cereal–legume intercroops and improve their management

Pathway A is intertwined with the collective pathway, as the farmers of this pathway are the founders of the studied group. Therefore, in pathway A, the driving factor for the adoption of cereal–legume intercropping was the belonging to the group, as well as the training and discussion opportunities created within the group, which played a crucial role in encouraging farmers to refine their practices. Indeed, with the creation of the CIVAM, the farmers created a space with opportunities to exchange knowledge and access collective training, which are strong behavioural drivers for the adoption of intercropping (Ha et al., 2023). With their foundation of empirical knowledge about intercroops – that was later on even more validated with the APACH project – the farmers of the type A pathway emerged as “experts” of the practice in the CIVAM, and they could be considered “early adopters” in Rogers’ (1962) terminology. Farmers from pathways B and C who joined the CIVAM later could then benefit from the knowledge collectively acquired among the early adopters. The fact that the CIVAM was already a well-established network when farmers of pathways B and C joined may have facilitated access to knowledge for them (Chantre & Cardona, 2014). In turn, as the group’s dynamic continues, it may also be beneficial for the adoption of the practice on a wider scale (Himanen et al., 2016).

3.5 Cereal–legume intercroops for organic farming

Overall, we observed a strong link between cereal–legume intercropping and organic farming, except for two breeders in pathway C who did not convert to organic farming. In our sample, we also had three farmers (one breeder and two arable crop farmers) who did not

grow cereal–legume intercrops, and they were all in conventional farming. Among them, the two arable crop farmers stated that they did not want to grow cereal–legume intercrops due to the lack of market in conventional arable crop farming and the difficulties associated with weeding, as it can be difficult to find efficient herbicides that are certified for both the cereal and the legume species in the intercrop. However, they did grow other mixtures, such as wheat or barley varietal mixtures or rapeseed intercropped with companion plants. The third was a breeder, who grew multi-species grasslands for animal pasture but never grew cereal–legume intercrops because his farm lacked the necessary storage facilities. Although he did acknowledge the benefits of the practice, he was not the only decision-maker on the farm and his associate was less convinced: “[My associate] wasn't so keen. I was more tempted because... It's less work. You just sow and wait. You don't do anything. So I would have liked it, and besides, it's pretty good for the soil. But on the other hand, what was certain was that you needed storage [...] But today, anyone who establishes on a farm should do so”. Moreover, he pointed out that they had never faced any financial issues, so they never had to think about new practices.

For some farmers, succeeding in managing cereal–legume intercrops gave them confidence to convert to organic farming, so the practice, once tested and approved, triggered the conversion to organic farming: “we'd been interested in intercropping before [converting to organic farming]. That's what made us think we can convert to organic farming, because [intercropping] is easy”. For others, cereal–legume intercropping was a way to grow legumes, after several failures in growing sole legumes under organic farming conditions: “For us, the main advantage of intercrops is the production of legumes. Sole cereals are fine, but sole legumes on their own [...] we would have catastrophic years [...]. It's effective against the development of diseases and insects; the fact that they're mixed with cereals is really disruptive”. Today, cereal–legume intercropping is considered a base practice in organic farming, including beyond the studied group, according to an adviser working at the departmental scale: “[intercropping] is part of the basic rules. We know all the advantages it brings, it's well referenced. I think that when you convert to organic farming, intercropping is part of the basic rules, at least on winter cereals”. The adoption of intercropping in organic farming is facilitated by collecting organisations (agricultural cooperatives and trade) that collect and sort binary organic intercrops (one cereal and one legume). Therefore, collecting

organisations have an important role to play in the diffusion of intercropping, and potentially even beyond organic farming, e.g. with the creation of new value chains (Fares & Mamine, 2023).

3.6 Adapting the intercropping to the diversity of use and activities

In each individual pathway, we observed that the types of intercropping changed over time. This variation reflects the different needs and constraints of arable cropping systems compared to mixed crop–livestock systems. In arable cropping systems, intercropping usually involves two species, a cereal and a legume, whose seed sizes are very different. This choice is strategic and crucial to facilitate the post-harvest sorting. In contrast, in mixed crop–livestock systems, intercropping differs due to livestock needs. In this case, species selection considers both the ease of harvesting and the forage value and nutrient content needed by livestock. As a result, these systems often incorporate a broader range of species, as sorting is less critical, allowing for greater flexibility in meeting both crop and feed needs. Those observations are in line with the typology of intercropping developed by Verret et al. (2020).

In pathway A, the development of the intercropping is following both the use of the intercropping and the changes in the farm's activities. For instance, farmer A1 (Figure 3.5) started with a complex intercrop of oat, triticale, pea, faba bean and vetch that he sold directly to breeders without sorting the different species, which could lead to significant variations in the composition of the intercropping, and therefore the feed ratio, from one harvest to the next. As breeders' preferences changed towards pure legumes to adjust their feed ratio themselves, farmer A1 stopped growing this complex intercrop and switched to simpler intercroppings, involving only two species and easy to sort with an on-farm sorter. The new combinations involved barley intercropped with pea or wheat with faba bean. Over time, he also experimented with other types of intercroppings, such as buckwheat–soybean, but they were not always successful, leading him to discontinue these combinations. In 2023, farmer A1 invested in high-performing sorters and mills, as he wanted to diversify his activities to sell his own flour and offer sorting services to other farmers. In addition to the barley–pea and wheat–faba bean intercroppings, he also introduced oat-based intercroppings with vetch, pea, radish or fenugreek. In contrast, breeder A3 started with simple intercroppings like wheat–faba bean, tailored to match the requirements of his agricultural cooperative, as he was an arable crop farmer at that time. After incorporating a cattle livestock activity, he started growing more complex intercroppings with

triticale, barley, pea, vetch and faba bean better matching with the cattle requirements. To ensure a reliable stock in case the complex intercrop was insufficient to feed the whole cattle, he also adopted a simple barley–pea intercrop. For breeder A5, the changes did not concern the species involved in the intercrop, but the way it was harvested. Initially, he used to grow an oat–triticale–pea–faba bean–vetch intercrop that he harvested as silage to feed the cattle. However, with the incorporation of a dairy processing activity on his farm, he switched to harvesting the intercrop as grain to address the potential sanitary issues that silage could cause to the cattle and therefore to the quality of the produced milk.

In pathway B, at the time of the interviews, the farmers were still in the phase of stabilisation of the system and had just begun to diversify their activities. Farmer B3 (Figure 3.5) started with binary wheat–faba bean, triticale–pea and lentil–camelina intercrops because he was exclusively working with a cooperative that collects and sorts these combinations, ensuring a market for his production. However, at the time of the interviews, he was starting a bakery activity to produce his own bread and other bakery products. This new activity suggests that the types of intercrops cultivated are prone to change to satisfy new needs, maybe with the introduction of new intercropping composed of species consistent with the bakery.

These changes in the types of intercrops over time show that cereal–legume intercropping is a practice that can be adapted to different farmers' objectives and farm contexts. In addition to their agronomic benefits, intercrops also have economic advantages, measurable beyond yield data. In fact, the practice can be used for a variety of purposes, and as part of a self-sufficiency strategy, it is also adequate for on-farm processing (e.g. mills, bakery) and local distribution networks, giving farmers greater resilience (Darnhofer et al., 2010), and greater added value for their production (Casagrande et al., 2017).

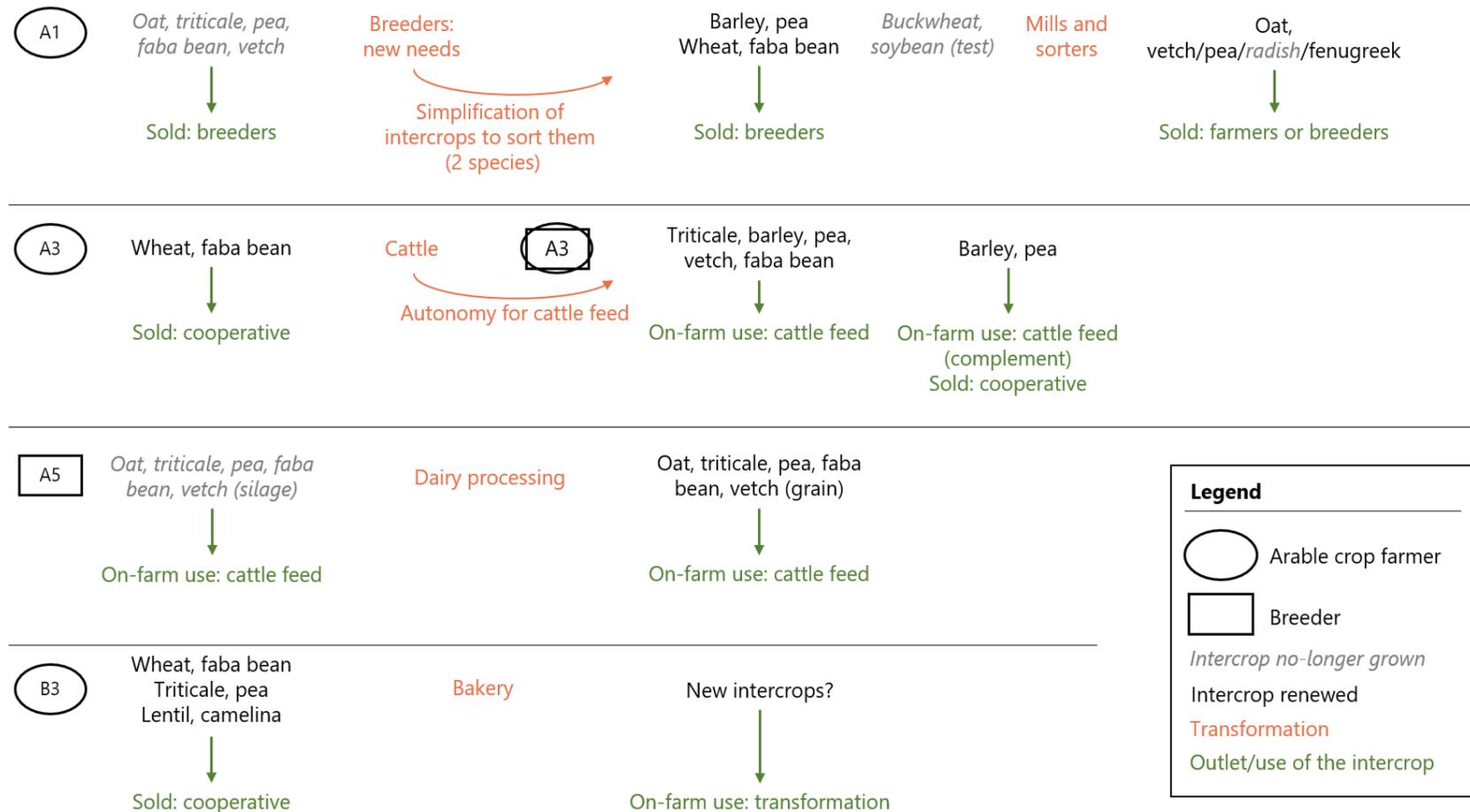


Figure 3.5: Changes in the composition and use of cereal-legume intercrops along with the farms' transformations for four farmers.

4 Conclusion

In this research, we studied the pathways for the adoption of cereal–legume intercropping in a group of farmers. We showed that a diversity of pathways exists, and all the pathways studied showed the importance of collective actions and dynamics to adopt the practice. Working together as a group on innovative agricultural practices enables farmers to overcome psychological barriers and learn from the mistakes and successes of others. We highlighted three types of individual pathways: the first one was made up of farmers who were initially considered as marginal and in fact, pioneers in their territory (pathway A), the second concerns farmers who would be more representative of new organic farming establishments (pathway B), and the third one would be more representative of conventional livestock farmers that are seeking greater resilience, particularly with respect to climate change (pathway C). The study of these pathways has also emphasized the dynamic nature of intercrops and their relevance in responding to the agronomic and economic needs of farmers. While the collective trajectory studied here is certainly unique and non-reproducible – due to the historical context in which it began, and the people involved throughout – it is very likely that other groups exist in France, with early adopters actively participating in the spread of the practice. By supporting collective initiatives, and encouraging schemes such as CIVAMs or agricultural machinery cooperatives, it is therefore possible to encourage the adoption of intercrops. Last but not least, shedding light on farmers' experiences, as did the APACH project, is a way of capitalizing on the knowledge that is necessary for farmers to initiate a pathway towards the adoption of cereal–legume intercropping.

CONCLUSION DU CHAPITRE 3 SUR LES TRAJECTOIRES D'ADOPTION DES MÉLANGES CÉRÉALES–LÉGUMINEUSES ET TRANSITION

Notre étude met en évidence trois types de trajectoires individuelles d'adoption des mélanges céréales–légumineuses, et l'importance des dynamiques collectives pour l'adoption d'une nouvelle pratique. Les agriculteurs et agricultrices, mais aussi les conseillers et conseillères que nous avons pu enquêter affirment que les mélanges céréales–légumineuses sont pertinents pour réduire l'utilisation d'intrants chimiques et sécuriser les productions. Cependant, la pratique peut être difficile à implémenter, et les phases de test jusqu'à trouver le mélange qui convient aux objectifs et contraintes des agriculteurs et agricultrices peuvent s'avérer longues. La dynamique collective permet de faciliter l'accès à des références, pour aider à concevoir les mélanges (espèces selon les objectifs, proportions et méthodes de semis) et à ne pas se décourager.

Ainsi, selon les trajectoires, les phases de test peuvent être plus ou moins longues, se traduisant par des modalités d'intégration variables d'une exploitation à une autre, notamment en termes de surfaces allouées aux mélanges d'une année sur l'autre. Ces différentes modalités d'intégration peuvent se répercuter sur les dynamiques d'adoption observées à l'échelle des territoires. Toutefois, les trajectoires identifiées dans ce chapitre l'ont été sur un collectif restreint et très localisé géographiquement (Pays du Châtelleraudais). Nous pouvons donc nous interroger sur le caractère générique de ces trajectoires. Investiguer un grand nombre de sites n'étant pas possible dans le cadre de la thèse, nous avons opté pour un retour vers l'analyse de bases de données. C'est ce que nous allons traiter dans le Chapitre 4.

CHAPITRE 4 : DYNAMIQUES D'INTÉGRATION ET DE DIFFUSION DES MÉLANGES CÉRÉALES-LÉGUMINEUSES DANS LES EXPLOITATIONS ET LES TERRITOIRES

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS

Ces dernières années, nous observons une augmentation des surfaces cultivées en mélanges céréales-légumineuses. Toutefois, ces mélanges représentent encore moins de 1% des terres labourables en France, et semblent localisés dans certaines zones. En particulier, nous avons identifié **deux zones dans l'ouest et le sud de la France**, où les mélanges semblent s'être développés dans des **départements « cœurs »** (Loire-Atlantique et Aveyron respectivement), avant de diffuser dans les **départements en périphérie** (Maine-et-Loire, Deux-Sèvres, Vendée, Vienne dans la zone ouest, et Cantal, Lot, Lozère, Tarn dans la zone sud). Comprendre la diversité des modes d'intégration des mélanges dans les assolements des exploitations et plus largement au niveau d'un territoire nous semble important pour accompagner ce développement dans d'autres régions. Cette compréhension nous permettra aussi d'avoir une idée de la généralité des trajectoires identifiées dans le Chapitre 3.

Nous utilisons les données du **Registre parcellaire graphique entre 2015 et 2022** pour calculer, pour chaque année, dans chaque exploitation, la part des terres labourables dédiées aux mélanges céréales-légumineuses. En nous inspirant des méthodes de Martin et al. (2017) et Fouillet et al. (2023), nous calculons, pour chaque exploitation, une régression linéaire de la part de mélanges céréales-légumineuses en fonction de l'année. Avec des indicateurs définis d'après ces régressions linéaires (coefficients de régression, somme des carrés des écarts à la moyenne, maximum des résidus) auxquels nous ajoutons des indicateurs relatifs aux mélanges (sur la période d'adoption de la pratique et les parts de terres labourables concernées), nous construisons des clusters pour identifier des **types de dynamiques d'adoption à l'échelle des exploitations**, dans les départements « cœurs » et « périphériques » de chacune des deux zones (ouest et sud).

Nos résultats mettent en évidence **trois types de dynamiques d'adoption** :

- Type 1 : **Essais**, qui consiste à adopter les mélanges sur une période courte (moins de deux ans dans la plupart des cas), avant de les arrêter ;
- Type 2 : **Adoption puis constance**, qui correspond à une augmentation graduelle des mélanges céréales-légumineuses au cours du temps, probablement à l'issue d'une période de test réussie ;
- Type 3 : **Parts initialement élevées puis augmentation**, qui correspond à une adoption avec d'emblée une part importante de terres labourables cultivées en mélanges (entre 36% et 61% des terres labourables en moyenne selon les clusters) et une augmentation au cours du temps.

Ces trois types de dynamiques d'adoption à l'échelle des exploitations se retrouvent dans les deux zones étudiées. Toutefois, dans les départements « cœurs », les dynamiques observées depuis 2015 sont majoritairement le fruit de dynamiques de type *Adoption puis constance*, alors que dans les départements « périphériques », ce sont surtout les types *Parts initialement élevées puis augmentation* qui sont responsables de l'augmentation des surfaces observées ces dernières années.

Ces résultats suggèrent que **les agriculteurs et agricultrices des départements « périphériques » auraient bénéficié de références produites dans les départements « cœurs »** – qui ont commencé à cultiver des mélanges céréales-légumineuses plus tôt – à travers des échanges entre pairs, ou un accompagnement par des services de support par exemple. Aussi, malgré la présence d'un type plus « entreprenant » avec le type *Parts initialement élevées puis augmentation*, il semblerait que **des difficultés subsistent dans les et empêchent des agriculteurs et agricultrices d'adopter durablement la pratique**, comme en témoigne le type *Essais*. Dans le Chapitre 3, nous avons identifié des trajectoires individuelles qui pourraient faire penser aux types de dynamiques *Adoption puis constance* (rappelant les trajectoires A, *Adoption des mélanges céréales-légumineuses suivant un processus collectif* et C, *Adoption pour changer dans des systèmes conventionnels*) et *Parts initialement élevées puis augmentation* (qui semble plutôt bien représenter la trajectoire B, *Adoption en agriculture biologique profitant de voies déjà ouvertes*), mais n'avons pas eu de trajectoires correspondant aux cas d'*Essais*. Il nous semble donc important d'étudier ces cas d'essais-erreurs de manière plus approfondie, afin d'affiner notre compréhension des processus d'adoption des mélanges céréales-légumineuses.

ARTICLE EN ANGLAIS – EXPLORING ON-FARM CEREAL–LEGUME INTERCROPPING DYNAMICS TO ASSESS THEIR DIFFUSION AT THE TERRITORIAL SCALE

Authors: Elodie Yan^a, Marco Carozzi^a, Philippe Martin^a

^a Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SADAPT, F-91120, Palaiseau, France

1 Introduction

In the context of agroecological transition, crop diversification has been identified as necessary to improve water and soil quality, enhance biodiversity and improve the resilience of agricultural systems to global changes (Beillouin et al., 2021; Lin, 2011). However, in Western Europe, the current value chains are mainly organised for specialised production, based on a few “major” crops, which hinders the adoption of “minor” diversification crops (Meynard et al., 2018; Weituschat et al., 2023).

Intercropping is a crop diversification practice consisting of growing two or more species on the same plot for a significant common period (Willey, 1979). Cereal–legume intercrops are particularly beneficial because they help regulate pests, diseases and weeds, thereby reducing pesticide use on farms (e.g. Carton et al., 2020; Hauggaard-Nielsen et al., 2008; Yan et al., 2024), while also ensuring better land use efficiency (Yu et al., 2016). In France, cereal–legume intercrops are strongly associated with organic farming and/or animal husbandry (Yan et al., 2025). In organic arable cropping, growing legumes is one of the major levers to maintain nitrogen in the soil. However, growing pure legume crops can be challenging, as legumes tend to lodge. In this context, cereals can act as stakes for legumes (Kontturi et al., 2011). In livestock production, cereal–legume intercrops can produce balanced animal feed and so improve farms’ feed autonomy (Chapters 2, 3).

In recent years, there has been a noticeable increase in the acreage of intercropping in France. According to data from the French Land Parcel Identification System (IGN, 2023), the acreage increased from 254,000 ha in 2015 (1.5% of the total arable lands) to 543,000 ha in 2022 (3.5% of the total arable lands). Nevertheless, despite this expansion, cereal–legume intercrops represented only 1.0% of the total arable lands in 2022 (0.35% in 2015). The diffusion dynamics seem to be located around hotspots from which the practice spreads outward. At the farm and territorial scales, the adoption rate of cereal–legume intercropping can be fostered by the presence of livestock, organic farms, groups of farmers such as farm machinery cooperatives, and financial incentives (Bonke et al., 2021; Fares & Mamine, 2023). At the

farmers' level, the motivations for adopting cereal–legume intercropping are multiple: e.g. increasing the feed autonomy, improving the yields (in terms of quantity and stability) and/or the quality of the production, reducing labour and inputs (Timaeus et al., 2022; Verret et al., 2020).

While there is now a better understanding of the motivations for implementing cereal–legume intercrops and the factors that can foster their uptake, there is still a knowledge gap on how farmers integrate this practice into their cropping plans. However, to effectively promote cereal–legume intercropping, it is crucial to understand its ongoing diffusion, especially as we have observed an increasing adoption rate in recent years. Here, by “on-farm dynamics”, we designate the cropping plan dynamics resulting from the integration of cereal–legume intercrops on farms. To date, studies on on-farm dynamics have demonstrated that plot structures (e.g. size, shape and fragmentation) significantly impact farm management, land use allocation, and, eventually, landscapes (Barbottin et al., 2018; Bouty, 2015; Thenail & Baudry, 2004). On a regional scale, Mignolet et al. (2007) proposed a method to monitor the evolution of the cropping systems and understand how it is linked to the diversity of production systems. Similarly, Chopin et al. (2015) developed a new method to build a typology of farms based on the farms' crop acreage and then go further in identifying the determinants of change from one farm type to another.

In this paper, we focus on cereal–legume intercrops to characterise the diffusion dynamics of this practice. We hypothesise that multiple types of on-farm dynamics coexist in a given area and impact the dynamics observed at the territorial level. Therefore, studying the on-farm dynamics resulting from cereal–legume intercropping can provide valuable insights into the strategies farmers currently implement and the potential future developments of the practice at the territorial level.

2 Material and methods

2.1 The French Land Parcel Identification System (LPIS)

The Land Parcel Identification System (LPIS) is a geographic information system that was set up in 2003 (Sagris et al., 2013) as part of the European Union's Common Agricultural Policy (CAP). Each state member has its own LPIS, which is used to manage and control the CAP subsidies. To be granted the CAP subsidies, every farmer must first declare the acreage of each crop on their farm and provide their location at the plot resolution. Although the LPIS is

thus for public policy management purposes, the database contains useful information for agricultural research (e.g. Barbottin et al., 2018; Levavasseur et al., 2016; Uthes et al., 2020). In 2022, the French LPIS covered approximately 98% of the total French useable agricultural area.

Since 2015, different types of intercropping have been detailed in the LPIS, including cereal–legume intercropping. Therefore, for this study, we used the data from the French LPIS from 2015 to 2022, the most recent year available at the time of the study. As we describe on-farm dynamics at the farm scale, we used the “Level 2 LPIS”, in which each farm is given an anonymous unique identifier, and each parcel is linked to its farm identifier.

2.2 Identification of the study areas

We used the French LPIS data at the French metropolitan department (Level 3 of the EU Nomenclature of Territorial Units for Statistics, NUTS3), which is an appropriate resolution to represent spatial homogeneous characteristics. For each year between 2015 and 2022 and for each farm, we computed the share of its arable lands cultivated with cereal–legume intercropping. After mapping the data, we focused our study on two areas, constituted by multiple departments where cereal–legume intercropping acreage had significantly increased in recent years and within contrasted agricultural contexts (Yan et al., 2025). Notably, in each area, one “core” department seemed to have a greater adoption rate in the beginning than the other departments, which we call the “surrounding” departments – although they do not always have a common border with the core department. This core department appeared to be a hub from where cereal–legume intercropping spread over the years to surrounding departments. The two areas we chose to focus on are two of the three areas described in Table 2.3 (Chapter 2, p. 90) and are located in Western and Southern France (Figure 2.1, Chapter 2, p. 80).

For the Western area, the core department is Loire-Atlantique, and we consider four surrounding departments (Maine-et-Loire, Deux-Sèvres, Vendée, Vienne). This area is considered a mixed territory, with both arable crop and livestock farming systems. For the Southern area, the core department is Aveyron, and we consider four surrounding departments (Cantal, Lot, Lozère, Tarn). This area is dominated by farms specialised in meat cattle, sheep and goat husbandry. In each area, we treated the core department separately from the surrounding departments, as we wanted to capture the possible differences between the dynamics of the subareas (core department vs. surrounding departments) and to sense

whether the dynamics observed in the core departments were also found in the surrounding departments, possibly with a time lag.

2.3 Clustering and cropping pattern trends

In each area, we first used data at the farm scale to account for individual on-farm dynamics. Then, by aggregating all the on-farm dynamics within a subarea, the aim was to draw up a typology at the subarea scale of the dynamics related to the adoption of cereal–legume intercrops. We first needed to establish suitable indicators to characterise these on-farm dynamics.

For each farm in the two areas (Western area and Southern area), we used the French LPIS to compute the annual share of cereal–legume intercrop on the farm’s arable land between 2015 and 2022. This enabled us to define the first five indicators (Figure 4.1):

- Variable 1: the **number of years** where cereal–legume intercrops were cultivated;
- Variable 2: the **first year** when cereal–legume intercrops were observed;
- Variable 3: the **last year** when cereal–legume intercrops were observed;
- Variable 4: the **share** of cereal–legume intercrops on the farm’s arable land **in the first year**;
- Variable 5: the **share** of cereal–legume intercrops on the farm’s arable land **in the last year**.

Then, for each farm, we computed linear regressions of cereal–legume intercrop shares on the years (2015 to 2022). Based on the methodology of Martin et al. (2017) and Fouillet et al. (2023), these regressions provided three more indicators to describe the on-farm dynamics (Figure 4.1):

- Variable 6: the **slope** (or regression coefficient), which indicates the overall trend of the shares of cereal–legume intercrops over time (yearly variation);
- Variable 7: the **sum of squared deviations**, which indicates the overall variability of the shares of cereal–legume intercrops around the regression line;
- Variable 8: the **maximum of residuals**, which indicates the maximum variation around the regression line.



Figure 4.1: Indicators used to characterise the on-farm dynamic of adoption of cereal-legume intercrops, adapted from Martin et al. (2017) and Fouillet et al. (2023). The real values are computed from the French LPIS. The linear regression is fitted on those real values.

In each subarea, we used these eight indicators to compute a principal component analysis (PCA) and then a hierarchical clustering on principal components (HCPC) based on the PCA results. The PCA was used to identify the relationships between the eight chosen indicators and “highlight their similarities and differences through correlations” (Martin et al., 2017). The HCPC then grouped farms into clusters based on their similarities. The number of clusters was chosen based on the hierarchical tree. The PCA and HCPC were performed twice per area: once for the core department (e.g. Loire-Atlantique in the Western area) and once for the surrounding departments (e.g. Maine-et-Loire, Deux-Sèvres, Vendée and Vienne altogether in the Western area). For each subarea, we obtained an overview of the existing types of on-farm dynamics regarding the share of cereal-legume intercropping on the farms’ arable land.

Finally, we conducted a cross-sectional analysis of the clusters, using the eight indicators employed to compute them, to identify common types of dynamics between the different subareas. Additionally, based on the results from Yan et al. (2025), we incorporated two descriptors for the clusters: the proportion of organic farms and the types of production (e.g. arable farming, mixed crop-livestock farming). Data on the proportion of organic farms and the types of production were computed from the 2020 French agricultural census data.

2.4 Software and procedures

Statistical analyses were conducted using R version 4.3.1 (R Core Team, 2023). We used the packages *FactoMineR*, version 2.4 (Husson et al., 2024) and *factoextra*, version 1.0.7 (Kassambara & Mundt, 2020) to compute the PCA and HCPC and visualise their results. Access to the French Agricultural Census data was made possible within a secure environment offered by the Centre d'accès sécurisé aux données (CASD; Ref. 10.34724/CASD).

3 Results

3.1 PCA and clustering

3.1.1 Western area

In the Western area, the first two components of the PCA for the core department (Loire-Atlantique) account for 60.48% of the variance. The first component is associated with the shares of intercrops at the beginning and end of the observed period with intercrops (Variables 4, 5) and the maximum of residuals (Variable 8). The second component is associated with the number of years with intercrops and the first and last years when intercrops were present (Variables 2, 3). Clustering based on these first two dimensions resulted in three clusters, with 349, 277 and 33 farms, respectively (Table 4.1).

For the surrounding departments, the first two components of the PCA account for 62.59% of the variance. The first component is also associated with the shares of intercrops at the beginning and end of the observed period with intercrops (Variables 4, 5) and with the maximum of residuals (Variable 8). The second component is associated with the first year where intercrops were present (Variable 2). Clustering based on these two dimensions gave three clusters, with 1455, 757 and 321 farms, respectively (Table 4.1).

3.1.2 Southern area

In the core department of the Southern area (Aveyron), the first two components of the PCA account for 61.31% of the variance. The first component is associated with the shares of intercrops at the beginning and end of the period (Variables 4, 5), the maximum of residuals (Variable 8) and the sum of squared deviations (Variable 7). The second component is associated with the regression coefficient (Variable 6) and with the last year when intercrops

were observed on the farm (Variable 3). Clustering on these first two dimensions resulted in three clusters, comprising 1102, 845 and 98 farms (Table 4.1).

In the surrounding departments, the first two components of the PCA carry 60.66% of the variance, with the first dimension associated with the same variables as in the core department (Variables 4, 5, 8). The second dimension is associated with the first year when intercropping was observed on the farm (Variable 2). Clustering on these first two dimensions gave five clusters, comprising 1113, 640, 130, 323 and 62 farms (Table 4.1).

Table 4.1: Clusters obtained for each subarea with the corresponding number of farms and associated types of dynamics.

Area	Subarea	Cluster	Number of farms	Types of dynamics
Western	Loire-Atlantique (core)	W0.1	349	1: Trial only
		W0.2	277	2: Adoption then constancy
		W0.3	33	3: High initial shares and increase
	Surrounding departments	W1.1	1455	1: Trial only
		W1.2	757	2: Adoption then constancy
		W1.3	321	3: High initial shares and increase
Southern	Aveyron (core)	S0.1	1102	1: Trial only
		S0.2	845	2: Adoption then constancy
		S0.3	98	3: High initial shares and increase
	Surrounding departments	S1.1	1113	1: Trial only
		S1.2	640	2: Adoption then constancy
		S1.3	130	2: Adoption then constancy
		S1.4	323	3: High initial shares and increase
		S1.5	62	3: High initial shares and increase

3.2 Types of on-farm dynamics and farm characteristics

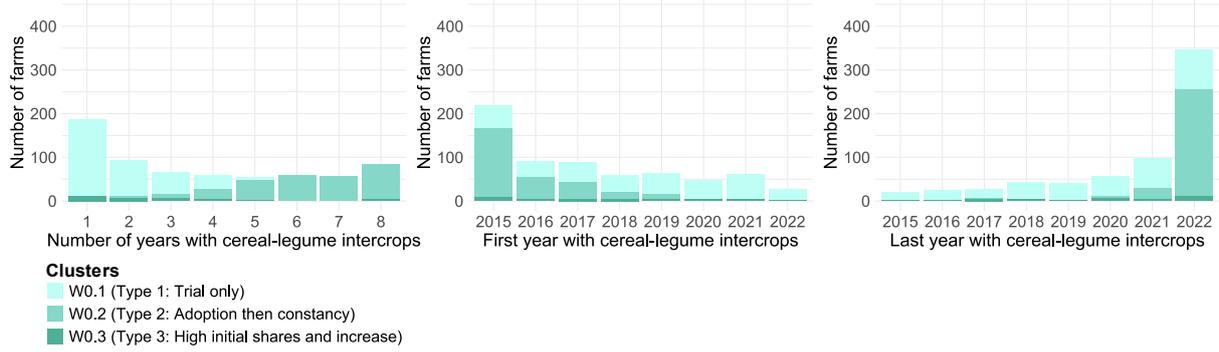
In the Western area, we found clusters with similar characteristics between the core department and the surrounding departments. Clusters W0.1 and W1.1 are characterised by a short period of adoption of cereal–legume intercropping, with 74% of farms in cluster W0.1 and 73% of farms in cluster W1.1 having adopted intercropping for two years or less (Figure 4.2). Similar dynamics were observed in the Southern area, with clusters S0.1 and S1.1, in which most farms have also adopted intercropping for two years or less (61% and 86% of farms, respectively, Figure 4.2). We grouped these clusters into the “Trial only” type. In this type, the number of adopting farms remains nearly constant yearly (Figure 4.2). Although most farms did not continue growing intercropping after one or two years of trials, some exceptions exist. In both the Western and Southern areas, a few farms adopted intercropping before 2020 and continued until 2022;

therefore, they adopted cereal–legume intercroops for three to five years (Figure 4.2). In the *Trial only* type, the share of the farm’s arable land dedicated to intercroops remains stable over time (regression coefficient close to zero, Figure 4.3), at around 10% of the farm’s arable land on average (Figure 4.3). This type is characterised by a large majority of conventional livestock farms, particularly specialised in cattle (Figure 4.4).

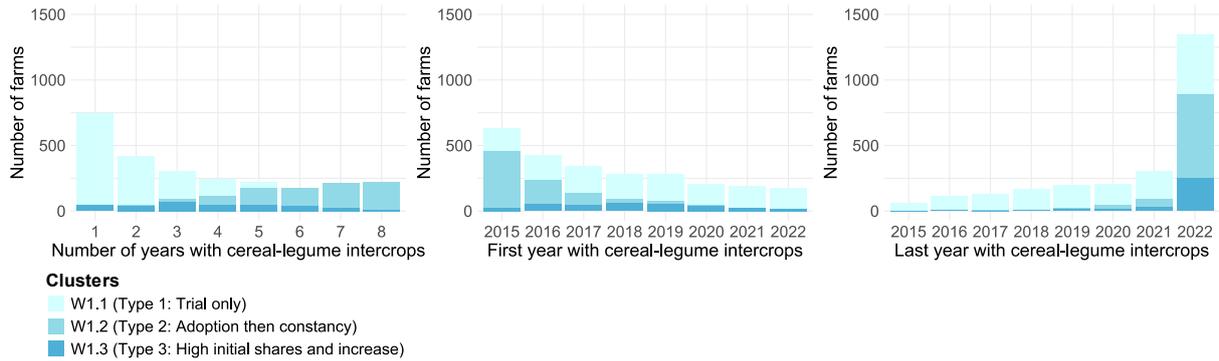
A second type of dynamics concerns clusters W0.2 and W1.2 in the Western area and S0.2, S1.2 and S1.3 in the Southern area. In this type, cereal–legume intercroops were already present on farms in 2015, and new adoptions occurred over time, albeit at a decreasing rate over the years. Depending on the clusters, intercroops were still grown in 2022 in 68% to 91% of farms (Figure 4.2). We, therefore, consider that this type includes farms which, after having tested the intercroops, gradually increased the dedicated share of arable land until eventually reaching a plateau, as shown by the regression coefficients close to zero, despite the significant difference between the shares of intercroops on the first and last years (Figure 4.3). However, compared to the *Trial only* type, there is a higher share of intercroops from the beginning with, on average, 14% to 18% of the farm’s arable land, depending on the subarea (Figure 4.3). We call this second type “Adoption then constancy”. In this type, there is a higher proportion of organic farms than the *Trial only* type (Figure 4.4) and an even smaller share of farms specialising in arable crops, notably to the benefit of farms specialised in cattle husbandry as shown in Figure 4.4.

The last type we identified, Type 3, concerns clusters W0.3 and W1.3 in the Western area and S0.3, S1.4 and S1.5 in the Southern area. These clusters differ from the others due to a significant increase in the share of intercroops on farms over time, with high initial shares of intercroops (around 60% of the farm’s arable land on average in the core departments, and 37% on average in the surrounding departments, Figure 4.3). In this type, which we call “High initial shares and increase”, most farms are growing intercroops in 2022 (Figure 4.2). Overall, compared to the two other types of dynamics, there is a greater proportion of organic farms and farms specialising in arable crops and/or monogastric livestock, i.e. pigs and/or poultry (Figure 4.4).

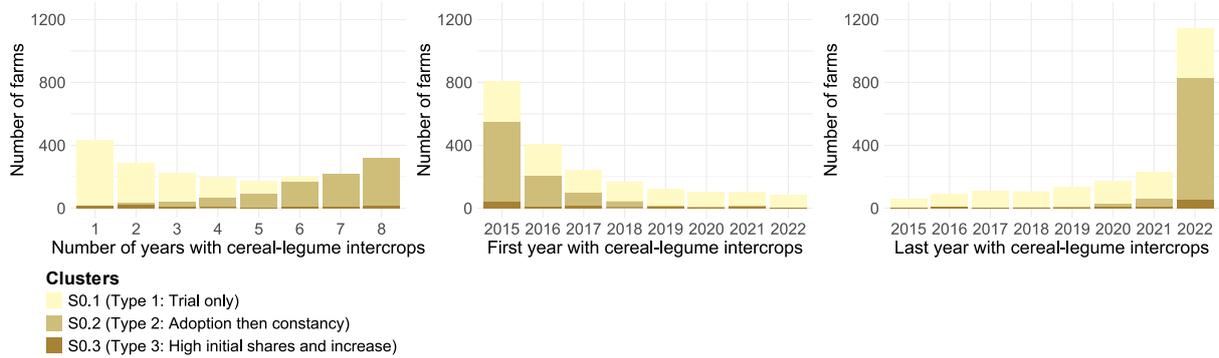
Western area – Core department



Western area – Surrounding departments



Southern area – Core department



Southern area – Surrounding departments

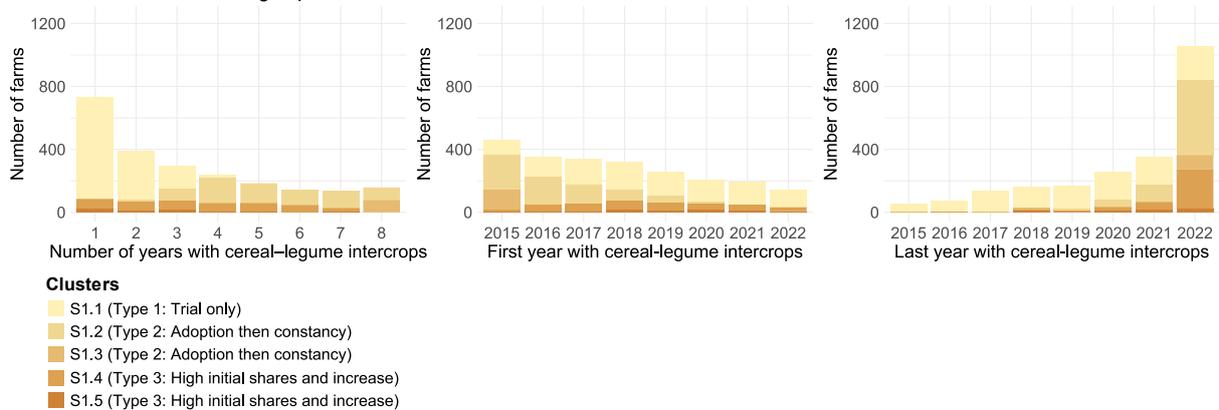


Figure 4.2: Number of farms in each cluster for each subarea depending on the number of years observed with cereal-legume intercroppings between 2015 and 2022 (left), the first year (middle) and the last year (right) where cereal-legume intercroppings were present on the farm.

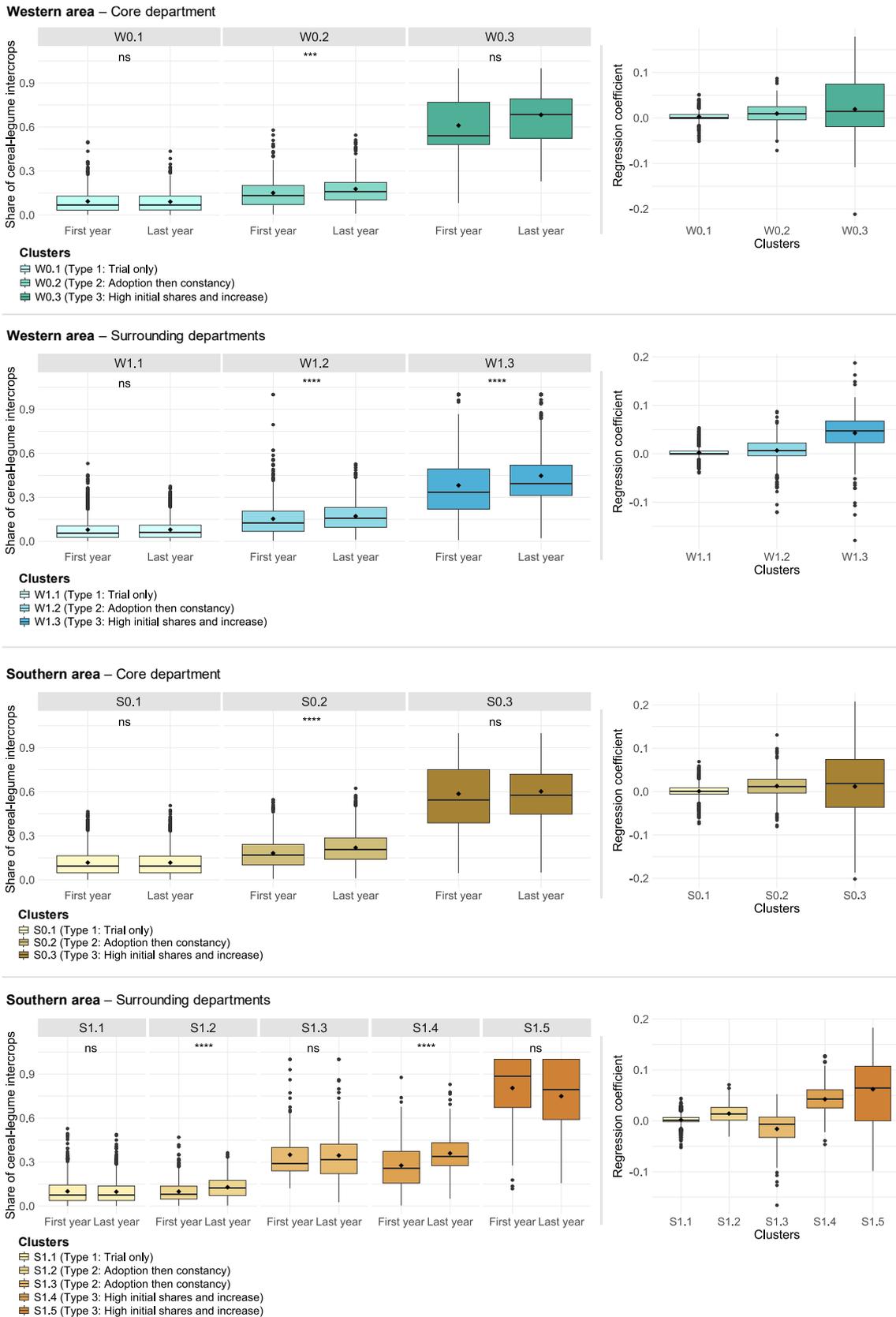


Figure 4.3: Share of cereal-legume intercroppings observed the first year and last year in farms of each cluster (left) and regression coefficient of each cluster (right) in each subarea. The black diamonds on the boxplots represent the mean values. The significance codes (ns = $p > 0.05$; *** = $p \leq 0.001$; **** = $p \leq 0.0001$) apply to Wilcoxon tests computed to compare the mean first and last years values in each cluster.

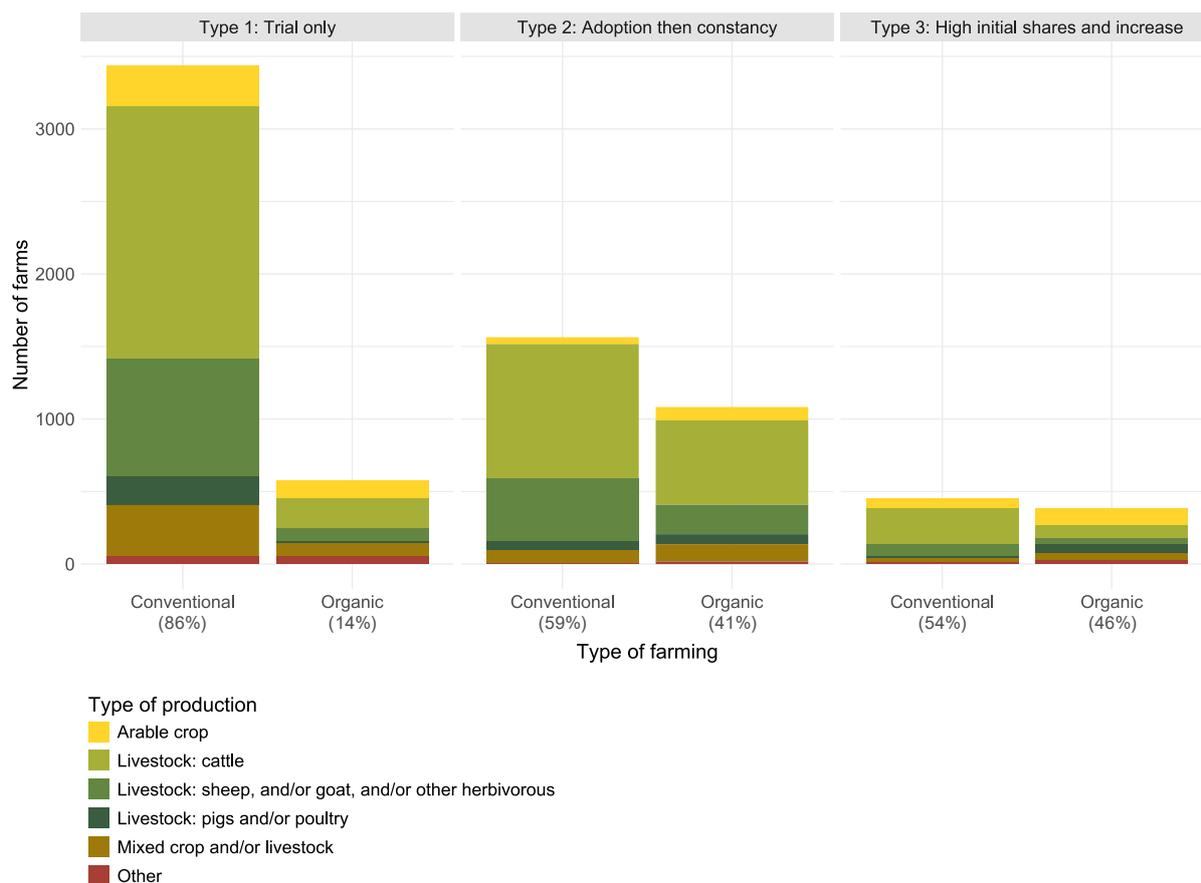


Figure 4.4: Number of farms by type of production, in conventional and organic farming in the three types of dynamics, all subareas combined. The “Other” type of production refers to market gardening, viticulture, and other perennial crops. The percentages refer to the percentages of conventional and organic farms in each type of dynamics.

3.3 Contribution of the types of on-farm dynamics to the overall local dynamics

We observed different contribution levels when examining the total cereal–legume intercropping acreage associated with the various dynamics within the Western and Southern areas. For the *Trial only* dynamics, there was an increase in the share of cereal–legume intercrops in the Western and Southern areas from 2015 to 2019, followed by a stabilisation or even a slight decline, but the shares observed in 2022 are still higher than those of 2015 (Figure 4.5). For the *Adoption then constancy* type, we observed an overall increase in cereal–legume intercrop shares across all subareas. Moreover, this type accounts for most of cereal–legume intercropping shares in both the Western and Southern areas (Figure 4.5).

In the Western and Southern areas, the *High initial shares and increase* type showed stable cereal–legume intercrop shares within the core departments over the years. In the surrounding departments, we observed an increase in the shares represented by this type. Although farms of this type only account for 5% to 14% of the farms in the various subareas

(Table 4.1), they account for more than a third of the total cereal–legume intercrop shares in the surrounding departments in 2022.

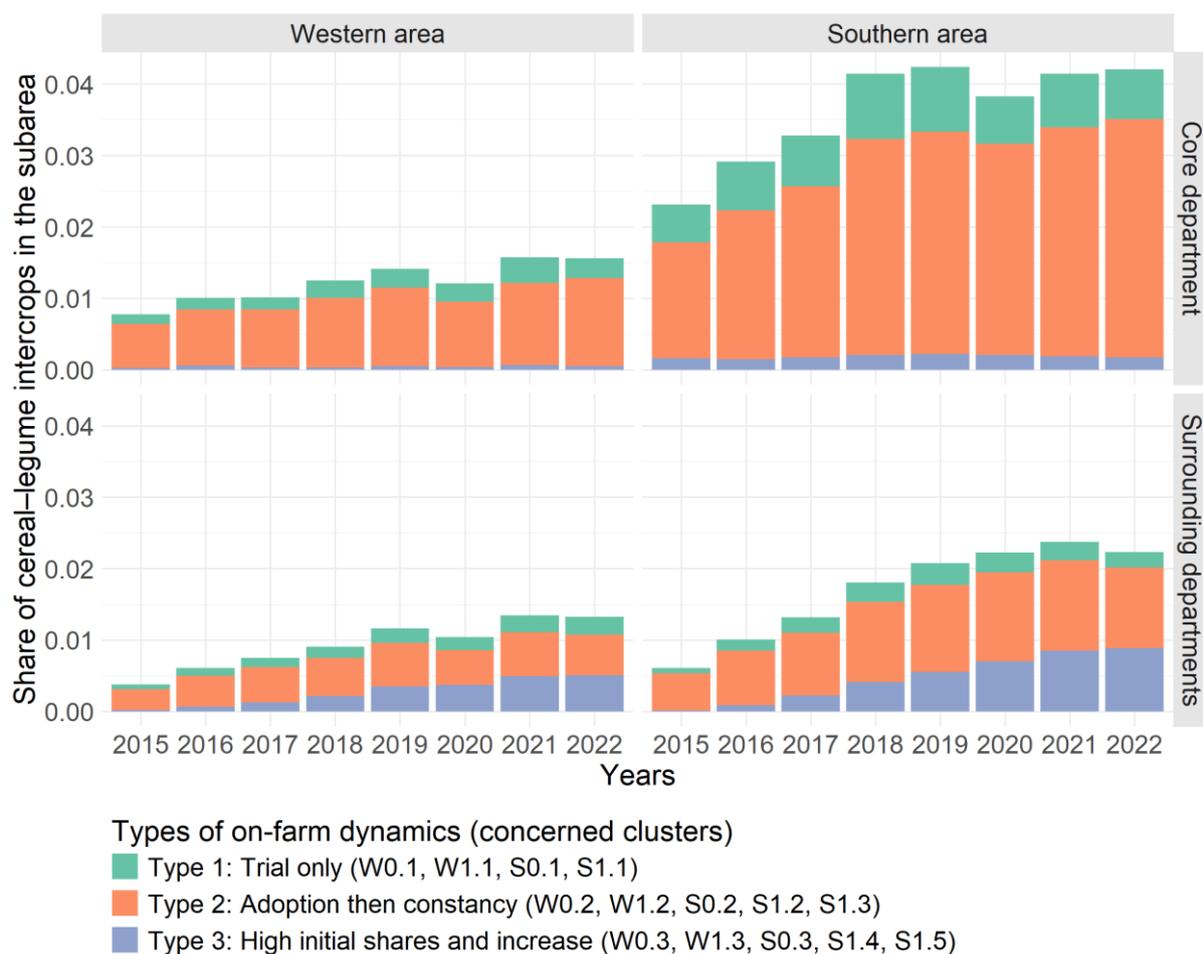


Figure 4.5: Total share of arable lands cultivated with cereal–legume intercrops in each subarea for the three types of on-farm dynamics.

4 Discussion

4.1 Diversity of on-farm dynamics to test and adopt cereal–legume intercropping

Our results revealed a diversity of on-farm dynamics for experimenting and eventually adopting new crops. With the *Trial only* type, we observed a cautious strategy that consists of testing cereal–legume intercrops on a small share of the farm's arable land, with mean shares observed in the first year varying from 0.078 to 0.12 in the different subareas (Figure 4.3). If the trial results are not convincing, then there is no increase in the share of cereal–legume intercrops before stopping. Conversely, when the trial is successful – the “success” depending on the farmers' own assessment and criteria – we may observe other strategies linked to the

Adoption then constancy and *High initial shares and increase* types of dynamics with a gradual expansion of the farm area dedicated to cereal–legume intercrops. This expansion can continue until eventually reaching a plateau, as observed in the *Adoption then constancy* type, where regression coefficients approach zero (Figure 4.3). However, in the *Adoption then constancy* and *High initial shares and increase* types, initial intercrop shares are higher than in the *Trial only* type, with *High initial shares and increase* having the highest initial intercrop shares among the three identified types of dynamics. The characteristics of the farms – such as organic farming production and specialisation in livestock or arable crops – are different in each type of dynamics, which suggests specific purposes for cereal–legume intercrop exist depending on the types of production, and those purposes likely drive the trial and adoption strategies.

High initial shares and increase dynamic is the most represented among organic farms specialising in arable crops. We can assume that the existence of an interesting outlet for the farmers drives the increase in the share of intercrops on these farms. If intercropping proves successful, farmers are likely to gradually increase the share of arable land allocated to intercrops and may even diversify the intercrops by adding new species in the mixtures or by creating new combinations, as did the farmers studied in Chapter 3. However, with the LPIS data, we did not have access to the composition of the intercrops, so we could not investigate this part. On the contrary, other farmers may test several types of intercrops of small shares and then only continue with those that performed best and increase the shares of the chosen intercrops.

In the *Adoption then constancy* dynamic, on the other hand, we found a large majority of farms specialising in livestock farming, particularly cattle and sheep/goat farming. On these farms, intercrops would be mainly used as livestock feed (Casagrande et al., 2017; Ha et al., 2024). Given a constant herd, it is not surprising that the proportion of arable land dedicated to intercrops remains constant after a phase of gradual expansion, which is typically linked to the testing phase of the practice (e.g. replacing maize plots with cereal–legume intercrops). In this type, a strategy may also consist of directly implementing the share of intercrops required to achieve a precise objective, such as for the quantity needed to feed the herd, so there is no real trial phase. This may also be the case of farms converting to organic farming, for which intercrops are recognised as a fundamental practice for growing legumes (Chapter 3; Verret et al., 2020).

4.2 Studying on-farm dynamics to understand and support territorial dynamics

The different dynamics observed at the farm scale provide information on the diffusion of cereal–legume intercropping at the territorial scale, from the core to the surrounding departments. In the core departments, the overall increase in the shares of cereal–legume intercrops seems to come from the *Adoption then constancy* type (Figure 4.5). In contrast, in the surrounding departments, the increase in shares results from the *High initial shares and increase* type, which is much less represented in the core departments (Figure 4.5). This suggests that farmers from the core departments, by initiating reflections on cereal–legume intercropping, may have helped produce knowledge on the practice, which in turn helped farmers from the surrounding departments adopt the practice more smoothly. Indeed, one usually cited barrier to adopting cereal–legume intercrop is the lack of knowledge (Mamine & Farès, 2020), as this practice is considered “knowledge-intensive” (Bybee-Finley & Ryan, 2018). However, once the practice is well established in a region, the exchanges of experience between farmers can help overcome this barrier by improving farmers’ knowledge on intercropping (Ha et al., 2024). As the *High initial shares and increase* type is the most “enterprising” of the three identified types of dynamics, the surrounding departments may exceed the core departments, unless the stabilisation phase continues.

On the same note, there may be knowledge diffusion between the different types of dynamics, within a subarea. The *Adoption then constancy* dynamic, which mainly concerns farms specialising in livestock farming and counts more organic farms than the *Trial only* dynamic, appeared to have reached a plateau in terms of cereal–legume intercrop acreage, with fewer and fewer new adoptions over time (Figure 4.2). On a regional scale, the farms likely to be involved in the *Adoption then constancy* dynamic may all have already adopted cereal–legume intercrops, constituting a stable base of farms engaged in this practice. Furthermore, since many farms of this type have implemented intercrops for at least eight years, they likely represent the early adopters in their respective territories. Early adopters of the *Adoption then constancy* type could, therefore, act as drivers for the territorial adoption dynamics, as their experience allows them to share their knowledge and provide references to new adopters (Chapter 3).

The existence of experienced farmers in a given territory can thus encourage the emergence of *High initial shares and increase* dynamics, where farmers start cereal–legume intercropping by dedicating a high share of the farm arable land and increasing it year after

year. This type of behaviour was already identified in the interviews of Chapter 3, with three farmers who implemented cereal–legume intercrops as soon as they established on their farm, without any proper trial phase, because they benefited from early adopters' knowledge of intercrops. This dynamic appears to be more widespread in organic farming than conventional farming, suggesting that incentives from public policies to convert to organic farming might favour *High initial shares and increase* dynamics. For instance, under the CAP reform (2023-2027), French subsidies for the conversion to organic farming have been increased to 350€/ha/year for annual crops, including cereal–legume intercrops (i.e. +50€/ha/year compared to the 2015-2027 CAP), to foster conversions to organic farming. However, this reform removes the subsidies for maintaining organic farming, which until now represented 160€/ha/year for annual crops, which raises questions about future conversions. In addition to the organic farming scheme, the 2023-2027 CAP also provides subsidies for legumes to encourage their production and, thus, greater autonomy in plant proteins. These subsidies amount to 104€/ha/year, and cereal–legume intercrops are eligible, provided that legumes account for more than 50% of the intercrop. While it is still too early to measure the potential effects of this reform on the adoption of cereal–legume intercrops, ongoing studies of year-on-year dynamics such as the one we proposed here are well suited to monitor the effects of public policies or other support services in the adoption of agricultural practices (Marsh et al., 2000b; Wolff et al., 2021).

Finally, it would be interesting to further study the *Trial only* type, using e.g. qualitative approaches, such as on-farm surveys, to understand what farmers were looking for when they tried to implement cereal–legume intercrops and why they abandoned them after one or more years of trials. It is crucial not to ignore this type of dynamics, as it tells us the most about the major obstacles to adopting cereal–legume intercrops on farms. Indeed, as farmers in the *Trial only* type did implement cereal–legume intercrops, even for a short time, we can assume that they perceived sufficient benefits from the practice and that the farms' characteristics were favourable for its implementation, and market opportunities were secured (Ha et al., 2024). The reasons why farmers did not pursue the practice may reside in management, technological and/or knowledge issues (Ha et al., 2024), which we cannot perceive with our study based on LPIS data.

4.3 Limits and perspectives

In this study, we made assumptions about the links between the types of on-farm dynamics and the possible uses of intercrops, with particular reference to outlets in organic farming or animal feed. At the time of the study, we could not integrate the variables on farms' main production (e.g. livestock, arable crops) and types of farming (conventional or organic) to construct the clusters. Therefore, we interpreted them separately (Figure 4.4). Incorporating farm characteristics could have provided a more detailed understanding of the origins of these types of dynamics, including the behavioural and social aspects between farmers, that can play a crucial role in adopting new practices (Compagnone et al., 2018; Dury et al., 2013) and especially regarding sustainable farming practices (Dessart et al., 2019). Moreover, the spatial configurations of plots can significantly influence the crop dynamics on a farm by adding constraints in the plot allocation decisions (Schaller et al., 2012; Thenail & Baudry, 2004), but we did not consider them in this study.

In fact, we considered cereal–legume intercrops independently of other crops, but we could go further by looking at which sole crops are replaced by cereal–legume intercrops. For example, it is possible to follow the dynamics of sole legumes or sole cereals, to assess the trade-offs with intercrops. Also, by monitoring the dynamics of minor crops (Meynard et al., 2018) as well as those of intercrops, it could be possible to identify diversification patterns at farm and territorial scales, giving insights into the types of farms that are prone to crop diversification.

Here, we proposed a first quantitative approach based on the French LPIS data for monitoring the dynamics of the adoption of cereal–legume intercrops at farm and territorial scales. However, as already stated, this quantitative approach is insufficient to understand why and how farmers implement this practice. In particular, we did not consider the possibilities of “suspend-resume” since we computed linear regressions from an initial point (first year when cereal–legume intercrops were observed between 2015 and 2022) to an endpoint (last year when cereal–legume intercrops were observed between 2015 and 2022). As a result, the endpoints we observed are not necessarily definitive. To improve this first approach, it is possible to work with multiple regressions, analysing slope breaks, as Fouillet et al. (2023) proposed. The quantitative approach proposed in our study would also benefit from being supplemented with a qualitative approach to understand the reasons for changes in practices and the drivers of the dynamics observed.

5 Conclusion

Our study showed a diversity of dynamics in the adoption of cereal–legume intercrops, which are most likely linked to different adoption strategies implemented by farmers and corresponding to their constraints and objectives. Across the various subareas studied, we found the same types of dynamics: *Trial only*, *Adoption then constancy* and *High initial shares and increase*. These dynamics seem to be linked to the main types of production on the farms (organic farming, arable farming, livestock farming – and type of livestock farming) but not exclusively: farmers' decision-making can also be influenced by social, behavioural and cognitive aspects. Our study aimed to highlight the different types of dynamics and to understand which were responsible for the overall dynamics observed in recent years, which seemed to be the most sustainable over time, and thus, which we can rely on to develop intercrops. In a previous study, presented in Chapter 3, we identified individual pathways for adopting cereal–legume intercrops. The *Adoption then constancy* dynamics could be representative of the pathways of type A (*Adoption through a collective process*) and type C (*Changing on conventional systems*), in which farmers gradually integrated cereal–legume intercrops in their systems. The *High initial shares and increase* could be linked to the type B pathway (*Benefiting from a paved way*) in which farmers immediately introduced cereal–legume intercrops when establishing their farms without a proper trial phase. However, in Chapter 3, we did not identify a pathway representative of the *Trial only* type of dynamics.

The *Trial only* type, although it does not represent sustainable adoption of intercrops over time, seems particularly interesting to study in greater depth, as it could provide information on the major barriers to adoption, on which support services or public policies could focus. Finally, our results may be useful to local agricultural stakeholders in setting up support (e.g. training, advice, organisation of peer exchanges) in territories with strong potential and/or an already existing adoption dynamic. On a larger scale, by showing that intercropping adoption dynamics exist in France, our results could also influence actors of the supply chains into taking initiatives to create new markets, thus encouraging crop diversification.

DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette thèse est de produire des références sur les performances et l'intégration des cultures associées dans les exploitations agricoles en France.

Dans cette partie, je reviendrai sur les principaux résultats de la thèse, pour montrer comment ils répondent à la problématique générale et souligner les apports cognitifs de la thèse sur les dynamiques d'adoption des cultures associées (§1). Ensuite, je discuterai la démarche générale de la thèse pour montrer la pertinence de l'approche mixte et multi-échelles pour traiter mes questions de recherches, mais également leurs limites, en lien avec ma trajectoire de recherche pour certaines (§2). Enfin, j'ouvrirai la discussion sur les perspectives de développement des cultures associées d'après les résultats de la thèse, et les perspectives de recherches sur leur adoption (§3).

1 Les facteurs en jeu dans les dynamiques d'adoption des cultures associées

1.1 Les références techniques et économiques sur les cultures associées pour considérer leur adoption

Le manque de références techniques et économiques sur les cultures associées est pointé comme l'un des freins majeurs à leur adoption (Bybee-Finley & Ryan, 2018 ; Mamine & Farès, 2020 ; Ha et al., 2024). Les recherches sur les cultures associées visent à combler ce manque en étudiant par exemple les traits d'espèces pour optimiser les associations (Ouattara, 2023), les performances des associations en termes de rendements ou de qualité des productions (Li et al., 2023 ; Brooker et al., 2024), de résistance aux maladies et ravageurs de cultures (ex : Finckh et al., 2000 ; Malézieux et al., 2009), ou encore de compétition aux adventices (ex : Hauggaard-Nielsen et al., 2001 ; Carton et al., 2020 ; Bailey-Elkin et al., 2022), et ce souvent à partir d'expérimentations au champ. Il nous semblait intéressant de préciser ce qu'il en était lorsque l'on passait d'expérimentations en situations contrôlées à la réalité agricole. C'est en ce sens que nous avons quantifié, à partir de données de fermes du réseau DEPHY, les performances des cultures associées en comparaison avec les cultures pures (Chapitre 1). Notre étude s'est notamment attachée à étudier l'utilisation d'intrants chimiques, les rendements et/ou les marges brutes des mélanges variétaux de blé tendre et mélanges d'espèces à base de blé tendre, orge, pois, ou colza.

Dans cette première partie de discussion, nous reviendrons sur les résultats obtenus dans le Chapitre 1, notamment sur les IFT et les performances productives (rendements, marges brutes), et nous les mettrons en regard des autres modalités d'évaluation des cultures associées menant à leur adoption, ou au contraire à leur abandon, par les agriculteurs et agricultrices mises en évidence par les Chapitres 2, 3 et 4.

1.1.1 Les références sur les IFT et les rendements ne sont pas toujours au cœur des processus d'adoption des cultures associées

Dans le cas des **mélanges de variétés de blé**, nous n'avons pas observé de différences significatives sur l'utilisation des pesticides, les IFT étant globalement les mêmes entre blés purs et blés en mélange variétal (Chapitre 1). Ces résultats contrastent avec d'autres résultats de la littérature qui montrent l'efficacité des mélanges variétaux sur la régulation des bioagresseurs (ex : Kristoffersen et al., 2020 ; Snyder et al., 2020) mais concordent avec les enquêtes en exploitation qui ont mis en évidence des nuances quant à la réduction de pesticides – ou d'intrants chimiques en général – permise par les mélanges de variétés de blé. En effet, chez les agriculteurs enquêtés par Baptiste Coupery en 2023, des réductions sur les traitements fongicides ont pu être observées pour certains ; d'autres énonçaient une intention de réduire une fois la pratique maîtrisée, et d'autres encore n'avaient pas pour objectif de réduire les intrants grâce aux mélanges variétaux, comme exprimé par l'un d'entre eux : « on sait très bien que s'il y a une variété malade, on la retrouvera toujours [...] on peut à la limite retarder le traitement ». **Pour les agriculteurs qui réduisaient ou avaient l'intention de réduire les pesticides avec les mélanges variétaux, les raisons étaient parfois plutôt économiques qu'environnementales.** Les mélanges variétaux peuvent aussi être adoptés selon d'autres critères qui vont primer sur les objectifs de réductions d'intrants chimiques, comme la simplification des opérations culturales (Enjalbert et al., 2019 ; Coupery, 2023). En revanche, au sein du CIVAM du Pays Châtelleraudais, pour les agriculteurs avec une trajectoire de type A (Adoption des mélanges céréales-légumineuses suivant un processus collectif ; Chapitre 3), les mélanges variétaux sont apparus avec un objectif explicite de réduction des fongicides, pour des raisons à la fois économiques et environnementales. Pour eux, l'expérience des mélanges variétaux a été un premier pas vers l'agriculture biologique et les mélanges d'espèces. Ainsi, ces résultats obtenus sur le terrain montrent que **les mélanges variétaux**

peuvent effectivement permettre de réduire les fongicides, si cela constitue un objectif pour l'agriculteur ou l'agricultrice.

Dans le cas des **mélanges d'espèces**, nous avons montré une réduction d'utilisation des pesticides jusqu'à 72% en moyenne pour les mélanges de type céréales-légumineuses, mais n'avons pas observé de différences entre les cultures pures de colza et les mélanges colza-plantes compagnes (Chapitre 1). Toutefois, nos résultats obtenus avec les données du réseau DEPHY portent sur peu de cas (12 à 31 cas selon les espèces étudiées), et tous en agriculture conventionnelle, alors que les mélanges d'espèces, et notamment céréales-légumineuses, sont majoritairement présents en agriculture biologique, comme démontré en Chapitres 2 et 3 en ce qui concerne la situation française actuelle. Les enquêtes présentées dans le Chapitre 3 montrent même que les mélanges céréales-légumineuses sont devenus l'une des pratiques de « base » de l'agriculture biologique dans la zone d'étude, au même titre que l'alternance cultures de printemps/cultures d'hiver par exemple. Dans un contexte d'agriculture biologique, la réduction des intrants chimiques n'est pas un service attendu pour l'adoption des mélanges céréales-légumineuses, puisque cela constitue une condition inhérente au contexte de production. Les critères d'évaluation semblent plutôt concerner la capacité du mélange à réguler les bioagresseurs ou à limiter la verse des légumineuses grâce aux céréales qui servent de tuteurs. Le fait que les mélanges céréales-légumineuses soient majoritairement cultivés en agriculture biologique montre malgré tout qu'**il est effectivement possible de cultiver des mélanges d'espèces sans intrant chimique**, comme certains agriculteurs conventionnels enquêtés (trajectoire de type C, Chapitre 3) ont pu choisir de le faire.

Concernant les performances productives des cultures associées, nous avons étudié dans le Chapitre 1 les rendements pour les mélanges variétaux, et les marges brutes pour les mélanges variétaux et les mélanges d'espèces. En effet, avec les données du réseau DEPHY, nous n'avons pas pu comparer les rendements des mélanges d'espèces à ceux des espèces pures car nous n'avions pas accès aux rendements obtenus pour chaque espèce du mélange, mais uniquement au rendement global du mélange. Toutefois, d'après nos enquêtes (Chapitre 3), les marges brutes nous semblent être un indicateur peut-être plus pertinent que les rendements pour les agriculteurs et agricultrices qui visent plutôt une réduction des charges qu'une augmentation des rendements, comme l'exprime l'agriculteur A1 (Chapitre 3) : « y a

encore beaucoup de gens qui pensent que quand on a beaucoup de charges faut produire beaucoup [...] peut-être que le revenu on peut l'avoir justement en diminuant les charges et en abandonnant un petit peu de productivité ».

Pour les mélanges de variétés comme pour les mélanges d'espèces, les données du réseau DEPHY ont montré des réductions de marges brutes pour certains mélanges en comparaison aux cultures pures. Les réductions sur les marges brutes engendrées par les mélanges peuvent être problématiques quand il s'agit des cultures de rente d'une exploitation. Cependant, dans notre échantillon, la majorité des cas de mélanges à base de blé, orge ou pois concernait des exploitations de polyculture-élevage en agriculture conventionnelle, cas dans lesquels la motivation principale pour cultiver des mélanges est l'autonomie alimentaire pour l'élevage (Chapitres 2, 3). **Comparer les marges brutes dans ces cas-là n'est donc pas forcément pertinent, puisque les objectifs de production dépendent du type de troupeau à nourrir, de sa taille, et des autres sources d'alimentation.**

1.1.2 Les agriculteurs et agricultrices produisent leurs propres références au cours de phases de tests

Dans le Chapitre 1, avec les données du réseau DEPHY, nous n'avons pas pu accéder aux proportions de semis de chaque variété ou espèces dans les associations étudiées, ni aux configurations des semis (bandes, rangs, mélangés). Pourtant, ces deux aspects peuvent être déterminants dans les services de régulation des bioagresseurs ou sur les quantités et qualités de production (Borg et al., 2018; Montazeaud et al., 2022). Au cours de nos enquêtes, nous n'avons rencontré que des cas de semis mélangés, souvent en un seul passage (les semences sont mélangées dans le semoir), mais nous avons observé une diversité de proportions de variétés ou espèces constituant les associations. Pour les mélanges variétaux, le choix des proportions pouvait parfois être arbitraire (ex : 50/50 pour un mélange à deux variétés, 33/33/33 pour un mélange à trois variétés), car les agriculteurs pointaient un manque de références sur cet aspect (Coupery, 2023). De même, pour les mélanges d'espèces, il peut être difficile de choisir les espèces à associer et les proportions de chacune au semis. Plusieurs études se sont penchées sur ces questions, souvent avec l'objectif de créer un outil d'aide à la décision pour la composition des associations. Nous avons par exemple déjà mentionné l'outil Optimix issu du projet Wheatamix pour les mélanges de variétés de blé

(<http://moulon.inra.fr/optimix/>). Pour les mélanges d'espèces, l'outil CAPS⁷ a été développé pour aider à choisir les espèces de plantes compagnes pour le colza, issu du travail de Ouattara et al. (2023). Dans sa thèse, Ouattara (2023) propose un prototype d'outil d'aide à la conception de mélanges d'espèces (Ecosystemix), basé sur des relations entre traits fonctionnels et services écosystémiques. Ces outils sont cependant parfois difficiles à diffuser de la recherche vers les praticiens et praticiennes, et parfois mal adaptés à la diversité de contextes locaux, comme le soulignent Duru et al. (2015).

Ainsi, au cours du temps, les agriculteurs et agricultrices produisent leurs propres références techniques, à partir de leurs expériences personnelles et de ce qu'ils et elles ont pu observer ailleurs. Par exemple, l'agriculteur A3 (Chapitre 3) nous a détaillé ses modalités de semis de colza avec des plantes compagnes, liant à la fois son expérience et celle d'un collègue (A1) : « J'ai fait des essais précédemment, semer les plantes compagnes d'abord et re-semer au monograin, semoir de précision, le colza. Les deux années où j'ai fait ça, ça a pas fonctionné. J'ai des collègues chez qui ça a fonctionné [...] L'expérience de [A1] où il semait tout en même temps, lui ça fonctionne donc j'ai fait ça ». Ce même agriculteur a aussi testé plusieurs plantes compagnes ; il n'a pas été convaincu par la féverole qui levait trop tard par rapport au colza, et sème désormais de la cameline et du sarrasin, qui sont des plantes gélives ou qui se trient facilement du colza si jamais elles n'ont pas gelé. Dans ce contexte, **il faut parfois plusieurs années avant de trouver son équilibre**, comme l'explique l'agriculteur A5 concernant les proportions de semis : « Je dirais qu'il faut qu'il y ait 60 à 70 % de céréales pour 30 à 40 % de protéagineux. Après, ça dépend quels protéagineux. Si c'est de la vesce, il faut quand même limiter à pas plus de 10 % de vesce dans le semis. [...] Après, c'est l'expérience qui fait qu'aujourd'hui je vois un mélange, je dis "là c'est bon". Oui, on met plusieurs années à se rendre compte de ce qui convient dans nos champs ». Ces expériences observées au cours de nos enquêtes renvoient aux processus de conception pas-à-pas des agriculteurs et agricultrices, et en particulier aux étapes de boucles itératives diagnostic – exploration – implémentation – mise en œuvre – évaluation, et à l'imbrication des dimensions individuelles et collectives (Meynard et al., 2023).

Concrètement, **ces phases de test peuvent se traduire par des modalités différentes d'intégration des associations dans les exploitations**, car les agriculteurs et agricultrices

⁷ <https://agronomie.versailles-saclay.hub.inrae.fr/productions/outils-et-modeles/caps-colza-associe>

conçoivent dans leur situation propre, selon leurs objectifs et leurs situations de productions (Catalogna et al., 2018; Meynard et al., 2023), comme nous l'avons vu dans le Chapitre 3, avec les changements de composition des mélanges au cours du temps. Ces différentes modalités se traduisent aussi dans les dynamiques mises en évidence dans le Chapitre 4. Par exemple, les dynamiques de Type 2 (*Adoption puis constance*) qui correspondent à une augmentation progressive des surfaces mélanges céréales-légumineuses dans l'exploitation, avant d'atteindre un plateau, pourraient traduire les phases de test (l'agriculteur ou l'agricultrice augmente progressivement les surfaces, à mesure qu'il ou elle s'approprie la conduite de la nouvelle pratique) suivies de la phase de stabilisation, où l'agriculteur ou l'agricultrice a trouvé le « bon mélange », et maintient la pratique sur les surfaces qui lui sont nécessaires pour ses objectifs de production. A l'inverse, les dynamiques de Type 1 (*Essais*), qui correspondent à une adoption des mélanges sur un temps court (inférieur à deux ans dans la plupart des cas) suivie d'un abandon, pourraient traduire une phase de test infructueuse au cours de laquelle l'agriculteur ou l'agricultrice a peut-être manqué de références techniques au départ, ou a été confronté à des problèmes qu'il ou elle n'a pas pu résoudre, et a finalement abandonné la pratique⁸. Enfin, les dynamiques de Type 3 (*Parts initialement élevées puis augmentation*), qui correspondent à une intégration des mélanges dès le départ sur des surfaces plus importantes que dans les deux autres types, et avec une augmentation des surfaces au cours du temps, pourraient traduire des phases de test plus courtes, pour des agriculteurs et agricultrices qui disposaient déjà de références précises avant de commencer, peut-être car ils et elles avaient pu se renseigner en visitant des essais (comme l'agriculteur B3 dans le Chapitre 3, qui avait visité des essais de sa coopérative), ou en échangeant avec des pairs. En effet, les agriculteurs et agricultrices produisent leurs propres références techniques, mais les partagent aussi avec d'autres, ce qui peut avoir un rôle non négligeable dans les dynamiques d'adoption des cultures associées au sein des territoires (Chapitres 3, 4). Ces différentes dynamiques d'adoption peuvent également résulter de différences de comportements quant à la prise de risque, les dynamiques de type *Parts initialement élevées puis augmentation* étant potentiellement plus risquées que les deux autres.

⁸ Toutefois, à ce stade, du fait des données utilisées, nous ne pouvons pas déterminer si cet abandon est définitif ou temporaire avec éventuellement de nouveaux essais ultérieurement mis en place.

Enfin, les expériences propres des agriculteurs et agricultrices peuvent aussi participer à la production de références diffusées plus largement, sur leur territoire ou au-delà, comme cela a pu être le cas avec le projet de recherche participative APACH (Chapitre 3), ou encore le projet CARPESO porté par huit chambres d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine, en partenariat avec un institut technique, des chambres régionales et deux organismes de recherche, qui visait à produire des références sur la réduction des pesticides à partir de suivis dans des systèmes de polyculture-élevage (Chambre d'agriculture Haute-Vienne, 2024). L'implication de multiples acteurs dans la production et la diffusion de références contribue à promouvoir les mélanges céréales-légumineuses à large échelle.

1.2 Les échanges entre pairs et l'accompagnement des agriculteurs et agricultrices

1.2.1 Favoriser l'adoption en levant les freins techniques et matériels

Malgré des effets non significatifs des mélanges variétaux de blé sur les IFT observés dans le Chapitre 1, nous avons vu dans le Chapitre 3 que ces mélanges pouvaient quand même conduire à une réduction de l'utilisation de fongicides, et même constituer un premier pas vers la diversification des cultures. Toutefois, pour les agriculteurs et agricultrices du CIVAM du Pays Châtelleraudais, cela a nécessité un accompagnement spécifique pour apprendre à observer les pieds de blé, détecter les signes de maladie et moduler les doses et passages en fonction.

Dans les trajectoires d'adoption décrites dans le Chapitre 3, nous avons constaté l'importance des échanges entre pairs pour mettre en œuvre les cultures associées. Les agriculteurs de la trajectoire A (Adoption des mélanges céréales-légumineuses suivant un processus collectif ; Chapitre 3) ont agi comme source de conseils auprès des agriculteurs et agricultrices des trajectoires B (Adoption en agriculture biologique profitant de voies déjà ouvertes) et C (Adoption pour changer dans des systèmes conventionnels), qui ont adopté les mélanges ultérieurement.

Le travail en collectif implique également le partage de ressources matérielles, à travers les CUMA par exemple. Dans le Chapitre 2, nous montrons que l'appartenance à une CUMA est l'une des caractéristiques notables des fermes adoptant les mélanges céréales-légumineuses. Lucas et al. (2019) montrent que les CUMA permettent de développer des pratiques agroécologiques de cinq façons : en satisfaisant des besoins matériels, en facilitant

l'auto-provisionnement (par des échanges de semences par exemple), en réorganisant les charges de travail, en créant des espaces de dialogues et échanges de connaissances, et en rassurant les agriculteurs et agricultrices sur la capacité à surmonter des difficultés collectivement. D'autres formes de partages de ressources peuvent cependant exister en dehors des CUMA, comme nous l'avons constaté avec des prêts de trieur hors CUMA entre certains agriculteurs enquêtés dans le Chapitre 3, et qui ont pu faciliter ensuite la valorisation des productions.

Ces résultats sont en accord avec ceux de Compagnone (2004), Darnhofer et al. (2010), et Chantre & Cardona (2014) montrant que les échanges entre pairs et le travail en collectif favorisent les changements de pratiques en agriculture, y compris pour l'adoption de pratiques de diversification, souvent freinée par des difficultés techniques et matérielles (Revoyron et al., 2022).

1.2.2 Favoriser l'adoption en levant les freins psychologiques

Un frein majeur pour les réductions d'utilisation de pesticides, et notamment d'herbicides ou fongicides, peut être celui du regard des autres face à une parcelle perçue comme « sale », et ainsi la peur d'être marginalisé en ne suivant pas les pratiques dominantes (Vialatte et al., 2023, Chapitre 2). L'accompagnement et le travail collectif sont des manières efficaces de surmonter ces freins (Cerf et al., 2010 ; Baumgart-Getz et al., 2012 ; Barbier et al., 2015). Au sein du CIVAM du Pays Châtelleraudais, c'est bien une formation collective sur l'observation de pieds de blé qui a permis de lever les freins psychologiques : « le fait de faire ça en groupe, ça permettait de pas se sentir seul [...] Le technicien il nous disait "ça sert à rien de faire des traitements quand il fait sec et qu'il y a pas de contamination". Et du coup le fait qu'on était tous ensemble, ça déculpabilisait de pas traiter » (agriculteur A1, Chapitre 3). Au moment où un agriculteur ou une agricultrice considère l'adoption d'une nouvelle pratique, le fait d'avoir des témoignages de personnes plus expérimentées peut être rassurant et ainsi lever certaines appréhensions qui freinaient l'adoption.

1.2.3 Favoriser l'adoption en levant les freins économiques

Des collaborations entre agriculteurs et agricultrices peuvent aussi favoriser l'adoption des cultures associées, en créant des débouchés, et ainsi lever les freins économiques relatifs à la valorisation des cultures associées. Nous en avons vu plusieurs exemples dans le Chapitre 3, avec les agriculteurs A1 et A2 qui vendaient leurs mélanges céréales-légumineuses à des éleveurs, et s'adaptait d'ailleurs aux besoins énoncés par ces éleveurs. Un autre exemple concerne une collaboration entre l'agriculteur A3 et l'agriculteur A1. Nous avons déjà mentionné les difficultés rencontrées par l'agriculteur A3 à cultiver du colza avec des plantes compagnes. Cependant, cet agriculteur a besoin de colza pour son activité d'huilerie à la ferme. L'agriculteur A1, quant à lui, parvient à cultiver des colza avec des plantes compagnes, qu'il vend ensuite à A3. Ainsi, cette collaboration permet à l'un d'avoir un débouché pour son colza, et à l'autre de sécuriser son activité de transformation.

1.3 L'adaptabilité des associations selon l'existence de débouchés et les objectifs et contraintes des agriculteurs et agricultrices

Les cultures associées sont adoptées à un instant t , et bien souvent, les agriculteurs et agricultrices vont commencer par un type d'association précis : mélange variétal, prairie multi-espèces, colza associé avec des plantes compagnes, mélange céréale-légumineuse binaire ou mélange céréales-légumineuses complexe de type méteil par exemple. Le suivi des surfaces cultivées en mélange avec les données RPG rend compte de l'évolution de l'assolement en termes de surfaces et parcelles allouées (Chapitre 4), mais ne permet pas toujours de savoir si l'agriculteur ou l'agricultrice opère des changements dans sa stratégie d'assolement, avec notamment l'intégration de nouveaux types d'associations ou l'abandon de certains autres. En effet, les données RPG ne précisent pas les espèces présentes dans les mélanges. Pourtant, dans le Chapitre 3, nous avons vu que de nombreux changements pouvaient avoir lieu au cours du temps, sans que la pratique des mélanges ne soit remise en question : une fois adoptés, les mélanges « restent » sur l'exploitation, mais leur composition peut être modifiée pour de multiples raisons, comme de nouveaux débouchés ou partenariats, l'introduction de nouvelles activités sur la ferme, la curiosité, les conditions météorologiques, ou même des raisons personnelles ou familiales. **Les cultures associées, par les multiples formes qu'elles peuvent prendre, semblent donc permettre une certaine adaptabilité dans les fermes** (Himanen et

al., 2016) puisqu'il est toujours possible de modifier leur composition tout en conservant les bénéfices associés à la pratique, comme le fait de cultiver des légumineuses, souvent nécessaires pour les systèmes en agriculture biologique, mais difficiles à cultiver pures dans ces conditions, car sensibles à la verse et aux ravageurs de cultures (Kontturi et al., 2011).

Un frein majeur à l'adoption des associations d'espèces concerne le manque de débouchés, notamment en grandes cultures. Les résultats du Chapitre 2 suggèrent que les mélanges céréales-légumineuses sont majoritairement adoptés dans les fermes en agriculture biologique et/ou spécialisées en élevage de bovins et ovins/caprins. En effet, ces deux contextes de production permettent de valoriser les mélanges céréales-légumineuses : d'une part, pour améliorer l'autonomie alimentaire dans le cas de l'élevage (Chapitre 3) et/ou d'autre part, *via* les coopératives agricoles ou négoce en agriculture biologique, dont la plupart collecte désormais des mélanges d'espèces binaires (une céréale associée à une légumineuse) et les trie pour les valoriser séparément dans les filières (Chapitre 3). Le Chapitre 2 met également en évidence le stockage de grains à la ferme comme l'une des caractéristiques principales observées dans les fermes adoptant les mélanges céréales-légumineuses. Si ce stockage peut renvoyer à celui nécessaire pour le stockage des aliments du bétail, il peut aussi suggérer une valorisation des récoltes en dehors des circuits de commercialisation majoritaires, soit les organismes de collecte et stockage. En effet, **le manque de débouchés subi pendant longtemps a pu pousser des agriculteurs et agricultrices à aller vers d'autres voies, en diversifiant les activités de la ferme par exemple** (Chapitre 3), ce qui confère encore davantage d'autonomie et résilience (Darnhofer et al., 2010). Même dans les exploitations biologiques spécialisées en grande culture, nous voyons se développer d'autres manières de valoriser les cultures (Chapitre 3) qui donnent de la satisfaction au travail pour les agriculteurs et agricultrices (Cournut et al., 2023). Les activités de diversification permettent aussi de se dégager de meilleurs revenus, notamment dans le cas de transformations à la ferme, car les produits peuvent être vendus avec une plus grande valeur ajoutée et éventuellement compenser des pertes de rendements ou marges (Chapitre 1). Toutefois, ces activités nécessitent parfois des investissements conséquents dans de nouveaux équipements, bâtiments, ou même pour la rémunération d'une main-d'œuvre supplémentaire. Ici, l'intérêt des CUMA est alors fort, comme montré dans le Chapitre 2, à la fois pour le matériel, mais aussi éventuellement pour de la main-d'œuvre, puisque les CUMA peuvent employer de la main-d'œuvre partagée entre plusieurs exploitations. Des subventions telles que celles attribuées

dans le cadre des programmes LEADER (Liaison entre Actions de Développement de l'Économie Rurale) peuvent aussi aider pour investir, comme cela a été le cas de plusieurs agriculteurs enquêtés et qui se sont lancés dans des activités de tri et/ou transformation (Chapitre 3).

2 Intérêts et limites de l'approche mixte et multi-échelles pour étudier les dynamiques d'adoption des cultures associées

2.1 Des apports complémentaires entre bases de données nationales et enquêtes de terrain localisées

L'utilisation de bases de données nationales telles que la base de données du réseau DEPHY Fermes, le Registre parcellaire graphique et le recensement agricole permettent d'étudier un large échantillon de systèmes de culture ou d'exploitations dans une diversité de situations de production. Chacune de ces trois bases apporte des éléments différents : les données du réseau DEPHY Fermes renseignent sur les pratiques agricoles et leurs performances (ex : IFT et performances économiques), le RPG renseigne de manière annuelle les cultures assolées, les configurations de parcellaires, et avec des traitements de données complémentaires, les successions culturales (Levavasseur et al., 2016). Le recensement agricole donne quant à lui accès à des caractéristiques de fermes de manière exhaustive à l'échelle de la France et à un instant t (en 2020 dans notre cas).

L'un des principaux atouts des trois bases mobilisées dans cette thèse, est qu'elles sont spatialisées. Ainsi, elles ont permis de **localiser des cultures associées pour étudier leurs performances et leurs dynamiques d'adoption dans des contextes variés**. En suivant les assolements de 2015 à 2022 avec le RPG, nous avons mis en évidence et localisé des zones particulièrement dynamiques quant à l'adoption des mélanges céréales-légumineuses (Chapitres 2, 4). Ainsi, nous avons centré certaines parties de notre étude sur trois territoires identifiés dans l'ouest, l'est et le sud de la France :

- Dans le Chapitre 2, nous avons choisi d'étudier les facteurs liés à l'adoption des mélanges céréales-légumineuses à l'échelle nationale, mais aussi localement dans ces trois régions pour identifier de potentielles spécificités régionales ;
- dans le Chapitre 3, nous avons analysé de manière approfondie des trajectoires d'adoption sur un terrain localisé dans la zone ouest ;

- dans le Chapitre 4, nous avons caractérisé des dynamiques d'intégration des mélanges céréales-légumineuses à l'échelle des exploitations et des territoires dans les zones ouest et sud, car le suivi des assolements effectué avec le RPG avait permis de mettre en évidence une diffusion de la pratique à partir de points chauds dans ces deux zones (Introduction générale, Figure 6).

Toutefois, les trois bases de données mobilisées présentent leurs limites. **Aucune d'entre elles ne prend en compte la dimension « logique d'acteurs »**, qui est pourtant primordiale dans l'étude de dynamiques d'adoption de pratiques agricoles, et ce d'autant plus à l'échelle des territoires (Introduction générale, §4 ; Duru et al., 2014). Compléter les bases de données avec des enquêtes de terrain permet de mieux prendre en compte cet aspect. Par exemple, dans le Chapitre 2, les analyses sur le recensement agricole ont montré que l'appartenance à une CUMA était l'une des caractéristiques principales des fermes adoptant les mélanges céréales-légumineuses. Les enquêtes de terrain nous ont ensuite aidé à comprendre que l'appartenance à une CUMA pouvait favoriser l'adoption de la pratique sur de multiples aspects (Discussion générale, §1.2).

Une autre limite des bases de données concerne leur interprétabilité, avec des données parfois manquantes ou ambiguës, et des résultats qui peuvent paraître déconnectés des situations agricoles d'ensemble. **Les enquêtes de terrain permettent d'affiner la compréhension des données contenues dans les bases et des résultats obtenus avec celles-ci.** Par exemple, les enquêtes de terrain nous ont été utiles pour comprendre comment les agriculteurs et agricultrices déclaraient leurs mélanges pour la PAC, ce qui nous a permis de définir les codes RPG à considérer pour nos analyses, soit les codes MCR (mélanges de céréales ou pseudocéréales pures ou en mélange avec des protéagineux non prépondérants et/ou des oléagineux) et MPC (mélanges de protéagineux prépondérants (pois et/ou lupin et/ou féverole) et de céréales). De même, ces enquêtes nous ont permis de comprendre qu'il était difficile de suivre les évolutions de surfaces de colza associé avec des plantes compagnes avec le RPG, car celui-ci est déclaré comme un colza pur, les plantes compagnes n'étant pas récoltées et souvent plus en place au 15 mai⁹. Ainsi, sur les différents résultats obtenus à partir des analyses de bases de données, les enquêtes nous ont permis :

⁹ Avec la réforme de la PAC 2023-2027, le contrôle se fait désormais de manière continue sur les parcelles entre juin et septembre (Agence de Services et de Paiement), mais jusqu'en 2022 (année limite de notre étude), les déclarations

- De comprendre les logiques d'actions des agriculteurs et agricultrices quant aux décisions de traitements de leurs cultures, ce qui nous a aidé à interpréter et nuancer certains résultats obtenus dans le Chapitre 1 ;
- de resituer les caractéristiques des fermes mises en évidence dans le Chapitre 2 dans les processus d'adoption des mélanges céréales-légumineuses, et comprendre leurs liens avec les objectifs des agriculteurs et agricultrices, de manière globale sur leurs exploitations ;
- d'interpréter, grâce aux enseignements tirés des trajectoires d'adoption des mélanges céréales-légumineuses du Chapitre 3, les dynamiques de leur intégration dans les fermes et les territoires définies dans le Chapitre 4.

Une dernière limite concernant le RPG et le recensement agricole, est que ces bases nous donnent accès aux surfaces représentées par les mélanges céréales-légumineuses, mais **nous ne pouvons pas connaître la composition des mélanges**. Les enquêtes de terrain dans le Chapitre 3 ont permis d'affiner ce point pour lier les compositions de mélanges aux objectifs et contraintes des agriculteurs et agricultrices, ainsi que leur évolution au cours du temps, que cela soit lié aux phases de test que l'on retrouve dans le Chapitre 4, ou bien les différentes opportunités de débouchés suggérées par les résultats du Chapitre 2 sur les caractéristiques des fermes.

Finalement, pour l'étude de pratiques agricoles innovantes – comme les cultures associées (Verret et al., 2020) –, la démarche utilisée dans cette thèse est complémentaire de certaines étapes de la traque aux innovations, en particulier pour l'étape de *détection d'innovations dans les exploitations* qui peut se faire en s'appuyant sur des bases de données spatialisées, puis dans l'étape de *connaissance des innovations*, en s'appuyant sur les enquêtes de terrain (Salembier et al., 2015). Réciproquement, en partant d'études de cas locales, il est possible de détecter des dynamiques spécifiques et de les caractériser, puis de retourner vers des bases de données nationales afin de voir si ces dynamiques se retrouvent ailleurs. Au-delà de l'étude de l'adoption des cultures associées, les méthodes proposées dans les différents

se faisaient plutôt en fonction des cultures en place sur les parcelles au moment de la déclaration, soit entre le 1er mars et le 15 mai.

chapitres de la thèse peuvent être adaptées pour l'étude d'autres pratiques agricoles – pourvu que celles-ci soient traitées dans les différentes bases de données mobilisées.

2.2 Des apports complémentaires entre les échelles système de culture, exploitation agricole et territoire

En lien avec l'approche mixte, l'approche multi-échelles permet d'aller au plus près des raisonnements des agriculteurs et agricultrices. Les échelles de la parcelle et du système de culture sont utiles pour mesurer les performances des cultures associées, à la fois par la recherche (Chapitre 1) et par les praticiens et praticiennes (Chapitre 3). Mais prises de manière isolée, ces performances ne considèrent pas les objectifs globaux de l'exploitation agricole, et cela peut conduire à des évaluations non pertinentes, comme nous avons pu le souligner en ce qui concerne l'étude de marges brutes attribuées à des cultures autoconsommées sur la ferme (Chapitre 1). L'échelle de l'exploitation agricole permet alors de replacer les cultures associées et leur conduite dans le fonctionnement global de l'exploitation, et de mettre en évidence les caractéristiques liées à leur adoption (Chapitre 2). Cette échelle permet également d'inclure les points de vue des agriculteurs et agricultrices, et ainsi de mieux comprendre les décisions dont nous mesurons les conséquences aux échelles des parcelles et systèmes de culture. Placée dans un territoire, l'exploitation agricole est aussi une unité utile pour décrire les dynamiques d'adoption des cultures associées, en termes de surfaces cultivées sur un territoire, et ainsi comprendre les origines de ces dynamiques et leurs potentiels futurs (Chapitre 4). Enfin, puisqu'une exploitation agricole évolue dans un contexte environnemental, social et économique, et que les agriculteurs et agricultrices sont en interaction avec des réseaux d'acteurs, l'échelle territoriale est nécessaire pour étudier en profondeur les dynamiques et processus d'adoption de pratiques agricoles (Chapitres 2, 3, 4).

2.3 Limites de la démarche et trajectoire de recherche

Outre les limites inhérentes aux bases de données ou aux enquêtes elles-mêmes, la démarche globale adoptée présente également ses limites. Une première limite concerne la **temporalité de l'étude**. Avec les bases de données, nous étions sur des dates relativement récentes, entre 2010 et 2021 dans le Chapitre 1 (données du réseau DEPHY Fermes), en 2020 dans le Chapitre 2 (données du recensement agricole 2020) et entre 2015 et 2022 dans le

Chapitre 4 (données du RPG). Or, les trajectoires d'adoption analysées dans le Chapitre 3 ont démarré pour certaines avant les années 2000. Ainsi, avec notre méthode d'analyse dans le Chapitre 4, nous n'avons pas pu capter de dynamiques antérieures à 2015 et n'avons pas réussi à classer toutes les exploitations enquêtées dans des dynamiques, alors que cela aurait pu permettre d'approfondir les réflexions sur le rôle des dynamiques territoriales pour l'adoption des mélanges céréales-légumineuses. Dans les données RPG de 2015 à 2022 utilisées pour le Chapitre 4, nous n'avons pu retrouver les données d'assolement que de cinq agriculteurs et agricultrices du Chapitre 3 : deux agriculteurs de la trajectoire A, une agricultrice de la trajectoire B et deux agriculteurs de la trajectoire C. Ces cinq cas ont été classés dans la dynamique de Type 2, à savoir *Adoption puis constance*, caractérisée par une augmentation graduelle des surfaces de mélanges céréales-légumineuses avant une stabilisation (Chapitre 4). L'agricultrice de type B s'étant installée en 2019, il serait intéressant de reproduire l'étude avec une ou deux années de données du RPG supplémentaires afin de voir si sa dynamique est finalement classée en Type 3 (*Parts initialement élevées puis augmentation*), celle-ci ayant commencé en 2019 avec déjà 30,9% de son assolement dédié à des mélanges céréales-légumineuses.

Une deuxième limite de notre démarche concerne le **choix du cas d'étude pour les enquêtes de terrain**, à savoir le CIVAM du Pays Châtelleraudais, identifié grâce au projet de recherche participative APACH. Ce choix était en fait fortement lié à ma trajectoire de recherche, et je souhaite donc revenir sur celle-ci afin de discuter de cette limite.

Au début de la thèse, la hausse des surfaces de mélanges d'espèces observée dans les données du RPG m'a probablement donné une vision – trop – optimiste de la diffusion de la pratique en France. Ayant une formation d'analyste de données, j'étais bien consciente de tous les biais qui allaient avec les avantages des bases de données – dont certains que j'ai pu expliciter dans la section 2.1 de cette discussion. Dès le départ, je savais donc que pour traiter mon sujet, il me fallait aller sur le terrain pour comprendre les choix et les pratiques des agriculteurs et agricultrices.

Ma thèse étant intégrée dans le projet MoBiDiv (« Mobiliser et sélectionner la diversité cultivée intra et inter-spécifique pour un changement systémique vers une agriculture sans pesticide »), l'ambition d'origine était de traiter le sujet des cultures associées sous le prisme d'une pratique pour aller vers une agriculture sans pesticide. De plus, les enjeux de réduction

des intrants chimiques sur les grandes cultures, et notamment les cultures céréalières étant forts, je souhaitais étudier en particulier les cultures associées impliquant des céréales. Les enquêtes de terrain devaient donc me permettre de comprendre les mécanismes de diffusion à l'échelle des territoires, et les impacts sur la réduction des intrants chimiques. Avec les données à disposition, en particulier le RPG, je pensais trouver un terrain d'étude avec des agriculteurs et agricultrices en grandes cultures conventionnelles, chez qui il serait possible d'étudier les potentiels de réduction des intrants chimiques sur les céréales grâce aux cultures associées. Malgré des fouilles poussées, avec de multiples sources et auprès de divers acteurs (ex : RPG, réseau DEPHY, prise de contact avec des conseillers et conseillères de chambres d'agriculture, des chercheurs et chercheuses ayant travaillé sur les cultures associées, littérature grise), j'ai dû me rendre à l'évidence : je n'allais pas trouver une zone avec une « forte » concentration d'agriculteurs et agricultrices en grande culture conventionnelle et cultivant des cultures associées à base de céréales.

Au travers de mes recherches, le projet APACH m'a toutefois interpellée. Impliquant à la fois des fermes de grandes cultures et d'élevage ou polyculture-élevage, avec une majorité en agriculture biologique, il ne correspondait pas tout à fait aux critères fixés, mais j'ai tout de même contacté un agriculteur impliqué dans le projet : un céréalier en agriculture biologique. Celui-ci m'a donné deux autres contacts, et j'ai donc commencé un terrain « exploratoire » auprès de ces trois agriculteurs. En parallèle, j'avais aussi avancé sur la littérature concernant mon sujet de thèse, et mes échanges avec des conseillers et conseillères de chambres d'agriculture m'ont permis de comprendre qu'il existait encore de nombreux freins à l'adoption des mélanges céréales-légumineuses en grande culture conventionnelle, et ce malgré l'augmentation des surfaces observée dans le RPG. J'ai donc continué avec mon terrain « exploratoire », et au fur et à mesure des entretiens, mon intérêt pour le projet APACH, la démarche, et le fonctionnement des exploitations enquêtées, individuellement ou en interaction avec les autres, ne faisait que croître. J'ai fini par comprendre l'importance que la démarche collective avait pu avoir dans les changements de pratiques des agriculteurs et agricultrices, y compris sur l'adoption des mélanges céréales-légumineuses. Cela m'a donc mise sur la piste des « trajectoires de changements de pratiques ». Ce terrain a finalement permis, comme je me suis attachée à le montrer dans les sections précédentes, de mieux comprendre mes résultats issus d'analyses statistiques quantitatives, mais je suis consciente que ce cas d'étude était un cas très particulier, et que ma thèse aurait pu être enrichie d'un ou

plusieurs autres cas. D'ailleurs, à l'occasion du 18th Congress of the European Society for Agronomy qui s'est déroulé à Rennes (France) en août 2024, j'ai découvert, au fil de discussions, que les mélanges blé–pois ne sont certes pas développés en agriculture conventionnelle en France, mais le sont bien en Belgique, avec au moins une coopérative agricole concernée. Il était alors trop tard pour m'intéresser de manière approfondie à ce cas, mais de futures recherches, dans le cadre du projet MoBiDiv par exemple, pourront certainement en tirer des enseignements. Enfin, avec les autres parties de la thèse et toutes les activités de doctorat autres que la thèse, je n'ai malheureusement pas eu le temps de recontacter les personnes enquêtées pour les tenir au courant de mes avancées, alors que leurs retours sur les trajectoires décrites auraient pu permettre de valider ou affiner mon travail.

Enfin, une troisième limite de la démarche, liée au choix du cas d'étude, concerne les **types de trajectoires d'adoption détaillés**. Finalement, dans la thèse, nous nous concentrons sur la présence de cultures associées et sur leur adoption « réussie ». Toutefois, le Chapitre 4 montre qu'il existe une part non négligeable d'agriculteurs et agricultrices qui auraient testé les mélanges céréales–légumineuses pendant quelques années (souvent moins de deux ans) avant de les abandonner (dynamique de Type 1, *Essais*). Afin de décrire les dynamiques d'adoption de manière complète, il faudrait également se pencher sur ces cas « d'essais-erreurs » qui pourraient apporter des éléments complémentaires sur les freins et leviers à l'adoption durable des cultures associées. En effet, ayant été jusqu'à tester la pratique sur leurs exploitations, cela signifie que plusieurs conditions favorables à l'adoption des mélanges céréales–légumineuses ont été réunies à un moment donné pour ces agriculteurs et agricultrices, comme une bonne perception des bénéfices de la pratique, des débouchés identifiés, un certain nombre de références techniques (Ha et al., 2024), mais que celles-ci n'ont peut-être pas suffi. Les trajectoires de « test et non adoption » semblent donc complémentaires des trajectoires d'adoption que nous avons pu décrire dans le Chapitre 3.

3 Perspectives sur les dynamiques d'adoption d'après les résultats de la thèse et perspectives de recherches

Nous avons montré l'existence d'une diversité de dynamiques d'adoption des cultures associées, et les rôles d'une diversité d'acteurs du monde agricole dans ces dynamiques. Dans cette dernière partie de discussion générale, nous discuterons dans un premier temps des perspectives sur les dynamiques d'adoption possibles et des rôles de différents acteurs dans

celles-ci, puis nous ferons le lien avec les perspectives de recherche sur l'adoption des cultures associées.

3.1 Des dynamiques potentielles initiées par une diversité d'acteurs

3.1.1 Initiatives des agriculteurs et agricultrices et rôles de services de support

Notre cas d'étude dans le CIVAM du Pays Châtelleraudais a montré que des initiatives venant des agriculteurs et agricultrices pouvaient être à l'origine de dynamiques collectives à l'échelle territoriale. Nos résultats montrent aussi que l'accompagnement des agriculteurs et agricultrices, s'il est adapté à leurs besoins, peut favoriser les changements de pratiques. Le CIVAM a par exemple favorisé les échanges entre pairs, proposé des formations collectives dans le but de réduire les fongicides sur le blé, mais également organisé des visites d'expérimentations ou de fermes expérimentales (des essais à l'INRA de Grignon ont été cités dans plusieurs entretiens, au même titre que la ferme de Thorigné-d'Anjou). Ceci a participé à alimenter les références techniques sur la pratique pour les agriculteurs et agricultrices (Discussion générale, §1.1), indispensables pour une adoption durable. Les formations à la conversion à l'agriculture biologique, dispensées par exemple par les Fédérations Régionales d'Agriculture Biologique, en abordant le sujet des cultures associées, favorisent également leur adoption, comme cela a pu être le cas pour l'agriculteur B3. Enfin, nous avons vu que le projet APACH (Chapitre 3), dont le CIVAM était à l'initiative, avait été important pour les agriculteurs et agricultrices qui y avaient participé, car les résultats avaient permis de valider leurs observations empiriques. Le projet CARPESO, co-porté par des chambres d'agriculture permet également de diffuser des informations sur les cultures associées, avec l'objectif de « promouvoir et valoriser l'installation de méteils au sein des systèmes polyculture-élevage du Sud-Ouest » (Chambre d'agriculture Haute-Vienne, 2024). Ainsi, l'augmentation des références produites, et notamment de celles co-produites avec des agriculteurs et agricultrices, est favorable pour les dynamiques d'adoption futures. Au niveau des conseillères et conseillers de chambres d'agriculture que nous avons pu enquêter, certaines et certains animaient également des groupes du réseau DEPHY, et accompagnaient des agriculteurs et agricultrices pour la pratique de méteils.

3.1.2 Rôles des acteurs de l'aval

En agriculture biologique, les coopératives agricoles et négoce qui collectent des cultures associées mettent en place des essais et organisent des visites et formations pour les agriculteurs et agricultrices. Des coopératives encouragent d'ailleurs vivement les agriculteurs et agricultrices à cultiver des mélanges d'espèces, et leur intérêt pour les mélanges d'espèces remonte déjà à plusieurs années pour certaines (Bousseau, 2009). En agriculture conventionnelle, nous avons identifié une coopérative qui commence à développer des mélanges de type blé-pois en agriculture conventionnelle en France (Agrodistribution, 2023), mais au moment où nous avons échangé avec l'un de ses représentants (en août 2023), seulement un agriculteur s'était engagé dans cette pratique. En Belgique, nous avons identifié une autre coopérative développant une filière de mélanges blé-pois également, avec des objectifs de réduction d'intrants et d'amélioration de la rentabilité (Arvesta, 2023). Les organismes de collecte et de stockage restant les acteurs principaux de la commercialisation en grande culture, ils peuvent jouer un rôle déterminant dans les dynamiques de diffusion des cultures associées.

Cependant, concernant les mélanges d'espèces, les organismes de collecte et de stockage se limitent encore à la gestion de mélanges binaires, afin de faciliter leur tri et leur stockage, avant de les valoriser en tant qu'espèces pures. Développer des nouvelles filières pour valoriser les mélanges en tant que tels, sans tri, favoriserait encore d'avantage l'adoption de la pratique. Lors d'une Rencontre Chercheurs – Professionnels en mars 2024, organisée par INRAE, nous avons été témoin d'avancées sur la question, en échangeant notamment avec une représentante d'un groupe de l'industrie agro-alimentaire travaillant actuellement sur des processus de transformation pour utiliser des mélanges de céréales-légumineuses directement dans leurs produits.

3.1.3 Rôles des politiques publiques

Actuellement, en France, les politiques publiques n'incitent pas beaucoup à l'adoption des cultures associées, comme nous l'avons mentionné pour la PAC dans l'introduction générale de la thèse. Pourtant, celles-ci peuvent s'avérer efficaces, comme observé en Suisse par Bousselin (2022) sur l'exemple du colza associé à des plantes compagnes : « Public policies encourage "Extenso" production (production of a crop without any application of fungicides,

insecticides or growth regulators), and provide substantial subsidies for farmers who practice this production method. The Swiss Confederation also provides subsidies for farmers who do not use herbicides and do not plough their fields. These findings, together with other cantonal policies and extension communication, has encouraged a rapid adoption of [oilseed rate – service plants] intercropping in Switzerland ».

En collaboration avec des collègues du projet MoBiDiv, nous travaillons actuellement sur l'élaboration d'une fiche-action CEPP (Certificat d'économie de produits phytopharmaceutiques) sur le tri des mélanges d'espèces, à partir de résultats de la thèse (Chapitre 1). Le dispositif CEPP est « un mécanisme innovant, qui permet de dynamiser la diffusion des pratiques économes en produits phytopharmaceutiques pour les exploitants agricoles, tout en veillant à la performance économique des exploitations. Il vise à renforcer le rôle des distributeurs de produits phytopharmaceutiques sans faire porter des taxes supplémentaires aux agriculteurs » (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2024). Le dispositif concerne « les distributeurs de produits phytopharmaceutiques à usage agricole, les prestataires de service exerçant une activité de traitement de semences, les distributeurs de semences traitées et les agriculteurs ayant acheté des produits phytopharmaceutiques à l'étranger » (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2024). Concrètement, ce dispositif permet de définir un certain nombre d'actions en faveur d'une « économie de produits phytopharmaceutiques », à mettre en œuvre pour obtenir des certificats (les CEPP). Les entreprises ou structures concernées ont une obligation de nombre de certificats à obtenir, calculée en fonction de leurs ventes ou achats de produits phytopharmaceutiques. La fiche-action sur laquelle nous travaillons consiste à délivrer des CEPP pour l'action de tri des mélanges céréales-légumineuses, et nous espérons ainsi favoriser les actions de collecte, tri, stockage et donc l'adoption des mélanges céréales-légumineuses. Une fiche-action CEPP sur les mélanges de variétés existe déjà (Action n°2018-049, « Réduire les traitements au moyen de mélanges de variétés de blé tendre assez résistantes »), mais est actuellement uniquement basée sur la vente de mélanges variétaux certifiés – alors que les mélanges de variétés sont aussi, pour une grande partie, réalisés à partir de semences de fermes (Coupery, 2023).

3.2 La nécessité d'intégrer tous les niveaux pour développer les cultures associées durablement, y compris dans les thématiques de recherche

Bien que nous ayons observé des surfaces croissantes de cultures associées en France, et des dynamiques prometteuses pour le futur, celles-ci sont potentiellement fragiles. En effet, nous avons vu que leur pratique, notamment pour les mélanges céréales-légumineuses, était majoritaire en agriculture biologique, qui est actuellement en crise (Kressmann, 2022 ; Catteau, 2023), malgré une multiplication par 2,6 des surfaces certifiées ou en conversion entre 2014 et 2022 (Agence Bio, 2024). Martin (2024) trouve des explications à cette crise à plusieurs niveaux : un manque d'informations auprès des consommateurs et consommatrices, qui ont donc parfois une vision négative de l'agriculture biologique et arrêtent de consommer des produits qui en sont issus ; un manque d'investissements dans la recherche sur l'agriculture biologique, et une recherche majoritairement focalisée sur les pratiques agricoles, et pas assez sur le développement des marchés pour l'agriculture biologique ; et un manque d'études sur les phases de transition, et notamment sur la période de conversion à l'agriculture biologique. Cet exemple sur l'agriculture biologique montre qu'il est nécessaire d'intégrer tous les maillons de la chaîne d'approvisionnement, pour une dynamique d'adoption durable de l'agriculture biologique, et nous pouvons en tirer des enseignements pour l'adoption des cultures associées.

Le projet de recherche IntercropVALUES a récemment publié une note d'orientation politique pour proposer des actions à plusieurs niveaux de la **chaîne de valeur** afin de lever les barrières à l'adoption des mélanges d'espèces (Chevalier et al., 2024). Cette note souligne que les freins rencontrés aux différents niveaux de la chaîne de valeur sont interconnectés et que des actions doivent être menées conjointement, en impliquant tous les acteurs de la chaîne, pour diffuser les mélanges d'espèces. Sur les freins liés au tri, la note suggère par exemple de mettre en place des formations au tri à destination des agriculteurs et agricultrices, ou d'instaurer des réglementations sur les seuils de tolérance pour les impuretés dans les mélanges (en deçà d'un certain seuil d'impuretés, les collecteurs et transformateurs n'auraient pas le droit de refuser un produit issu d'une culture en mélange). De leur côté, Kiær et al. (2022) montrent l'importance d'impliquer les acteurs de la sélection variétale, de la multiplication et vente de semences, les agriculteurs et agricultrices, les organismes de collecte et de stockage, les entreprises agri-alimentaires, et les consommateurs et consommatrices pour la définition des traits d'espèces à considérer dans la conception des mélanges. Dans cette thèse, nous

avons étudié les dynamiques d'adoption des cultures associées, mais n'avons pas abordé de manière explicite les **dynamiques territoriales en œuvre**, qui peuvent par exemple concerner la présence (ou l'absence) de coopératives agricoles collectant des mélanges d'espèces, l'évolution des politiques publiques ou encore l'existence de politiques de financement ou subventions pour du matériel de tri. Ces éléments pourraient être intégrés dans de futures recherches, et semblent par ailleurs déjà considérés dans le projet de recherche IntercropVALUES (<https://intercropvalues.eu/#the-objectives>).

Enfin, dans cette thèse, nous n'avons pas étudié **l'intégration des cultures associées dans les successions de cultures** : dans quels types de successions les retrouve-t-on ? à quelles cultures pures se substituent-elles ? quel est leur délai de retour ? Ces aspects nous semblent complémentaires au travail présenté dans cette thèse, car si les mélanges d'espèces sont amenés à diffuser plus largement (augmentation des surfaces, diffusion vers des systèmes en grande culture conventionnelle), cela pourrait avoir des impacts sur l'équilibre des productions agricoles en France. Sophie Agostini, dans le cadre d'un stage de découverte de la recherche, avait commencé à analyser les données RPG en ce sens. Nous n'avons malheureusement pas eu le temps d'approfondir son travail, mais un travail de prospective sur le développement des cultures associées et leurs impacts sur l'équilibre des productions est prévu dans la suite du projet MoBiDiv. Celui-ci repartira des résultats de la thèse, et participera probablement à compléter les aspects d'intégration dans les successions de cultures.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette thèse avait pour objectif de répondre à la problématique suivante : **comment les cultures associées se positionnent-elles en termes de performances, et quels sont les principaux facteurs en jeu dans leurs dynamiques d'adoption à l'échelle des exploitations et des territoires ?**

A l'issue de cette thèse, nous avons montré des performances variables selon les types de cultures associées. Alors que les mélanges céréales-légumineuses permettent une réduction de 40 à 72% de l'utilisation de pesticides dans le réseau DEPHY, les mélanges variétaux de blé tendre ne permettent pas de réductions significatives de l'utilisation des pesticides en comparaison aux variétés pures cultivées dans les fermes du réseau. Cette pratique présente surtout l'avantage de simplifier les opérations culturales ; mais si cela constitue un objectif pour l'agriculteur ou l'agricultrice, elle peut également être un premier pas vers la diversification des cultures pour une gestion intégrée des bioagresseurs. Cela nécessite parfois un accompagnement spécifique, pour apprendre à reconnaître les signes de maladies et traiter – ou pas – en conséquence. Le choix des variétés et espèces composant les mélanges peut aussi être déterminant pour leurs performances, et ces choix s'affinent au cours du temps, en fonction des expériences des agriculteurs et agricultrices, et des références techniques auxquels ils et elles peuvent avoir accès.

Nous avons identifié une diversité de trajectoires d'adoption, mais nous retrouvons souvent les mêmes éléments clés : la conversion à l'agriculture biologique et/ou la présence d'animaux d'élevage avec une volonté d'autonomie alimentaire pour le troupeau. Les déterminants pour l'adoption des mélanges céréales-légumineuses sont ainsi liés aux usages et débouchés possibles. Toutefois, les agriculteurs et agricultrices parviennent à créer leurs propres débouchés lorsque ceux-ci manquent ou que les débouchés existants ne leur conviennent pas. De ce fait, les mélanges sont amenés à changer au cours du temps, selon les objectifs des agriculteurs et agricultrices, leurs opportunités, et leurs apprentissages.

Comme il existe de multiples barrières à l'adoption des cultures associées, et notamment des mélanges céréales-légumineuses, nous avons montré que la disponibilité des références, notamment techniques, est cruciale. Celles-ci sont efficacement diffusées par des échanges entre pairs et du travail collectif au niveau local. Ainsi, au sein de certains territoires, il peut exister des dynamiques d'adoption fortes, qui reflètent les modalités d'intégration des mélanges dans les exploitations agricoles. Ces dynamiques sont caractérisées par des phases d'essais plus ou moins longues, en commençant sur des surfaces plus ou moins importantes à

l'échelle de l'exploitation, pour ensuite ajuster en fonction des tests et des besoins (souvent définis en considérant le fonctionnement global de l'exploitation). Il existe cependant des cas dans lesquels après quelques années de tests, la pratique est arrêtée, ce qui pose question sur les barrières restantes, que nous n'avons peut-être pas identifiées.

En étudiant les trajectoires d'adoption des mélanges céréales-légumineuses, nous pensons avoir complété des manques sur les phases de transitions dans les changements de pratiques, mais nous estimons qu'il est aussi nécessaire de s'intéresser aux phases de transitions « non réussies », identifiées dans la thèse à travers des dynamiques de type *Essais*. Les dynamiques d'intégration des mélanges dans les exploitations pourraient être enrichies d'une étude portant sur la place des mélanges dans les successions culturales, notamment pour identifier les potentiels impacts d'une généralisation des mélanges sur l'équilibre des productions agricoles. Enfin, cette généralisation, ou du moins une diffusion plus large des mélanges – au-delà des systèmes de grandes cultures biologiques et d'élevage – ne semble possible qu'en intégrant l'ensemble des maillons de la chaîne de valeur pour lever conjointement les barrières à leur adoption, au niveau des agriculteurs et agricultrices, mais aussi des acteurs de la collecte, de la transformation et de la distribution.

RÉFÉRENCES

- Agence Bio. (2024, juin). *Les chiffres du BIO Panorama 2023*.
- Agence de Services et de Paiement. (s. d.). *Système de suivi des surfaces agricoles en temps réel— Agence de services...*. Consulté 7 septembre 2024, à l'adresse <https://www.asp-public.fr/missions-et-expertise/missions/pac-2023-2027/systeme-de-suivi-des-surfaces-agricoles-en-temps-reel>
- Agreste. (2017). *Enquête pratiques culturales en grandes cultures et prairies 2017—Principaux résultats (Version modifiée)|Agreste, la statistique agricole*. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2009/detail/>
- Agreste. (2020a). *Cultures développées (hors fourrage, prairies, fruits, fleurs et vigne)*. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-saiku/?plugin=true&query=query/open/SAANR_DEVELOPPE_2#query/open/SAANR_DEVELOPPE_2
- Agreste. (2020b). *Statistique agricole annuelle 2020—Chiffres provisoires|Agreste, la statistique agricole*. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2107/detail/>
- Agreste. (2024). *Enquête Pratiques culturales en grandes cultures 2021—IFT et nombre de traitements|Agreste, la statistique agricole*. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2407/detail/>
- Agrodistribution. (2023, juin 13). *Vaesken avance sur les associations blé-pois*. Agrodistribution. <https://www.agrodistribution.fr/actualites-terrain/article/841064/vaesken-avance-sur-les-associations-ble-pois>
- Allaire, G., Fuzeau, V., & Therond, O. (2013). Crop Diversity and Ecologization of the Common Agricultural Policy. *INRA Sciences Sociales*. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.161077>
- Alletto, L., Vandewalle, A., & Debaeke, P. (2022). Crop diversification improves cropping system sustainability: An 8-year on-farm experiment in South-Western France. *Agricultural Systems*, 200, 103433. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103433>
- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1), 19-31. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00028-6)
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 869-890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- ANSES. (2023). *Le catalogue des produits phytopharmaceutiques et de leurs usages, des matières fertilisantes et des supports de culture autorisés en France*. <https://ephy.anses.fr/>
- Arvalis. (2019, juin 13). *Blé tendre - Mélanges de variétés : Des différences rarement significatives*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/melanges-de-varietes-des-differences-rarement-significatives>
- Arvalis. (2022a, mars 10). *Résultats d'enquête—La part des mélanges de variétés de blé tendre en hausse dans la sole française*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/ble-tendre-zoom-sur-la-composition-des-melanges-de-varietes-recoltes-en-2021>

- Arvalis. (2022b, juillet 13). *Céréales à paille - Répartition des variétés: Les résultats de l'enquête 2022 sont disponibles*. Arvalis. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/enquete-sur-la-repartition-des-varietes-les-resultats-2021-sont-disponibles>
- Arvalis. (2023, juillet). *Lettre d'information ARVALIS Sur la répartition des variétés de céréales à paille*. <https://www.arvalis.fr/file-download/download/public/213586ad/public/213586>
- Arvesta. (2023). *Une nouvelle culture aux avantages multiples*.
- Bailey-Elkin, W., Carkner, M., & Entz, M. H. (2022). Intercropping organic field peas with barley, oats, and mustard improves weed control but has variable effects on grain yield and net returns. *Canadian Journal of Plant Science*, 102(3), 515-528. <https://doi.org/10.1139/cjps-2021-0182>
- Barbier, C., Cerf, M., & Lusson, J.-M. (2015). Cours de vie d'agriculteurs allant vers l'économie en intrants: Les plaisirs associés aux changements de pratiques. *Activités*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.4000/activites.1081>
- Barbottin, A., Bouty, C., & Martin, P. (2018). Using the French LPIS database to highlight farm area dynamics: The case study of the Niort Plain. *Land Use Policy*, 73, 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.02.012>
- Barot, S., Allard, V., Cantarel, A., Enjalbert, J., Gauffreteau, A., Goldringer, I., Lata, J.-C., Le Roux, X., Niboyet, A., & Porcher, E. (2017). Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(2), 13. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0418-x>
- Baumgart-Getz, A., Prokopy, L. S., & Floress, K. (2012). Why farmers adopt best management practice in the United States: A meta-analysis of the adoption literature. *Journal of Environmental Management*, 96(1), 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.10.006>
- Bedoussac, L., Journet, E.-P., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E. S., Prieur, L., & Justes, E. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 911-935. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>
- Bedoussac, L., & Justes, E. (2010). Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat-winter pea intercrop. *Plant and Soil*, 330(1-2), 37-54. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0303-8>
- Bedoussac, L., Lisa, A., Elina, D., Salembier, C., & Jeuffroy, M.-H. (2021). *De la théorie à la mise en pratique des mélanges d'espèces* (p. 108p.). <https://doi.org/10.17180/b5f1-w556>
- Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., & Makowski, D. (2021). Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*, 27(19), 4697-4710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15747>
- Benoît, M., Rizzo, D., Marraccini, E., Moonen, A. C., Galli, M., Lardon, S., Rapey, H., Thenail, C., & Bonari, E. (2012). Landscape agronomy: A new field for addressing agricultural

- landscape dynamics. *Landscape Ecology*, 27(10), 1385-1394. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9802-8>
- Boiffin, J. (2004). Territoire: Agronomie, géographie, écologie, où en est-on ? Le point de vue d'un chercheur agronome. *Natures Sciences Sociétés*, 12(3), 307-309.
- Bonke, V., Michels, M., & Musshoff, O. (2021). Will Farmers Accept Lower Gross Margins for the Sustainable Cultivation Method of Mixed Cropping? First Insights from Germany. *Sustainability*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su13041631>
- Bonke, V., & Musshoff, O. (2020). Understanding German farmer's intention to adopt mixed cropping using the theory of planned behavior. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6), 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00653-0>
- Bonnet, C., Gaudio, N., Alletto, L., Raffaillac, D., Bergez, J.-E., Debaeke, P., Gavaland, A., Willaume, M., Bedoussac, L., & Justes, E. (2021). Design and multicriteria assessment of low-input cropping systems based on plant diversification in southwestern France. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 65. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00719-7>
- Borg, J., Kiær, L. P., Lecarpentier, C., Goldringer, I., Gauffreteau, A., Saint-Jean, S., Barot, S., & Enjalbert, J. (2018). Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures: A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps. *Field Crops Research*, 221, 298-313. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.006>
- Boudreau, M. A. (2013). Diseases in Intercropping Systems. *Annual Review of Phytopathology*, 51(1), 499-519. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102246>
- Bousseau, D. (2009). *Associations céréales-légumineuses et mélanges de variétés de blé tendre: Point de vue agronomique et pratique d'une coopérative*.
- Bousselin, X. (2022). *Winter oilseed rape-service plant mixture intercropping: Functioning and diagnosis of performance variability in the Swiss context* [Phdthesis, Université d'Angers]. <https://theses.hal.science/tel-04368875>
- Bouty, C. (2015). *Liens entre évolutions des parcelles d'exploitation et évolutions des systèmes de culture: Analyse à l'échelle d'un petit territoire agricole (plaine Sud de Niort)*.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). *Classification and Regression Trees*. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>
- Breitenmoser, S., Steinger, T., Hiltbold, I., Grosjean, Y., Nussbaum, V., Bussereau, F., Klötzli, F., Widmer, N., & Baux, A. (2020). *Effet des plantes associées au colza d'hiver sur les dégâts d'altises*. <https://doi.org/10.34776/AFS11-16>
- Brooker, R. W., Bennett, A. E., Cong, W., Daniell, T. J., George, T. S., Hallett, P. D., Hawes, C., Iannetta, P. P. M., Jones, H. G., Karley, A. J., Li, L., McKenzie, B. M., Pakeman, R. J., Paterson, E., Schöb, C., Shen, J., Squire, G., Watson, C. A., Zhang, C., ... White, P. J. (2015). Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 206(1), 107-117. <https://doi.org/10.1111/nph.13132>
- Brooker, R. W., Pakeman, R. J., Adam, E., Banfield-Zanin, J. A., Bertelsen, I., Bickler, C., Fog-Petersen, J., George, D., Newton, A. C., Rubiales, D., Tavoletti, S., Villegas-Fernández, Á.

- M., & Karley, A. J. (2024). Positive effects of intercrop yields in farms from across Europe depend on rainfall, crop composition, and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(4), 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00968-2>
- Bybee-Finley, K. A., & Ryan, M. R. (2018). Advancing Intercropping Research and Practices in Industrialized Agricultural Landscapes. *Agriculture*, 8(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/agriculture8060080>
- Cadoux, S., & Sauzet, G. (2016). *Colza associé à un couvert de légumineuses gélives* (Terres Inovia).
- Cadoux, S., Sauzet, G., Valantin-Morison, M., Pontet, C., Champolivier, L., Robert, C., Lieven, J., Flénet, F., Mangenot, O., Fauvin, P., & Landé, N. (2015). Intercropping frost-sensitive legume crops with winter oilseed rape reduces weed competition, insect damage, and improves nitrogen use efficiency. *OCL*, 22(3), Article 3. <https://doi.org/10.1051/ocl/2015014>
- Capillon, A. (1993). *Typologie des exploitations agricoles. Contribution à l'étude régionale des problèmes techniques* [Thèse de doctorat]. Ina-PG.
- Capillon, A., & Manichon, H. (1991). *Guide d'étude de l'exploitation agricole à l'usage des agronomes*. (2. ed.).
- Caron, P. (2005). À quels territoires s'intéressent les agronomes ? Le point de vue d'un géographe tropicaliste. *Natures Sciences Sociétés*, 13(2), 145-153.
- Carton, N., Naudin, C., Piva, G., & Corre-Hellou, G. (2020). Intercropping Winter Lupin and Triticale Increases Weed Suppression and Total Yield. *Agriculture*, 10(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080316>
- Casagrande, M., Alletto, L., Naudin, C., Lenoir, A., Siah, A., & Celette, F. (2017). Enhancing planned and associated biodiversity in French farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(6), 57. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0463-5>
- Castellazzi, M. S., Matthews, J., Angevin, F., Sausse, C., Wood, G. A., Burgess, P. J., Brown, I., Conrad, K. F., & Perry, J. N. (2010). Simulation scenarios of spatio-temporal arrangement of crops at the landscape scale. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1881-1889. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.04.006>
- Catalogna, M., Dubois, M., & Navarrete, M. (2018). Diversity of experimentation by farmers engaged in agroecology. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(5), 50. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0526-2>
- Catteau, M. (2023). La crise de l'agriculture biologique: Jusqu'où? *Paysans & société*, 401(5), 39-46. <https://doi.org/10.3917/pes.401.0039>
- CERESCO & Systra. (2020). *Réalisation d'une étude sur l'évaluation des coûts de la chaîne logistique céréalière française*.
- CERESCO & Terres Inovia. (2021). *Freins et leviers logistiques au développement de systèmes de culture diversifiés et riches en légumineuses* (p. 130). Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. <https://agriculture.gouv.fr/freins-et-leviers-logistiques-au-developpement-de-systemes-de-culture-diversifies-et-riches-en-0>

- Cerf, M., Omon, B., Chantre, E., Guillot, M., Le, M., Lamine, C., & Olry, P. (2010). *Vers des systèmes économes en intrants: Quelles trajectoires et quel accompagnement pour les producteurs*. 16.
- Chambre d'agriculture Haute-Vienne. (2024, août 26). CARPESO. <https://haute-vienne.chambre-agriculture.fr/environnement/carpeso/>
- Chambres d'agriculture France. (2024, mars 8). *French Chambers of Agriculture (EN)*. <https://chambres-agriculture.fr/chambres-dagriculture/nous-connaître/french-chambers-of-agriculture-en/>
- Chantre, E. (2011). *Apprentissages des agriculteurs vers la réduction d'intrants en grandes cultures: Cas de la Champagne Berrichonne de l'Indre dans les années 1985-2010*. [Phdthesis, AgroParisTech]. <https://theses.hal.science/tel-00675226>
- Chantre, E., & Cardona, A. (2014). Trajectories of French Field Crop Farmers Moving Toward Sustainable Farming Practices: Change, Learning, and Links with the Advisory Services. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38(5), 573-602. <https://doi.org/10.1080/21683565.2013.876483>
- Chantre, E., Cerf, M., & Le Bail, M. (2015). Transitional pathways towards input reduction on French field crop farms. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 13(1), 69-86. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.945316>
- Chen, C., Liaw, A., & Breiman, L. (2004). Using Random Forest to Learn Imbalanced Data. *University of California, Berkeley*, 110(24), 1-12.
- Chevalier, C., Leclère, M., Morelle, C., Baret, P., & Justes, E. (2024). *How to design « intercrops friendly » policies? Lessons from the analysis of the barriers to intercropping in Europe*. https://intercropvalues.eu/wp-content/uploads/2024/06/IntercropVALUES_Policy-brief-01.pdf
- Chopin, P., Blazy, J.-M., & Doré, T. (2015). A new method to assess farming system evolution at the landscape scale. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 325-337. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0250-5>
- CIVAM. (2020). *Accueil*. CIVAM. <https://www.civam.org/>
- Clouet, Y., Guilloneau, A., & Ruf, T. (1986). *Diagnostic du système agraire et des systèmes de production en Ségala Aveyronnais*.
- Compagnone, C. (2004). *Agriculture raisonnée et dynamique de changement en viticulture bourguignonne*.
- Compagnone, C., Hellec, F., Morlon, P., K., M., Munier-Jolain, N., & L, Q. (2008). Raisonnement des pratiques et des changements de pratiques en matière de désherbage: Regards agronomique et sociologique à partir d'enquêtes chez des agriculteurs. *Innovations Agronomiques*, 3, 89-105.
- Compagnone, C., Lamine, C., & Dupré, L. (2018). La production et la circulation des connaissances en agriculture interrogées par l'agro-écologie. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3917/rac.039.0111>
- Corre-Hellou, G., Bedoussac, L., Bousseau, D., Chaigne, G., Chataignier, C., Celette, F., Cohan, J.-P., Coutard, J.-P., Emile, J.-C., Floriot, M., Foissy, D., Guilbert, S., Hemptinne, J.-L., Le

- Breton, M., Lecompte, C., Marceau, C., Mazoué, F., Mérot, E., Métivier, T., ... Tauvel, O. (2013). *Associations céréale-légumineuses multi-services*.
- Corre-Hellou, G., Dibet, A., Hauggaard-Nielsen, H., Crozat, Y., Gooding, M., Ambus, P., Dahlmann, C., von Fragstein, P., Pristeri, A., Monti, M., & Jensen, E. S. (2011). The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. *Field Crops Research*, 122(3), 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.04.004>
- Coupery, B. (2023). *La culture des mélanges de variétés de blé en France, étude de l'adoption et de la mise en oeuvre d'une pratique économe en pesticides*.
- Cournut, S., Hostiou, N., & Mugnier, S. (2023, mai 22). *Analyse du travail dans les systèmes d'élevage diversifiés*. Séminaire inter-département ACT-AgroEcosystem Les systèmes agricoles diversifiés: état des lieux et perspectives de recherches, Toulouse.
- Couronné, R., Probst, P., & Boulesteix, A.-L. (2018). Random forest versus logistic regression: A large-scale benchmark experiment. *BMC Bioinformatics*, 19(1), 270. <https://doi.org/10.1186/s12859-018-2264-5>
- Cowden, R. J., Shah, A. N., Lehmann, L. M., Kiær, L. P., Henriksen, C. B., & Ghaley, B. B. (2020). Nitrogen Fertilizer Effects on Pea-Barley Intercrop Productivity Compared to Sole Crops in Denmark. *Sustainability*, 12(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/su12229335>
- Dabija, A., Codina, G., & Fradinho, P. (2017). Effect of yellow pea flour addition on wheat flour dough and bread quality. *Romanian Biotechnological Letters*, 22, 12888-12897.
- Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., & Milestad, R. (2010). Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), 545-555. <https://doi.org/10.1051/agro/2009053>
- Darnhofer, I., Gibbon, D., & Dedieu, B. (2012). Farming Systems Research: An approach to inquiry. In I. Darnhofer, D. Gibbon, & B. Dedieu (Éds.), *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic* (p. 3-31). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2_1
- David, P., Roemer, C., Anibaldi, R., & Rundle-Thiele, S. (2022). Factors enabling and preventing farming practice change: An evidence review. *Journal of Environmental Management*, 322, 115789. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115789>
- Debolini, M. (2021). *Land and farming system dynamics in a context of global changes: A focus on Mediterranean agro-systems* [Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches].
- Demeulenaere, E., & Bonneuil, C. (2010). Cultiver la biodiversité. Semences et identité paysanne. In H. B, M. N, M. P. P. F, & J. Rémy (Éds.), *Les mondes agricoles en politique. De la fin des paysans au retour de la question agricole* (p. 73-92). Presses de Sciences Po. <https://hal.science/hal-00528010>
- Dessart, F. J., Barreiro-Hurlé, J., & van Bavel, R. (2019). Behavioural factors affecting the adoption of sustainable farming practices: A policy-oriented review. *European Review of Agricultural Economics*, 46(3), 417-471. <https://doi.org/10.1093/erae/jbz019>

- Dewitte, S. (2021). *Vers une réduction de l'usage des produits phytosanitaires par le mélange de cultures : Étude nationale des mélanges mis en oeuvre par analyse de bases de données (RPG) et enquêtes de terrain.*
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., & TITTONELL, P. (2011). Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy*, 34(4), 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.006>
- Dubs, F., Enjalbert, J., Barot, S., Porcher, E., Allard, V., Pope, C., Gauffreteau, A., Niboyet, A., Pommier, T., Saint-Jean, S., Vidal, T., & Le Roux, X. (2023). Unfolding the link between multiple ecosystem services and bundles of functional traits to design multifunctional crop variety mixtures. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(6), 71. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00924-6>
- Duru, M., Fares, M., & Therond, O. (2014). A conceptual framework for thinking now (and organising tomorrow) the agroecological transition at the level of the territory. *Cahiers Agricultures*, 23(2), 84-95. <https://doi.org/10.1684/agr.2014.0691>
- Duru, M., Therond, O., & Fares, M. (2015). Designing agroecological transitions; A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1237-1257. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>
- Dury, J., Garcia, F., Reynaud, A., & Bergez, J.-E. (2013). Cropping-plan decision-making on irrigated crop farms: A spatio-temporal analysis. *European Journal of Agronomy*, 50, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.04.008>
- EcophytoPIC. (2024). *Qu'est-ce que le réseau DEPHY? | Ecophytopic.* <https://ecophytopic.fr/dephy/quest-ce-que-le-reseau-dephy>
- Emery, S. E., Anderson, P., Carlsson, G., Friberg, H., Larsson, M. C., Wallenhammar, A.-C., & Lundin, O. (2021). The Potential of Intercropping for Multifunctional Crop Protection in Oilseed Rape (*Brassica napus* L.). *Frontiers in Agronomy*, 3. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fagro.2021.782686>
- Enjalbert, J., Litrico, I., Fournier, E., Médiène, S., Gauffretau, A., Borg, J., HELLOU, G., Goldringer, I., Hanachi, M., Journet, E.-P., Justes, E., Morel, J.-B., Naudin, C., Sanguin, H., Morison, M., Verret, V., & Bedoussac, L. (2019). *Mélanges variétaux et mélanges plurispécifiques – atouts et contraintes.* 75, 49-71. <https://doi.org/10.15454/ak5jpd>
- FAO. (2015). *Objectifs de développement durable. Agriculture durable.* Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-post-2015/sustainable-agriculture/fr/>
- FAO. (2023). *FAOSTAT: Production / Crops and livestock products* [Jeu de données]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- FAO. (2024). *FAOSTAT: Fertilizers by Nutrient* [Jeu de données]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN>
- Fares, M., & Mamine, F. (2023). Relative Importance of Barriers and Levers to Intercropping Systems Adoption: A Comparison of Farms and Co-Operatives. *Sustainability*, 15(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su15086652>

- Fernández, A., García, S., Galar, M., Prati, R. C., Krawczyk, B., & Herrera, F. (2018). *Learning from Imbalanced Data Sets*. Springer Cham. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-98074-4>
- Finckh, M. R., Gacek, E. S., Goyeau, H., Lannou, C., Merz, U., Mundt, C. C., Munk, L., Nadziak, J., Newton, A. C., Vallavieille-Pope, C. de, & Wolfe, M. S. (2000). Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie*, *20*(7), 813-837. <https://doi.org/10.1051/agro:2000177>
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, *478*(7369), Article 7369. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Fonteyne, S., Castillo Caamal, J. B., Lopez-Ridaura, S., Van Loon, J., Espidio Balbuena, J., Osorio Alcalá, L., Martínez Hernández, F., Odjo, S., & Verhulst, N. (2023). Review of agronomic research on the milpa, the traditional polyculture system of Mesoamerica. *Frontiers in Agronomy*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1115490>
- Fouillet, E., Delière, L., Flori, A., Rapidel, B., & Merot, A. (2023). Diversity of pesticide use trajectories during agroecological transitions in vineyards: The case of the French DEPHY network. *Agricultural Systems*, *210*, 103725. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103725>
- Galioto, F., & Nino, P. (2023). Investigating the reasons behind the choice to promote crop diversification practices through the new CAP reform in Europe. *Land Use Policy*, *133*, 106861. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106861>
- Gardarin, A., Celette, F., Naudin, C., Piva, G., Valantin-Morison, M., Vrignon-Brenas, S., Verret, V., & Médiène, S. (2022). Intercropping with service crops provides multiple services in temperate arable systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *42*(3), 39. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00771-x>
- Gawinowski, M. (2023). *Importance des interactions plante-plante dans les mélanges de variétés de blé tendre: Étude de la compétition pour la lumière avec une approche interdisciplinaire entre expérimentation au champ et modélisation mécaniste* [Phdthesis, Université Paris Cité]. <https://theses.hal.science/tel-04522937>
- Gent, D. H., De Wolf, E., & Pethybridge, S. J. (2011). Perceptions of Risk, Risk Aversion, and Barriers to Adoption of Decision Support Systems and Integrated Pest Management: An Introduction. *Phytopathology*®, *101*(6), 640-643. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-10-0124>
- Ghaley, B. B., Hauggaard-Nielsen, H., Høgh-Jensen, H., & Jensen, E. S. (2005). Intercropping of Wheat and Pea as Influenced by Nitrogen Fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *73*(2), 201-212. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-2475-9>
- Goldenberg, J., Han, S., Lehmann, D. R., & Hong, J. W. (2009). The Role of Hubs in the Adoption Process. *Journal of Marketing*, *73*(2), 1-13. <https://doi.org/10.1509/jmkg.73.2.1>

- Goodman, L. A. (1961). Snowball Sampling. *The Annals of Mathematical Statistics*, 32(1), 148-170. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177705148>
- Gu, C., Bastiaans, L., Anten, N. P. R., Makowski, D., & van der Werf, W. (2021). Annual intercropping suppresses weeds: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 322, 107658. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107658>
- Guinet, M., Adeux, G., Cordeau, S., Courson, E., Nandillon, R., Zhang, Y., & Munier-Jolain, N. (2023). Fostering temporal crop diversification to reduce pesticide use. *Nature Communications*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43234-x>
- Ha, T. M., Manevska-Tasevska, G., Jäck, O., Weih, M., & Hansson, H. (2023). Farmers' intention towards intercropping adoption: The role of socioeconomic and behavioural drivers. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 21(1), 2270222. <https://doi.org/10.1080/14735903.2023.2270222>
- Ha, T. M., Manevska-Tasevska, G., Weih, M., & Hansson, H. (2024). Heterogeneity in farmers' stage of behavioural change in intercropping adoption: An application of the Transtheoretical Model. *Agricultural and Food Economics*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40100-024-00306-w>
- Harwood, J. (2024). The forgotten history of intercropping. *PLANTS, PEOPLE, PLANET*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1002/ppp3.10502>
- Haugaard-Nielsen, H., Ambus, P., & Jensen, E. S. (2001). Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea–barley intercropping. *Field Crops Research*, 70(2), 101-109. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00126-5)
- Haugaard-Nielsen, H., & Jensen, E. S. (2005). Facilitative root interactions in intercrops. *Plant and Soil*, 274(1/2), 237-250.
- Haugaard-Nielsen, H., Jørnsgaard, B., Kinane, J., & Jensen, E. S. (2008). Grain legume–cereal intercropping: The practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23(1), 3-12. <https://doi.org/10.1017/S1742170507002025>
- Himanen, S. J., Mäkinen, H., Rimhanen, K., & Savikko, R. (2016). Engaging Farmers in Climate Change Adaptation Planning: Assessing Intercropping as a Means to Support Farm Adaptive Capacity. *Agriculture*, 6(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/agriculture6030034>
- Husson, F., Josse, J., Le, S., & Mazet, J. (2024). *FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining* (Version 2.11) [Logiciel]. <https://cran.r-project.org/web/packages/FactoMineR/index.html>
- IGN. (2023). *Institut National de l'Information Géographique et Forestière—IGN. Base de Données*. <https://geoservices.ign.fr/telechargement>
- INSEE. (2016). *Définition—Terres labourables* | Insee. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1969>
- INSEE. (2020). *Définition—Superficie agricole utilisée / SAU / SAU* | Insee. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1003>

- Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Jouan, J., Le Cadre, E., Litrico, I., Malausa, T., Reboud, X., & Huyghe, C. (2022). Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1), 8. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00742-8>
- Jensen, E. S., Carlsson, G., & Hauggaard-Nielsen, H. (2020). Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x>
- Jolys, O., Dubuc, M., Ancelet, E., & Munier-Jolain, N. (2016). *Agrosyst: Guide de l'utilisateur. Décembre 2016, version 2.1.*
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). *factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses* (Version 1.0.7) [Logiciel]. <https://cran.r-project.org/web/packages/factoextra/index.html>
- Kaut, A. H. E. E., Mason, H. E., Navabi, A., O'donovan, J. T., & Spaner, D. (2009). Performance and stability of performance of spring wheat variety mixtures in organic and conventional management systems in western Canada. *The Journal of Agricultural Science*, 147(2), 141-153. <https://doi.org/10.1017/S0021859608008319>
- Kiær, L. P., Weedon, O. D., Bedoussac, L., Bickler, C., Finckh, M. R., Haug, B., Iannetta, P. P. M., Raaphorst-Travaille, G., Weih, M., & Karley, A. J. (2022). Supply Chain Perspectives on Breeding for Legume–Cereal Intercrops. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.844635>
- Kontturi, M., Laine, A., Niskanen, M., Hurme, T., Hyövelä, M., & Peltonen-Sainio, P. (2011). Pea–oat intercrops to sustain lodging resistance and yield formation in northern European conditions. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 61(7), 612-621. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.536780>
- Kressmann, G. (2022). Un marché bio en crise profonde. *Paysans & société*, 393(3), 34-40. <https://doi.org/10.3917/pes.393.0034>
- Kristoffersen, R., Jørgensen, L. N., Eriksen, L. B., Nielsen, G. C., & Kiær, L. P. (2020). Control of *Septoria tritici* blotch by winter wheat cultivar mixtures: Meta-analysis of 19 years of cultivar trials. *Field Crops Research*, 249, 107696. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107696>
- Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, 28, 1-26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
- Labarthe, P., Coleno, F., Fugerey-Scarbel, A., Hannachi, M., & Lemarié, S. (2018). *Freins et leviers socio-économiques à la diffusion des mélanges variétaux pour la production de blé: Une comparaison entre France et Danemark*. 32.
- Labreuche, J. (2012, juin 19). *Cultures intermédiaires - Mélanges d'espèces de couverts: Des synergies entre légumineuses et non-légumineuses*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/melanges-despeces-de-couvert-des-synergies-entre-legumineuses-et-non-legumineuses>

- Lamine, C. (2011). Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. *Journal of Rural Studies*, 27(2), 209-219. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2011.02.001>
- Lardon, S., Caron, P., & Benoît, M. (2012). De la géoagronomie à l'agronomie des territoires: Un parcours, des étapes clés et des prolongements. In *GÃ©oagronomie, paysage et projets de territoire: Sur les traces de Jean-Pierre Deffontaines / Lardon Sylvie (ed.)* (p. 21-42). Ed. Quae. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=566120
- Lazzaro, M., Costanzo, A., & Bàrberi, P. (2018). Single vs multiple agroecosystem services provided by common wheat cultivar mixtures: Weed suppression, grain yield and quality. *Field Crops Research*, 221, 277-297. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.10.006>
- Le Bail, M., & Le Gal, P.-Y. (2011). Analyse et conception des systèmes de production végétale à l'échelle des bassins d'approvisionnement agro-alimentaires. *Agronomie, Environnement et Sociétés*. <https://agritrop.cirad.fr/564199/>
- Lechenet, M., Makowski, D., Py, G., & Munier-Jolain, N. (2016). Profiling farming management strategies with contrasting pesticide use in France. *Agricultural Systems*, 149, 40-53. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.08.005>
- Lécole, P. (2013). Le verdissement de la PAC en débat: Un feu vert pour plus d'environnement? *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 3(2), 123-135.
- Leenhardt, S., Mamy, L., Pesce, S., Sanchez, W., Achard, A. L., Amichot, M., Artigas, J., Aviron, S., Barthélémy, C., Beaudouin, R., Bedos, C., Bérard, A., Berny, P., Bertrand, C., Bertrand, C., Betouille, S., Bureau-Point, È., Charles, S., Chaumot, A., ... Tournebize, J. (2022). *Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Synthèse de l'expertise scientifique collective* (p. 136 p.) [Report, INRAE; IFREMER Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer]. <https://doi.org/10.17180/gfjk-e861>
- Lemerle, D., Verbeek, B., & Coombes, N. (1995). Losses in grain yield of winter crops from *Lolium rigidum* competition depend on crop species, cultivar and season. *Weed Research*, 35(6), 503-509. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1995.tb01648.x>
- Lemken, D., Spiller, A., & von Meyer-Höfer, M. (2017). The Case of Legume-Cereal Crop Mixtures in Modern Agriculture and the Transtheoretical Model of Gradual Adoption. *Ecological Economics*, 137, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.02.021>
- Leoni, F., Lazzaro, M., Ruggeri, M., Carlesi, S., Meriggi, P., & Moonen, A. C. (2022). Relay intercropping can efficiently support weed management in cereal-based cropping systems when appropriate legume species are chosen. *AGRONOMY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT*, 42(4), 75. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00787-3>
- Levavasseur, F., Martin, P., Bouty, C., Barbottin, A., Bretagnolle, V., Théron, O., Scheurer, O., & Piskiewicz, N. (2016). RPG Explorer: A new tool to ease the analysis of agricultural landscape dynamics with the Land Parcel Identification System. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 541-552. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.015>
- Li, C., Kambombe, O., Chimimba, E. G., Fawcett, D., Brown, L. A., Yu, L., Gadedjisso-Tossou, A., & Dash, J. (2023). Limited environmental and yield benefits of intercropping practices in

- smallholder fields: Evidence from multi-source data. *Field Crops Research*, 299, 108974. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108974>
- Li, C., Stomph, T.-J., Makowski, D., Li, H., Zhang, C., Zhang, F., & van der Werf, W. (2023). The productive performance of intercropping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(2), e2201886120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2201886120>
- Lin, B. B. (2011). Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change. *BioScience*, 61(3), 183-193. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4>
- Lithourgidis, A., Dordas, C., Damalas, C., & Vlachostergios, D. (2011). Annual intercrops: An alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science*, 5, 396-410.
- Lithourgidis, A. S., Vlachostergios, D. N., Dordas, C. A., & Damalas, C. A. (2011). Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea–cereal intercropping systems. *European Journal of Agronomy*, 34(4), 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.007>
- Lopes, T., Hatt, S., Xu, Q., Chen, J., Liu, Y., & Francis, F. (2016). Wheat (*Triticum aestivum* L.)-based intercropping systems for biological pest control. *Pest Management Science*, 72(12), 2193-2202. <https://doi.org/10.1002/ps.4332>
- Lorin, M., Jeuffroy, M.-H., Butier, A., & Valantin-Morison, M. (2015). Undersowing winter oilseed rape with frost-sensitive legume living mulches to improve weed control. *European Journal of Agronomy*, 71, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.001>
- Lorin, M., Jeuffroy, M.-H., Butier, A., & Valantin-Morison, M. (2016). Undersowing winter oilseed rape with frost-sensitive legume living mulch: Consequences for cash crop nitrogen nutrition. *Field Crops Research*, 193, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.03.002>
- Lucas, V., Gasselin, P., & Van Der Ploeg, J. D. (2019). Local inter-farm cooperation: A hidden potential for the agroecological transition in northern agricultures. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 43(2), 145-179. <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1509168>
- Magrini, M.-B., Anton, M., Cholez, C., Corre-Hellou, G., Duc, G., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Pelzer, E., Voisin, A.-S., & Walrand, S. (2016). Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system. *Ecological Economics*, 126, 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.024>
- Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., Tourdonnet, S., & Valantin-Morison, M. (2009). Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 43-62. <https://doi.org/10.1051/agro:2007057>
- Mamine, F., & Farès, M. (2020). Barriers and Levers to Developing Wheat–Pea Intercropping in Europe: A Review. *Sustainability*, 12(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/su12176962>
- Mandrekar, J. N. (2010). Receiver Operating Characteristic Curve in Diagnostic Test Assessment. *Journal of Thoracic Oncology*, 5(9), 1315-1316. <https://doi.org/10.1097/JTO.0b013e3181ec173d>

- Mansion-Vaquié, A., Ferrer, A., Ramon-Portugal, F., Wezel, A., & Magro, A. (2020). Intercropping impacts the host location behaviour and population growth of aphids. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 168(1), 41-52. <https://doi.org/10.1111/eea.12848>
- Marsh, S. P., Pannell, D. J., & Lindner, R. K. (2000a). The impact of agricultural extension on adoption and diffusion of lupins as a new crop in Western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 40(4), 571. <https://doi.org/10.1071/EA99080>
- Marsh, S. P., Pannell, D. J., & Lindner, R. K. (2000b). The impact of agricultural extension on adoption and diffusion of lupins as a new crop in Western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 40(4), 571-583. <https://doi.org/10.1071/ea99080>
- Martin, G. (2024, août 26). *Reconciling short- and long-term goals in agrifood systems: What role for agricultural sciences?* 18th Congress of the European Society for Agronomy, Rennes, France.
- Martin, G., Magne, M.-A., & Cristobal, M. S. (2017). An Integrated Method to Analyze Farm Vulnerability to Climatic and Economic Variability According to Farm Configurations and Farmers' Adaptations. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01483>
- Matson, P. A., Parton, W. J., Power, A. G., & Swift, M. J. (1997). Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science*, 277(5325), 504-509. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.504>
- Mawois, M., Vidal, A., Revoyron, E., Casagrande, M., Jeuffroy, M.-H., & Le Bail, M. (2019). Transition to legume-based farming systems requires stable outlets, learning, and peer-networking. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0559-1>
- Mazoyer, M., & Roudart, L. (2002). *Histoire des agricultures du monde: Du néolithique à la crise contemporaine*. Éditions du Seuil.
- Mead, R., & Willey, R. W. (1980). The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping. *Experimental Agriculture*, 16(3), 217-228. <https://doi.org/10.1017/S0014479700010978>
- Meynard, J.-M., Cerf, M., Coquil, X., Durant, D., Le Bail, M., Lefèvre, A., Navarrete, M., Pernel, J., Périnelle, A., Perrin, B., Prost, L., Reau, R., Salembier, C., Scopel, E., Toffolini, Q., & Jeuffroy, M.-H. (2023). Unravelling the step-by-step process for farming system design to support agroecological transition. *European Journal of Agronomy*, 150, 126948. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126948>
- Meynard, J.-M., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.-B., Charlier, A., & Messéan, A. (2018). Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(5), 54. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1>
- Mignolet, C., Schott, C., & Benoît, M. (2007). Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. *Science of The Total Environment*, 375(1), 13-32. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.004>
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. (2015, septembre). *Le projet agro-écologique pour la France*.

- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. (2023, février). *PAC 2023-2027. Annexe 13. BCAE 7 La rotation des cultures.*
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. (2024a). *Stratégie Écophyto 2030.* Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. <https://agriculture.gouv.fr/strategie-ecophyto-2030>
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. (2024b, avril 25). *Le Parlement européen vient d'adopter les mesures de simplification de la PAC pour répondre à la crise agricole.* Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. <https://agriculture.gouv.fr/le-parlement-europeen-vient-dadopter-les-mesures-de-simplification-de-la-pac-pour-repondre-la-crise>
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. (2021, avril). *La Politique Agricole Commune 2015-2022. Annexe 4. La diversification des cultures.*
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. (2024). *Le dispositif CEPP.* https://alim.agriculture.gouv.fr/cepp/content/ap_dispositif
- Montazeaud, G., Flutre, T., Ballini, E., Morel, J.-B., David, J., Girodolle, J., Rocher, A., Ducasse, A., Violle, C., Fort, F., & Fréville, H. (2022). From cultivar mixtures to allelic mixtures: Opposite effects of allelic richness between genotypes and genotype richness in wheat. *New Phytologist*, 233(6), 2573-2584. <https://doi.org/10.1111/nph.17915>
- Morel, K., Revoyron, E., Cristobal, M. S., & Baret, P. V. (2020). Innovating within or outside dominant food systems? Different challenges for contrasting crop diversification strategies in Europe. *PLOS ONE*, 15(3), e0229910. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229910>
- Moulin, C.-H., Ingrand, S., Lasseur, J., Madelrieux, S., Napoleone, M., Pluvinage, J., & Thenard, V. (2008). *Comprendre et analyser les changements d'organisation et de conduite de l'élevage dans un ensemble d'exploitations: Propositions méthodologiques.* (Vol. 1). Editions Quae. <https://hal.science/hal-01195162>
- Mundt, C. C., Brophy, L. S., & Schmitt, M. S. (1995). Choosing crop cultivars and cultivar mixtures under low versus high disease pressure: A case study with wheat. *Crop Protection*, 14(6), 509-515. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(95\)00035-K](https://doi.org/10.1016/0261-2194(95)00035-K)
- Nandillon, R., Guinet, M., & Munier-Jolain, N. (2024). Crop management strategy redesign enables a reduction in reliance on pesticides: A diachronic approach based on a diversity of French commercial farms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 366, 108949. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108949>
- Naudin, C., Corre-Hellou, G., Pineau, S., Crozat, Y., & Jeuffroy, M.-H. (2010). The effect of various dynamics of N availability on winter pea-wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Research*, 119(1), 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.06.002>
- Navarrete, M., Dupré, L., & Lamine, C. (2015). Crop management, labour organization, and marketing: Three key issues for improving sustainability in organic vegetable farming. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 13(3), 257-274. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.959341>

- Nie, Z., McLean, T., Clough, A., Tocker, J., Christy, B., Harris, R., Riffkin, P., Clark, S., & McCaskill, M. (2016). Benefits, challenges and opportunities of integrated crop-livestock systems and their potential application in the high rainfall zone of southern Australia: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 235, 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.002>
- Ouattara, M. S. (2023). *Mélanger les espèces pour produire des services écosystémiques: Co-conception d'un prototype d'outil d'intégration et de partage des connaissances scientifiques et empiriques en mobilisant les concepts de l'écologie fonctionnelle* [Phdthesis, Université Paris-Saclay]. <https://pastel.hal.science/tel-04403477>
- Ouattara, M. S., Paut, R., Valantin-Morison, M., Verret, V., & Médiène, S. (2023). Hierarchical modeling highlights how ecosystem service provisioning by service crops intercropped with oilseed rape depends on their functional trait values. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 357, 108690. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108690>
- Peigné, J., Casagrande, M., Payet, V., David, C., Sans, F. X., Blanco-Moreno, J. M., Cooper, J., Gascoyne, K., Antichi, D., Bàrberi, P., Bigongiali, F., Surböck, A., Kranzler, A., Beeckman, A., Willekens, K., Luik, A., Matt, D., Grosse, M., Heß, J., ... Mäder, P. (2016). How organic farmers practice conservation agriculture in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 31(1), 72-85. <https://doi.org/10.1017/S1742170514000477>
- Pelzer, E., Bazot, M., Makowski, D., Corre-Hellou, G., Naudin, C., Al Rifai, M., Baranger, E., Bedoussac, L., Biarnès, V., Boucheny, P., Carrouée, B., Dorvillez, D., Foissy, D., Gaillard, B., Guichard, L., Mansard, M.-C., Omon, B., Prieur, L., Yvergniaux, M., ... Jeuffroy, M.-H. (2012). Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy*, 40, 39-53. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.01.010>
- Pelzer, E., Bedoussac, L., Hellou, G. C., Jeuffroy, M.-H., Métivier, T., & Naudin, C. (2014). Association de cultures annuelles combinant une légumineuse et une céréale: Retours d'expériences d'agriculteurs et analyse. *Innovations Agronomiques*, 40, 73.
- Pingault, N., Pleyber, É., Champeaux, C., Guichard, L., & Omon, B. (2009). *Produits phytosanitaires et protection intégrée des cultures: L'indicateur de fréquence de traitement*.
- Puliga, G. A., Arlotti, D., & Dauber, J. (2023). The effects of wheat-pea mixed intercropping on biocontrol potential of generalist predators in a long-term experimental trial. *Annals of Applied Biology*, 182(1), 37-47. <https://doi.org/10.1111/aab.12792>
- Quinlan, J. R. (1992). *C4.5: Programs for machine learning*. Morgan Kaufmann.
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [Logiciel]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Raseduzzaman, Md., & Jensen, E. S. (2017). Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 91, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.09.009>
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., & Habib, R. (2012). Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: A review.

- Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 273-303.
<https://doi.org/10.1007/s13593-011-0022-4>
- Reiss, E. R., & Drinkwater, L. E. (2018). Cultivar mixtures: A meta-analysis of the effect of intraspecific diversity on crop yield. *Ecological Applications*, 28(1), 62-77.
<https://doi.org/10.1002/eap.1629>
- Revoyron, E. (2022). *Des leviers pour accompagner les trajectoires de diversification des cultures dans les exploitations agricoles et les territoires. Cas de trois régions européennes* [These de doctorat, université Paris-Saclay]. <https://theses.fr/2022UPASB044>
- Revoyron, E., Le Bail, M., Meynard, J.-M., Gunnarsson, A., Seghetti, M., & Colombo, L. (2022). Diversity and drivers of crop diversification pathways of European farms. *Agricultural Systems*, 201, 103439. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103439>
- Rodriguez, C., Carlsson, G., Englund, J.-E., Flöhr, A., Pelzer, E., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D., & Jensen, E. S. (2020). Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 118, 126077. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126077>
- Rogers, E. M. (1962). *Diffusion of innovations* (3rd ed). Free Press; Collier Macmillan.
- Ronfort, C., Souchère, V., Martin, P., Sebillotte, C., Castellazzi, M. S., Barbottin, A., Meynard, J. M., & Laignel, B. (2011). Methodology for land use change scenario assessment for runoff impacts: A case study in a north-western European Loess belt region (Pays de Caux, France). *CATENA*, 86(1), 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.02.004>
- Rosa-Schleich, J., Loos, J., Mußhoff, O., & Tschardt, T. (2019). Ecological-economic trade-offs of Diversified Farming Systems – A review. *Ecological Economics*, 160, 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.03.002>
- Sagris, V., Wojda, P., Milenov, P., & Devos, W. (2013). The harmonised data model for assessing Land Parcel Identification Systems compliance with requirements of direct aid and agri-environmental schemes of the CAP. *Journal of Environmental Management*, 118, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.019>
- Salembier, C., Elverdin, J. H., & Meynard, J.-M. (2015). Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>
- Savoie-Zajc, L., Gras, A., Joly, M., Fontanille, J., Mucchielli, A., Paillé, P., Coulon, A., Marty, R., & Sauvageot, A. (2009). S: In *Dictionnaire des méthodes qualitatives en sciences humaines* (p. 226-278). Armand Colin. <https://doi.org/10.3917/arco.mucch.2009.02.0226>
- Schaller, N., Lazrak, E. G., Martin, P., Mari, J.-F., Aubry, C., & Benoît, M. (2012). Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. *Landscape Ecology*, 27(3), 433-446. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9691-2>
- Schott, C., Mignolet, C., & Meynard, J.-M. (2010). Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture: Évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 17(5), Article 5. <https://doi.org/10.1051/ocl.2010.0334>

- Sebillotte, M. (1974). Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cahiers ORSTOM. Série Biologie*, 24, 3-25.
- Sebillotte, M. (1990). Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In L. Combe & D. Picard, *Les systèmes de culture* (Inra).
- Sing, T., Sander, O., Beerenwinkel, N., & Lengauer, T. (2005). ROCr: Visualizing classifier performance in R. *Bioinformatics*, 21(20), 3940-3941. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bti623>
- Snyder, L. D., Gómez, M. I., & Power, A. G. (2020). Crop Varietal Mixtures as a Strategy to Support Insect Pest Control, Yield, Economic, and Nutritional Services. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00060>
- Swinton, S. M., Lupi, F., Robertson, G. P., & Hamilton, S. K. (2007). Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. *Ecological Economics*, 64(2), 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.09.020>
- Tang, Y., Qiu, Y., Li, Y., Xu, H., & Li, X.-F. (2024). Research on intercropping from 1995 to 2021: A worldwide bibliographic review. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06542-9>
- Thenail, C., & Baudry, J. (2004). Variation of farm spatial land use pattern according to the structure of the hedgerow network (bocage) landscape: A case study in northeast Brittany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(1), 53-72. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00199-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00199-3)
- Thenail, C., Moonen, A.-C., Lardon, S., Marraccini, E., & Rizzo, D. (2022). Landscape Agronomy: Lessons Learned and Challenges Ahead, from a European Perspective. In D. Rizzo, E. Marraccini, & S. Lardon (Éds.), *Landscape Agronomy: Advances and Challenges of a Territorial Approach to Agricultural Issues* (p. 271-294). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05263-7_10
- Therneau, T., Atkinson, B., port, B. R. (producer of the initial R., & maintainer 1999-2017). (2023). *rpart: Recursive Partitioning and Regression Trees* (Version 4.1.23) [Logiciel]. <https://cran.r-project.org/web/packages/rpart/index.html>
- Thomopoulos, R., Moulin, B., & Bedoussac, L. (2018). Supporting Decision for Environment-Friendly Practices in the Agri-Food Sector: When Argumentation and System Dynamics Simulation Complete Each Other. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 9, 1-21. <https://doi.org/10.4018/IJAEIS.2018070101>
- Tibi, A., Martinet, V., Vialatte, A., Alignier, A., Angeon, V., Bohan, D., Bougherara, D., Cordeau, S., Courtois, P., Deguine, J.-P., Enjalbert, J., Fabre, F., Fréville, H., Gâteau, R., Grimonprez, B., Gross, N., Hannachi, M., Launay, M., Lelievre, V., ... Thoyer, S. S. (2023). *Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles. Synthèse de l'expertise scientifique collective* (p. 86 p.) [Report]. INRAE. <https://doi.org/10.17180/awsn-rf06>
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>

- Timaeus, J., Ruigrok, T., Siegmeier, T., & Finckh, M. R. (2022). Adoption of Food Species Mixtures from Farmers' Perspectives in Germany: Managing Complexity and Harnessing Advantages. *Agriculture*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050697>
- Tooker, J. F., & Frank, S. D. (2012). Genotypically diverse cultivar mixtures for insect pest management and increased crop yields. *Journal of Applied Ecology*, 49(5), 974-985. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02173.x>
- Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D. T. (2021). Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>
- Uthes, S., Kelly, E., & König, H. J. (2020). Farm-level indicators for crop and landscape diversity derived from agricultural beneficiaries data. *Ecological Indicators*, 108, 105725. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105725>
- Verret, V., Gardarin, A., Makowski, D., Lorin, M., Cadoux, S., Butier, A., & Valantin-Morison, M. (2017). Assessment of the benefits of frost-sensitive companion plants in winter rapeseed. *European Journal of Agronomy*, 91, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.09.006>
- Verret, V., Pelzer, E., Bedoussac, L., & Jeuffroy, M.-H. (2020). Tracking on-farm innovative practices to support crop mixture design: The case of annual mixtures including a legume crop. *European Journal of Agronomy*, 115, 126018. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126018>
- Vialatte, A., Martinet, V., Tibi, A., Alignier, A., Angeon, V., Bedoussac, L., Bohan, D., Bougherara, D., Carpentier, A., Castagneyrol, B., Cordeau, S., Courtois, P., Deguine, J.-P., Doelher, M., Enjalbert, J., Fabre, F., Femenia, F., Fréville, H., Goulet, F., ... Thoyer, S. S. (2023). *Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles. Rapport scientifique de l'Expertise scientifique collective* (p. 954 p.) [Report]. INRAE. <https://doi.org/10.17180/q7wm-q442>
- Vidal, T., Gigot, C., Fraj, M. B., Leconte, M. M., Huber, L. L., & Saint-Jean, S. (2014). *Associer des variétés pour maîtriser les maladies et stabiliser la production*.
- Vidal, T., Lusley, P., Leconte, M., Vallavieille-Pope, C. de, Huber, L., & Saint-Jean, S. (2017). Cultivar architecture modulates spore dispersal by rain splash: A new perspective to reduce disease progression in cultivar mixtures. *PLOS ONE*, 12(11), e0187788. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187788>
- Weituschat, C. S., Pascucci, S., Materia, V. C., & Blasi, E. (2023). Understanding the role of value chain formation in the scaling of crop diversification. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(2), 25. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00866-z>
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., & Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>
- Wezel, A., Herren, B. G., Kerr, R. B., Barrios, E., Gonçalves, A. L. R., & Sinclair, F. (2020). Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to

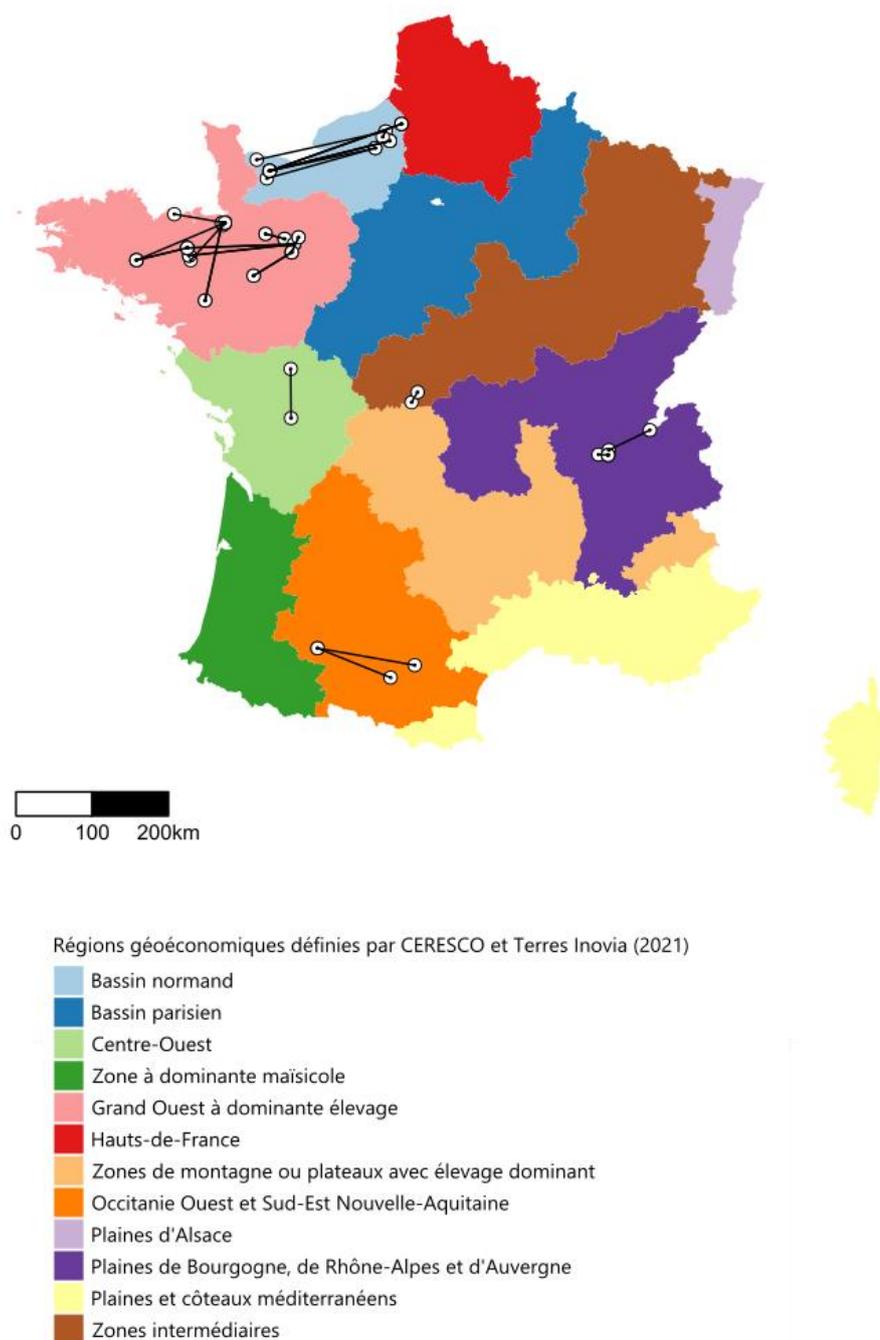
- sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6), 40. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z>
- WHO. (1990). *Public health impact of pesticides used in agriculture*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/39772>
- Willey, R. W. (1979). Intercropping: Its importance and research need. I. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstracts*, 32, 1-10.
- Wolff, S., Hüttel, S., Nendel, C., & Lakes, T. (2021). Agricultural Landscapes in Brandenburg, Germany: An Analysis of Characteristics and Spatial Patterns. *International Journal of Environmental Research*, 15(3), 487-507. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00328-y>
- Yan, E., Martin, P., & Carozzi, M. (2025). Main characteristics of French farms adopting cereal–legume intercropping: A quantitative exploration at the national and local levels. *Agricultural Systems*, 223, 104196. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2024.104196>
- Yan, E., Munier-Jolain, N., Martin, P., & Carozzi, M. (2024). Intercropping on French farms: Reducing pesticide and N fertiliser use while maintaining gross margins. *European Journal of Agronomy*, 152, 127036. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127036>
- Yu, Y., Stomph, T.-J., Makowski, D., Zhang, L., & Van Der Werf, W. (2016). A meta-analysis of relative crop yields in cereal/legume mixtures suggests options for management. *Field Crops Research*, 198, 269-279. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.001>
- Zhang, C., Dong, Y., Tang, L., Zheng, Y., Makowski, D., Yu, Y., Zhang, F., & van der Werf, W. (2019). Intercropping cereals with faba bean reduces plant disease incidence regardless of fertilizer input; a meta-analysis. *European Journal of Plant Pathology*, 154(4), 931-942. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01711-4>

ANNEXES

Annexe 1 : Variables utilisées pour caractériser les systèmes de cultures et pour calculer les distances euclidiennes dans les analyses du Chapitre 1 (Table S1, Yan et al., 2024).

Variable name	Description (from Lechenet et al., 2017)	Type
length_sequence	Length of the crop sequence (years)	Quantitative
prop_StrawCer	Proportion of straw cereals in the crop sequence (e.g. wheat, barley)	Quantitative
prop_Rapeseed	Proportion of rapeseed in the crop sequence	Quantitative
prop_Grass	Proportion of grass in the crop sequence (e.g. dactyl, ryegrass)	Quantitative
prop_RootVeg	Proportion of root vegetables in the crop sequence (e.g. potato, sugar beet)	Quantitative
prop_GrainLeg	Proportion of grain legumes in the crop sequence (e.g. lentil, pea)	Quantitative
prop_FodderLeg	Proportion of fodder legumes in the crop sequence (e.g. alfalfa)	Quantitative
prop_MaizeSorghum	Proportion of maize and sorghum in the crop sequence	Quantitative
prop_Fiber	Proportion of fiber in the crop sequence (e.g. flax)	Quantitative
prop_Grassland	Proportion of grassland in the crop sequence, including permanent grassland	Quantitative
prop_Sunflower	Proportion of sunflower in the crop sequence	Quantitative
nb_StrawCer	Number of straw cereals in the crop sequence (e.g. wheat, barley)	Quantitative
nb_Rapeseed	Number of rapeseed in the crop sequence	Quantitative
nb_Grass	Number of grass in the crop sequence (e.g. dactyl, ryegrass)	Quantitative
nb_RootVeg	Number of root vegetables in the crop sequence (e.g. potato, sugar beet)	Quantitative
nb_GrainLeg	Number of grain legumes in the crop sequence (e.g. lentil, pea)	Quantitative
nb_FodderLeg	Number of fodder legumes in the crop sequence (e.g. alfalfa)	Quantitative
nb_MaizeSorghum	Number of maize and sorghum in the crop sequence	Quantitative
nb_Fiber	Number of fiber in the crop sequence (e.g. flax)	Quantitative
nb_Grassland	Number of grassland in the crop sequence, including permanent grassland	Quantitative
nb_Sunflower	Number of sunflower in the crop sequence	Quantitative
prop_IntermCrop	Frequency of intermediate crop	Quantitative
prop_sowing1	Proportion of crops sown between 01/08 and 15/09	Quantitative
prop_sowing2	Proportion of crops sown between 15/09 and 01/11	Quantitative
prop_sowing3	Proportion of crops sown between 01/11 and 01/02	Quantitative
prop_sowing4	Proportion of crops sown between 01/02 and 01/04	Quantitative
prop_sowing5	Proportion of crops sown between 01/04 and 01/08	Quantitative
nb_sowing_periods	Number of sowing periods in the crop sequence	Quantitative
nb_tillage_mean_year	Mean annual number of tillage	Quantitative
freq_SurfTill	Frequency of surface tillage (e.g. hoeing, harrowing)	Quantitative
freq_Stubble	Frequency of stubble cultivation	Quantitative
freq_Loosening	Frequency of deep loosening	Quantitative
freq_Weeding	Frequency of mechanical weeding	Quantitative
freq_Ploughing	Frequency of ploughing	Quantitative
freq_SubSoiling	Frequency of subsoiling	Quantitative
irrig_mean_year_mm	Mean annual irrigation (mm/year)	Quantitative

Annexe 2 : Localisation des paires étudiées pour les mélanges variétaux de blé tendre, dans le sous-chapitre 1.1.



Annexe 3 : Description des variables et données utilisées dans les analyses du sous-chapitre 1.2 (Table S2, Yan et al., 2024)

Variable name	Description
SC_species	Sole crop (SC) species considered
IC_species	Species of the intercrop (IC) considered
TFI_AllPesticides_SC	Treatment Frequency Index (TFI) for all pesticides on the SC considered
TFI_Herbicides_SC	TFI for herbicides on the SC considered
TFI_Fungicides_SC	TFI for fungicides on the SC considered
TFI_Insecticides_SC	TFI for insecticides on the SC considered
TFI_SeedCoating_SC	TFI for seed coating on the SC considered
Nfert_kg_ha_SC	Amount of nitrogen fertiliser applied on the SC considered, in kg ha ⁻¹
GrossProduct_euros_ha_SC	Gross product of the SC considered, in euros ha ⁻¹
OperatingCosts_euros_ha_SC	Operating costs of the SC considered, in euros ha ⁻¹
GrossMargin_euros_ha_SC	Gross margin of the SC considered, in euros ha ⁻¹
TFI_AllPesticides_IC	TFI for all pesticides on the IC considered
TFI_Herbicides_IC	TFI for herbicides on the IC considered
TFI_Fungicides_IC	TFI for fungicides on the IC considered
TFI_Insecticides_IC	TFI for insecticides on the IC considered
TFI_SeedCoating_IC	TFI for seed coating on the IC considered
Nfert_kg_ha_IC	Amount of nitrogen fertiliser applied on the IC considered, in kg ha ⁻¹
GrossProduct_euros_ha_IC	Gross product of the IC considered, in euro ha ⁻¹
OperatingCosts_euros_ha_IC	Operating costs of the IC considered, in euros ha ⁻¹
GrossMargin_euros_ha_IC	Gross margin of the IC considered, in euros ha ⁻¹

SC_species	IC_species	TFI_AllPesticides_SC	TFI_Herbicides_SC	TFI_Fungicides_SC	TFI_Insecticides_SC	TFI_SeedCoating_SC	Nfert_kg_ha_SC	GrossProduct_euros_ha_SC	OperatingCosts_euros_ha_SC	GrossMargin_euros_ha_SC	TFI_AllPesticides_IC	TFI_Herbicides_IC	TFI_Fungicides_IC	TFI_Insecticides_IC	TFI_SeedCoating_IC	Nfert_kg_ha_IC	GrossProduct_euros_ha_IC	OperatingCosts_euros_ha_IC	GrossMargin_euros_ha_IC
Common wheat	Common wheat, Black oat, Pea	3.6	1.9	0.7	0	1	93.8	1069.04	609.02184	460.018	0	0	0	0	0	67	927.573	491.89333	435.68
Common wheat	Common wheat, Durum wheat, Triticale	6.351	2.068	2.2	1	1	223.65	1101.056	607.9904	493.066	4.13	1.08	2.05	0	1	133.15	1089.1328	317.08092	772.052
Common wheat	Common wheat, Durum wheat, Triticale	4.51	1.86	1.65	0	1	172.5	1101.056	397.10971	703.946	4.499	1.066	1.633	0.8	1	133.15	1388.3904	361.4199	1026.97
Common wheat	Common wheat, Durum wheat, Triticale	4.51	1.86	1.65	0	1	172.5	1101.056	397.10971	703.946	4.135	0.865	2.27	0	1	133.15	1043.28	215.21012	828.07
Common wheat	Common wheat, Barley, Black oat, Triticale, Common vetch, Rye	3.034	1.017	1.018	0	1	122.275	1198.4656	340.03803	858.428	1	0	0	1	0	73.7	770.4507	322.96731	447.483
Common wheat	Common wheat, Durum wheat	1.98	1.147	0.833	0	0	149.25	1349.824	282.64349	1067.181	5.247	2.335	1.19	0	1	179.75	911.7576	597.20747	314.55
Common wheat	Common wheat, Barley, Black oat	3.3	1	0.8	0.5	1	102	1547.7467	457.7152	1090.031	1.333	0.333	0	0	1	72	831.3796	387.57115	443.808
Common wheat	Common wheat, Black oat, Rye	3.3	1	0.8	0.5	1	102	1547.7467	457.7152	1090.031	1.6	1.6	0	0	0	48	979.0425	254.58291	724.46
Common wheat	Common wheat, Common vetch, Black oat, Pea, Triticale	2.246	1	0.916	0.33	0	49.5	1292.056	185.89338	1106.163	0	0	0	0	0	49.5	1540.8833	23.49569	1517.388
Common wheat	Common wheat, Barley, Black oat	2.585	1.165	0.42	0	1	125	1615.07	172.1834	1442.887	1.859	0.859	0	0	1	176.45	1178.422	469.03405	709.388
Common wheat	Common wheat, Pea	1	0	0	0	1	133	1860.0192	240.28566	1619.734	0	0	0	0	0	40.2	1441.404	167.12281	1274.281

Annexes

Common wheat	Common wheat, Pea	1	0	0	0	1	133	1860.0192	240.28566	1619.734	0	0	0	0	0	39.6	1229.2128	159.81433	1069.398
Common wheat	Common wheat, Pea	1	0	0	0	1	133	1860.0192	240.28566	1619.734	0	0	0	0	0	39.6	1257.9456	175.477	1082.469
Common wheat	Common wheat, Pea	1	0	0	0	1	133	1860.0192	240.28566	1619.734	0	0	0	0	0	45.1	1388.6208	175.89937	1212.721
Common wheat	Common wheat, Pea	1	0	0	0	1	133	1860.0192	240.28566	1619.734	0	0	0	0	0	39.6	1287.072	158.71661	1128.355
Common wheat	Common wheat, Pea	1	0	0	0	1	133	1860.0192	240.28566	1619.734	0	0	0	0	0	40.2	1388.8584	167.12281	1221.736
Barley	Barley, Pea	3.75	1.75	1	0	1	40.2	8.0224	75.55993	-67.538	3.458	1.578	0.88	0	1	122.95	974.556	246.3218	728.234
Barley	Barley, Pea	3.75	1.75	1	0	1	40.2	8.0224	75.55993	-67.538	1.88	0	0.88	0	1	76.6	989.9995	204.064	785.935
Barley	Barley, Durum wheat	2.467	0.867	0.6	0	1	105.52	665.9996	240.70521	425.294	3.542	1.792	0.75	0	1	136.8	968.484	298.343	670.141
Barley	Barley, Pea, Common vetch, Oat	4.729	1.625	1.491	0	1	145.36	1033.62	478.21512	555.405	1	0	0	0	1	50.25	1204.1875	215.2347	988.953
Barley	Barley, Pea	3.4	2	0.4	0	1	93.8	828	137.74722	690.253	3.542	1.542	1	0	1	90.77	683.9996	283.3843	400.615
Barley	Barley, Common wheat, Black oat, Triticale, Common vetch, Rye	3.061	0.917	1.145	0	1	122.275	971.9995	231.7696	740.23	1	0	0	1	0	73.7	770.4507	322.9673	447.483
Barley	Barley, Black oat, Pea, Triticale	5.86	1.56	2.3	0	1	99	1371.3	547.53944	823.761	1	0	0	0	1	66	760.1962	1006.0103	-245.814
Barley	Barley, Black oat, Common wheat	3.12	1.027	1.093	0	1	132	1130.404	226.29987	904.104	1.859	0.859	0	0	1	176.45	1178.422	469.034	709.388
Barley	Barley, Pea	5.229	2.429	1	0	1	150.75	1508.0629	542.0264	966.036	1	0	0	0	1	50.25	950.13	381.4896	568.64
Barley	Barley, Black oat, Common wheat	2	1	0	0	1	72	1233.168	238.45329	994.715	1.333	0.333	0	0	1	72	831.3796	387.5711	443.808
Barley	Barley, Pea	3.038	1.594	0.443	0	1	143.665	1447.1993	353.82494	1093.374	1.429	0.429	0	0	1	50.25	855.418	188.8593	666.559
Barley	Barley, Pea	4.225	2	0.425	0	1	150.35	1586.0174	380.42189	1205.596	0.8	0.8	0	0	0	50.25	907.904	340.3806	567.523
Pea	Pea, Common vetch,	5.933	0.933	3	0	1	0	0	591.478	-591.478	0	0	0	0	0	49.5	1540.8833	23.49569	1517.388

	Black oat, Triticale, Common wheat																			
Pea	Pea, Faba bean, Black oat, Triticale, Common vetch	4.442	1.442	1	1	1	0	0	317.9805	-317.98	0	0	0	0	0	44.72	751.1856	115.15029	636.035	
Pea	Pea, Triticale	5.233	1.972	1.281	1.98	0	0	591.759	850.5833	-258.824	1	0	0	0	1	36	937.5296	300.19235	637.337	
Pea	Pea, Common vetch, Triticale	2.188	1.188	0	0	1	0	0	257.4228	-257.423	1	0	0	0	1	112.86	382.836	1230.90617	-848.07	
Pea	Pea, Barley	2.578	0.778	0.8	0	1	0	584.1	605.5586	-21.459	1.88	0	0.88	0	1	76.6	989.9995	204.06397	785.935	
Pea	Pea, Triticale	3.587	0.444	1	1.143	1	0	911.4	800.4076	110.992	1	0	0	0	1	87.6	925.9056	466.91161	458.994	
Pea	Pea, Barley	3.411	0.778	0.8	0.833	1	0	1065	675.9322	389.068	3.542	1.542	1	0	1	90.77	683.9996	283.38428	400.615	
Pea	Pea, Oat, Triticale	2.864	0.214	1.65	1	0	0	923.1	173.6379	749.462	0	0	0	0	0	33	685.7748	27.27378	658.501	
Pea	Pea, Barley, Black oat, Triticale	3.479	0.314	1.429	0.536	1	0	1063.3	161.4574	901.843	1	0	0	0	1	66	760.1962	1006.01031	-245.814	
Pea	Pea, Common wheat	0	0	0	0	0	54	1365.792	193.4226	1172.369	0	0	0	0	0	39.6	1229.2128	159.81433	1069.398	
Pea	Pea, Common wheat	0	0	0	0	0	36	1430.08	182.8615	1247.219	0	0	0	0	0	39.6	1287.072	158.71661	1128.355	
Pea	Pea, Common wheat	0	0	0	0	0	36	1430.08	182.8615	1247.219	0	0	0	0	0	40.2	1441.404	167.12281	1274.281	
Pea	Pea, Common wheat	0	0	0	0	0	36	1430.08	182.8615	1247.219	0	0	0	0	0	39.6	1257.9456	175.477	1082.469	
Pea	Pea, Common wheat	0	0	0	0	0	36	1542.912	262.1783	1280.734	0	0	0	0	0	45.1	1388.6208	175.89937	1212.721	
Pea	Pea, Common wheat	0	0	0	0	0	36	1550	262.1783	1287.822	0	0	0	0	0	40.2	1388.8584	167.12281	1221.736	
Rapeseed	Rapeseed, Fenugree k, Pea, Faba bean, Lentil	4.947	1.48	1	2.467	0	168.945	34	456.775	-422.775	7.165	3.386	0	2.265	0	154.07	1247.552	419.7085	827.844	
Rapeseed	Rapeseed, Fenugree k, Berseem	0.02	0.013	0.003	0.005	0	157.2	603.8069	240.4229	363.384	6.74	3.686	0.8	2.254	0	162	3054.7714	425.1055	2629.666	

	clover, Faba bean, Lentil																		
Rapeseed	Rapeseed, Radish, Berseem clover, Oat, Common vetch, Phacelia	5.687	1.086	1.887	1.714	1	167.97	881.4696	472.118	409.352	3.177	1.317	0.86	0	1	184.25	1189.4997	542.0684	647.431
Rapeseed	Rapeseed, Faba bean, Buckwhea t	5.687	1.086	1.887	1.714	1	167.97	881.4696	472.118	409.352	3.232	1.5	0.96	0.772	0	196.17	782.9997	444.6306	338.369
Rapeseed	Rapeseed, Faba bean	3.635	1.835	0.8	0	1	120.15	972.72	442.4848	530.235	3.346	1.434	0.4	0.512	1	113.4	1087.5459	624.0991	463.447
Rapeseed	Rapeseed, Faba bean, Fenugree k, Berseem clover, Grass pea, Common vetch	3.818	1.018	0.8	1	1	121.45	1142.946	593.0266	549.919	3.618	3.069	0.549	0	0	142.11	943.4483	229.9661	713.482
Rapeseed	Rapeseed, Common vetch, Fenugree k, Berseem clover	6.052	2.786	0.8	2.467	0	179.4	966	405.14	560.86	7.37	3.844	0.82	2.707	0	169.65	2913.0695	594.115	2318.955
Rapeseed	Rapeseed, Radish, Berseem clover, Oat, Common vetch, Phacelia	6.052	2.786	0.8	2.467	0	179.4	966	405.14	560.86	6.738	2.191	1.56	1.987	1	147.4	1598.9996	757.2806	841.719
Rapeseed	Rapeseed, Fenugree k, Common vetch	7.938	1.108	1.497	4.333	1	217.755	1132.138	571.1816	560.956	4.05	2.25	0.8	0	1	163.8	1502.8195	355.1807	1147.639
Rapeseed	Rapeseed, Faba bean	7.938	1.108	1.497	4.333	1	217.755	1132.138	571.1816	560.956	4.05	2.25	0.8	0	1	163.8	1502.8195	354.4936	1148.326
Rapeseed	Rapeseed, White clover, Alfalfa, Berseem	4.271	2.76	0.844	0.667	0	160.015	1052.9997	478.4292	574.571	7.067	4.267	1	1.8	0	141.7	1169.9997	337.5408	832.459

	clover, Common vetch																		
Rapeseed	Rapeseed, White clover, Common vetch	4.271	2.76	0.844	0.667	0	160.015	1052.9997	478.4292	574.571	3.446	1.025	0.833	1.587	0	159.6	3445.0394	311.4612	3133.578
Rapeseed	Rapeseed, White clover, Common vetch	4.271	2.76	0.844	0.667	0	160.015	1052.9997	478.4292	574.571	7.782	2.845	1	3.294	0	154.14	2480.2111	339.2484	2140.963
Rapeseed	Rapeseed, White clover, Common vetch	4.271	2.76	0.844	0.667	0	160.015	1052.9997	478.4292	574.571	4.274	1.607	1	1.667	0	154.14	3018.4371	268.7079	2749.729
Rapeseed	Rapeseed, Faba bean	3.433	1.433	1	1	0	125.6	1158	510.1208	647.879	4.973	0.987	0	3.987	0	142.17	481.535	354.3728	127.162
Rapeseed	Rapeseed, White clover, Common vetch	6.3	1.5	2.8	2	0	128.2	1130.594	464.3877	666.206	6.268	1.25	1.725	3.293	0	159.6	1207.6139	475.1058	732.508
Rapeseed	Rapeseed, Fenugree k, Faba bean, Lentil, Sunflower	5.549	2.049	1	1.5	1	145.6	1142.946	445.1432	697.803	4.133	2	2.133	0	0	136.2	1220.1131	365.6363	854.477
Rapeseed	Rapeseed, Faba bean, Buckwhea t, Berseem clover, Trèfle incarnat, Lentil	7.274	2.407	0.66	1.995	1	246.195	1165.2278	432.4953	732.733	2.81	1.363	0.2	0.247	1	140.4	982.9336	330.6669	652.267
Rapeseed	Rapeseed, Berseem clover, Purple vetch	4.408	1.067	0.875	1.467	1	150.75	1207.6139	435.9404	771.674	1	0	0	0	1	33.5	3357.7364	576.857	2780.879
Rapeseed	Rapeseed, Radish, Berseem clover, Oat, Common vetch, Phacelia	6.042	1.701	2.667	1.674	0	160.8	1509.5173	610.7528	898.765	4.982	1.215	0.9	1.067	1	90.45	1509.5173	498.5398	1010.978
Rapeseed	Rapeseed, Lentil	9.683	2.35	1.211	5.693	0	126.09	1358.5656	367.1248	991.441	8.263	4.862	1.687	1	0	165.4	1094.4001	458.8243	635.576

Annexes

Rapeseed	Rapeseed, Fenugreek, Pea, Faba bean, Lentil	9.683	2.35	1.211	5.693	0	126.09	1358.5656	367.1248	991.441	7.165	3.386	0	2.265	0	154.07	1207.6139	419.299	788.315
Rapeseed	Rapeseed, Fenugreek, Common vetch	5.725	1.425	1	2.3	1	171	1671.1897	630.1209	1041.069	2.933	1.262	0.67	0	1	162.719	776.8185	509.4079	267.411
Rapeseed	Rapeseed, Faba bean	2.122	1.835	0.288	0	0	108.3	1358.5656	311.6434	1046.922	4.76	2.56	1.2	0	1	163.8	1433.3554	423.6008	1009.755
Rapeseed	Rapeseed, Faba bean	2.122	1.835	0.288	0	0	108.3	1358.5656	311.6434	1046.922	4.05	2.25	0.8	0	1	163.8	1481.7077	353.4945	1128.213
Rapeseed	Rapeseed, Faba bean	2.122	1.835	0.288	0	0	108.3	1358.5656	311.6434	1046.922	5.664	2.697	0.8	0.667	1	170.64	854.5004	467.0398	387.461
Rapeseed	Rapeseed, Fenugreek, Berseem clover	4.3	1.5	1	0	1	192	1440.3746	358.063	1082.312	4.588	1.888	1	0.85	0.85	189	1364.9996	500.0872	864.912
Rapeseed	Rapeseed, Berseem clover, Purple vetch	3.173	0.913	0.66	1	0	122.18	1656.4804	435.9293	1220.551	0	0	0	0	0	58.9	857.9998	256.5096	601.49
Rapeseed	Rapeseed, White clover	3.572	1.505	1.067	0	1	105.6	1602.672	342.7721	1259.9	4.542	0.775	0	2.467	1	99.25	1715.384	369.3547	1346.029
Rapeseed	Rapeseed, Fenugreek, Berseem clover, Faba bean, Lentil	6.376	3.048	0.453	0.96	1	0	1871.328	386.5337	1484.794	4.273	1.973	1.3	1	0	162	1359.4324	724.592	634.84
Rapeseed	Rapeseed, Faba bean, Pea	3.5	1.337	1.363	0.8	0	184.2	2218.728	521.1913	1697.537	3.027	2.027	0	0	0	163.8	1559.44	416.6375	1142.802

Annexe 4 : IFT du blé tendre, de l'orge, du pois et du colza dans le réseau DEPHY dans des fermes de grande culture et polyculture-élevage (Figure S1 ; Yan et al., 2024)

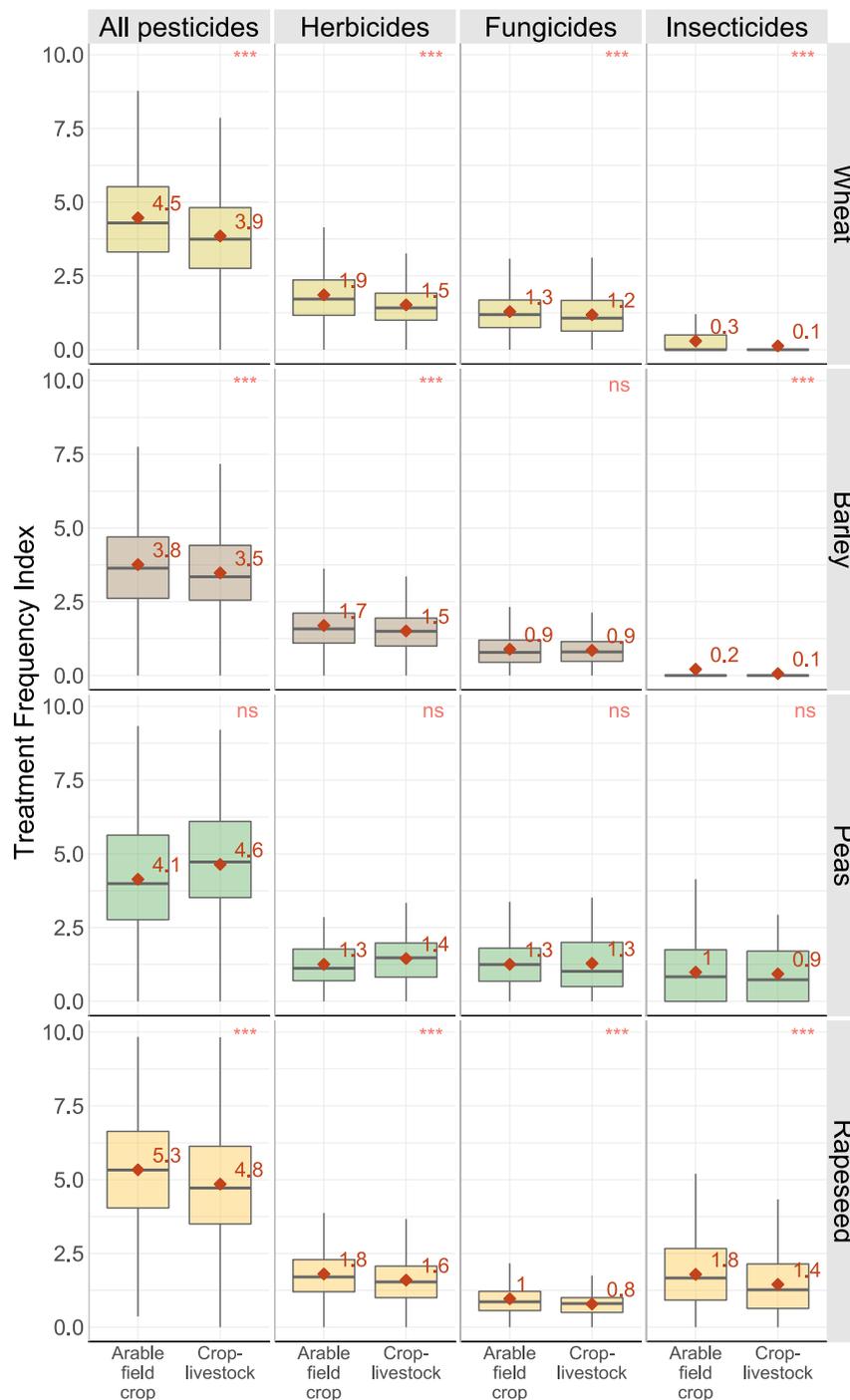


Figure S1: Treatment Frequency Index for wheat, barley, pea and rapeseed sole crops in arable field crop and crop-livestock mixed farms. The boxplots are based on the TFI values for each individual in each group. The significance codes (ns = $p > 0.05$; * = $p \leq 0.05$; ** = $p \leq 0.01$; *** = $p \leq 0.001$) apply to the paired t-test results. Red diamonds and numbers show the mean values.

Annexe 5 : Localisation des paires étudiées pour le blé tendre, l'orge, le pois et le colza dans le sous-chapitre 1.2 (Figure S2, Yan et al., 2024)

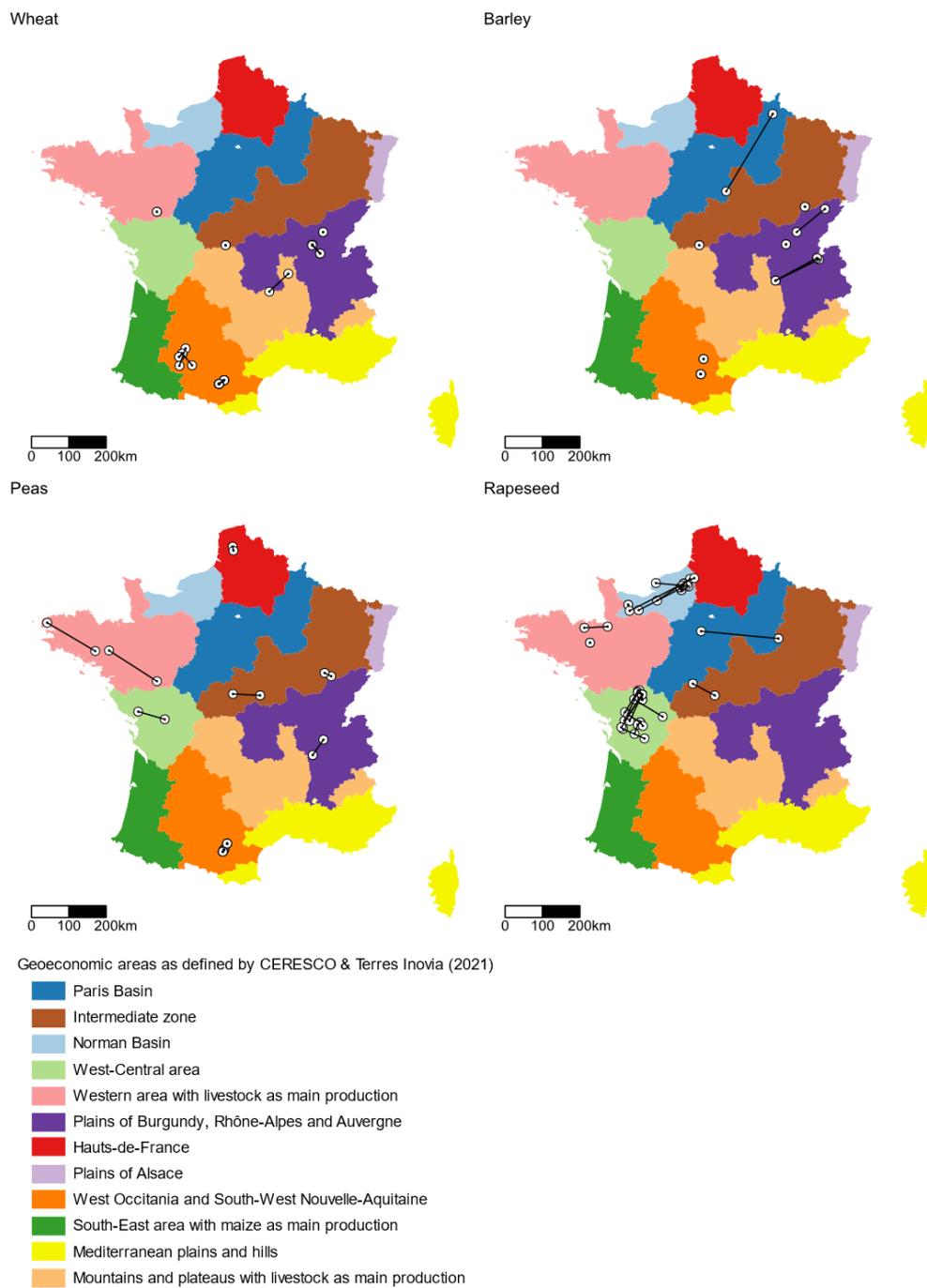
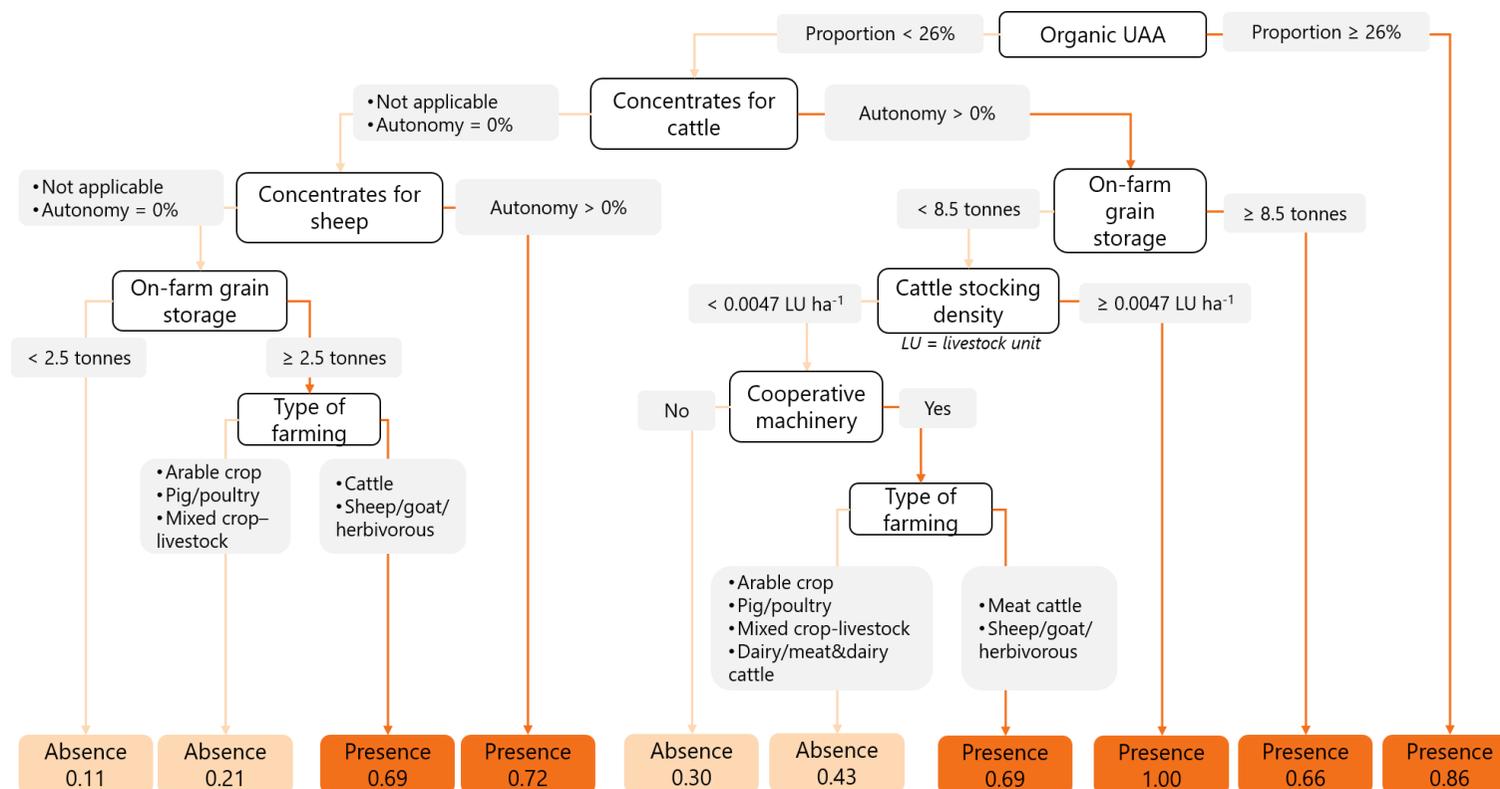


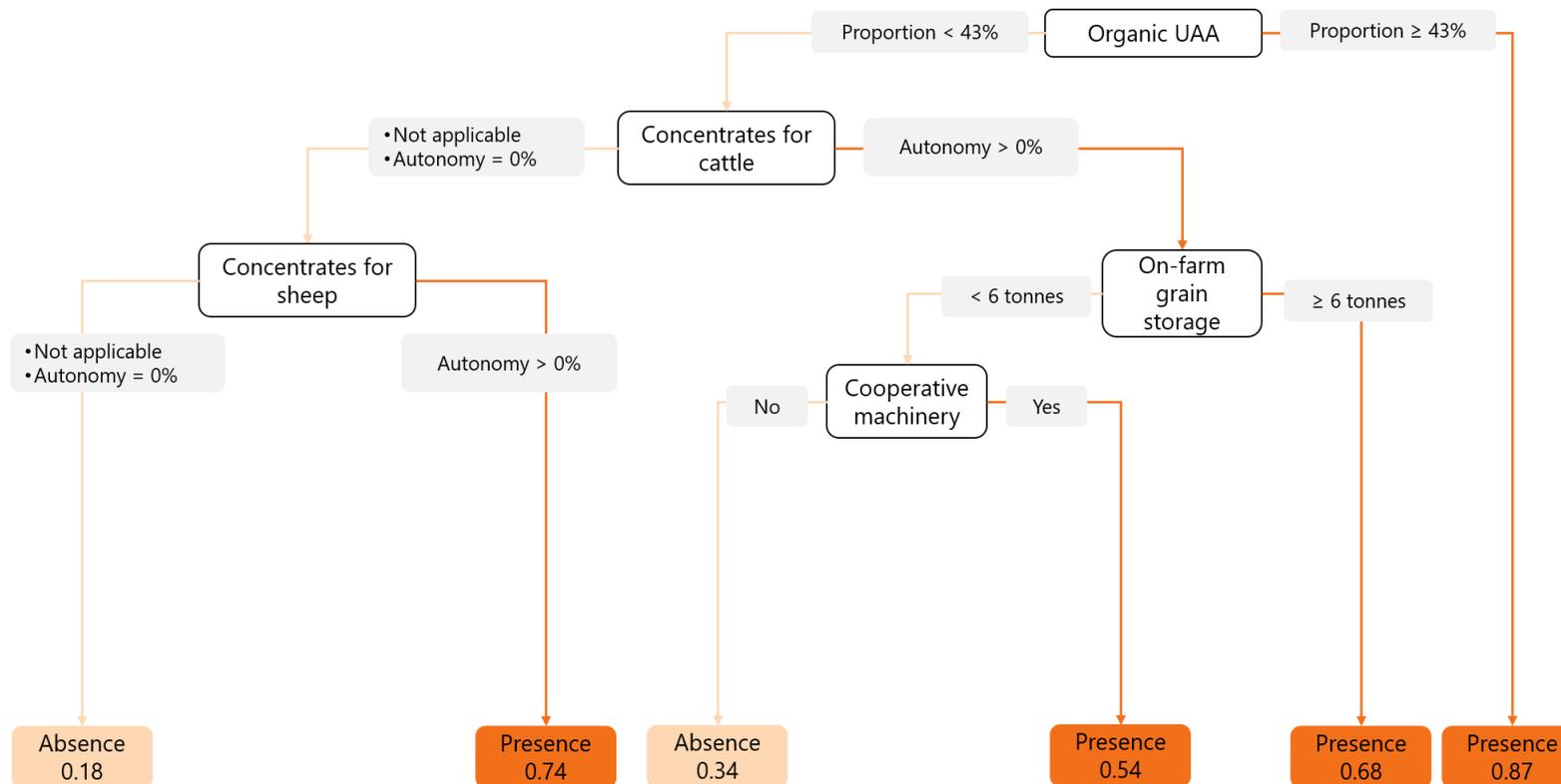
Figure S2: Location of the intercrop-sole crop pairs for wheat, barley, peas and rapeseed in the geoeconomic areas defined by CERESCO & Terres Inovia (2021)

Annexe 6 : Arbre de classification obtenu sur les données à l'échelle nationale après avoir ajouté du bruit sur deux variables aléatoirement choisie pour chaque observation répliquée (Supplementary material 1, Yan et al., 2025)



Supplementary material 1: Classification tree obtained with the CART algorithm applied at the national level after adding noise to two randomly selected variables per replicate. The numbers in the Absence and Presence boxes give the probability of one observation being classified as Presence following the path. UAA, useable agricultural area.

Annexe 7 : Arbre de classification obtenu sur les données à l'échelle nationale, en utilisant 36 variables sélectionnées suivant un algorithme de sélection récursive (Supplementary material 2, Yan et al., 2025)



Supplementary material 2: Classification tree obtained with the CART algorithm applied at the national level, with 36 variables selected using a recursive selection algorithm. The numbers in the Absence and Presence boxes give the probability of one observation being classified as Presence following the path. UAA, useable agricultural area.