



Analyse des changements de pratiques, de leurs trajectoires et des performances associées dans les systèmes viticoles du réseau DEPHY

Esther Fouillet

► To cite this version:

Esther Fouillet. Analyse des changements de pratiques, de leurs trajectoires et des performances associées dans les systèmes viticoles du réseau DEPHY. Sciences agricoles. Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, 2022. Français. <NNT : 2022AGRO0031>. <tel-04269158>

HAL Id: tel-04269158

<https://theses.hal.science/tel-04269158v1>

Submitted on 3 Nov 2023

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.



HAL Authorization

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'INSTITUT AGRO MONTPELLIER ET DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER

En Ecologie Fonctionnelle et Sciences Agronomique

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau

Portée par
Unité de recherche ABSys

Analyse des changements de pratiques, de leurs trajectoires et des performances associées dans les systèmes viticoles du réseau DEPHY

Présentée par Esther FOUILLET
Le 28 novembre 2022

Sous la direction de Anne Merot
Et Bruno Rapidel

Devant le jury composé de

Guillaume MARTIN	Directeur de recherche	INRAE	Rapporteur
Marie-Hélène JEUFFROY	Directrice de recherche	INRAE	Rapporteuse
Charles-Henri MOULIN	Enseignant-Chercheur	Institut Agro Montpellier	Président du jury
Ika DARNHOFER	Professeure	BOKU	Examinatrice
Christel RENAUD-GENTIE	Enseignante-Chercheuse	ESA	Examinatrice
Bruno RAPIDEL	Directeur de recherche	CIRAD	Directeur de thèse
Anne MEROT	Chargée de recherche	INRAE	Directrice de thèse
Laurent DELIERE	Ingénieur de recherche	INRAE	Invité



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



Wanderer, there is no path,

The path is made by walking

Antonio Machado, Campos de Castilla, XXIX

Avant propos

Cette thèse a été réalisée de Décembre 2019 à Novembre 2022 au sein de l'UMR ABSys au centre INRAE de Montpellier sous la direction de Bruno Rapidel (CIRAD, ABSys), et le co-encadrement de Anne Merot (INRAE, ABSys). Elle a été financée par l'Agence Française pour la Biodiversité, ainsi que par la région Occitanie. Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont fait l'objet des publications et communications scientifiques qui sont détaillées plus bas.

Remarques sur l'écriture du manuscrit :

Ce manuscrit de thèse est rédigé en écriture inclusive. Ce langage permet d'assurer une égalité des représentations entre les hommes et femmes à travers des attentions graphiques et syntaxiques. Pour mieux accompagner les lecteurs et lectrices, voici les règles qui régissent l'écriture inclusive :

- Le masculin ne l'emporte pas sur le féminin dans les accords de genre
- Les termes au féminin et au masculin sont mentionnés par ordre alphabétique
- Le point médiant « · » est utilisé pour représenter autant les formes féminines que masculines

Par exemple, l'expression 'les agriculteur·ices engagé·e·s dans le réseau DEPHY' remplace les 'agriculteurs engagés dans le réseau DEPHY'

- Les termes épïcènes, c'est-à-dire les mots dont la forme ne varie pas entre le masculin et le féminin, sont utilisés

Valorisation des travaux de thèse

Publication dans des revues à comité de lecture

Fouillet E., Delière, L., Chartier, N., Munier-Jolain, N., Cortel, S., Rapidel, B., and Merot, A. (2022). Reducing Pesticide Use in Vineyards. Evidence from the Analysis of the French DEPHY Network *European Journal of Agronomy*, 136. DOI : 10.1016/j.eja.2022.126503.

Fouillet E., Delière, L., Flori, A., Rapidel, B., and Merot, A. (*In revision*). Pesticide use trajectories during agroecological transitions in vineyards: The case of the French DEPHY network *Agricultural System*

Fouillet E., Rapidel, B., and Merot, A. (*In progress*). Analysis of technical trajectories associated to pesticide use reduction: Lessons from the French DEPHY Network. *Agronomy for Sustainable Development*

Fouillet E., Metay, A., Rigal, C., Smits, N., Rapidel, B., and Merot, A. (*In progress*). How do environmental and socio-economical performances covary during the pesticide use reduction process? *Journal of Cleaner Production*

Etienne, L., Rusch, A., Lavigne, C., **Fouillet E.**, Delière, L., Franck, P. (*In revision*). Less Field-Level Insecticides, But Not Fungicides, in Small Perennial Crop Fields and Landscapes with Woodlands and Organic Farming. *Agricultural System*

Article de vulgarisation scientifique :

Fouillet E., Delière, L., Chartier, N., Munier-Jolain, N., Cortel, S., Rapidel, B., and Merot, A. (2022). Vers des systèmes viticoles économes en pesticides. Etude du réseau DEPHY-Ferme *Revue des Œnologues*

Conférences avec actes :

Fouillet E., Delière, L., Chartier, N., Munier-Jolain, N., Cortel, S., Rapidel, B., and Merot, A. Reducing pesticide use in vineyards : Evidence from the analysis of the French DEPHY-Network. *Short paper accepted for oral presentation at the 14th European IFSA Symposium*, 28 March to 1 April 2022, Evora, Portugal

Fouillet E., Delière, L., Chartier, N., Munier-Jolain, N., Cortel, S., Rapidel, B., and Merot, A. Reducing pesticide use in vineyards : Evidence from the analysis of the French DEPHY-Network. *Short paper accepted for oral presentation at the Towards Pesticide Free Agriculture*, 2 and 3 June 2022, Dijon, France

Remerciements

Mes premiers mots s'adressent à Anne Merot que je remercie pour son encadrement, sa bienveillance et son soutien au cours de ces trois années. Je la remercie pour la qualité de son encadrement, sa présence, en particulier lors des moments de doute et de blocage toujours sous le signe de "Il n'y a pas de problèmes, que des solutions". J'espère continuer à parler de trajectoires, de conception (et de moutons !) avec toi dans les années à venir.

Mes remerciements vont ensuite à Bruno Rapidel pour m'avoir accompagné avec Anne Merot dans ce travail.

Merci aux membres de mon comité de suivi de thèse, Marie Thiollet Scholtus, Laure Hossard, Marianne Le Bail, Laurent Delière, Nicolas Munier-Jolin et Didier Bazile pour les échanges riches qui m'ont permis de progresser dans ce travail.

Un grand merci à Marie-Hélène Jeuffroy, Guillaume Martin, Ika Darnhofer, Christel Renaud-Genties et Charles-Henri Moulin d'avoir accepté d'être membres du jury de cette thèse.

Mon travail sur la base de données n'aurait pas été possible sans l'aide et les conseils des autres utilisateur·ice·s d'AGROSYST. Je remercie Laurent Delière, Sébastien Cortel, Nicolas Munier-Jolain, Nicolas Chartier pour l'aide qu'ils m'ont apportée dès le début de ma thèse pour la prise en main de la base de données. Les longs moments à travailler sur la base de données ont été ponctués par des séances de discussions (et de décompression) avec les doctorant·e·s du collectif ARPHY, Sarah Lecaulle, Emeric Courson et Lucas Etienne. Je tiens également à remercier vivement Margaux Guy pour le travail rigoureux qu'elle a fourni sur la base de données au cours de son stage de fin d'études.

Tout ce travail n'aurait pas été possible sans les viticulteur·ice·s, Ingénieur·e·s Réseau et Ingénieur·e·s Territoriaux et la Cellule d'Animation du réseau DEPHY. Je les remercie pour leur disponibilité et l'intérêt qu'ils et elles ont eu pour mon travail lors de nos différentes rencontres.

Merci aux chercheur·euse·s et technicien·ne·s de l'UMR ABSys pour leur accueil chaleureux. Merci aux gestionnaires Sandrine, Viviane, Estelle et Carole pour leur appui administratif. En particulier, je tiens à remercier Aurélie, Clémentine, Delphine, Karim et Léo pour l'engagement et la passion pour la recherche qu'ils et elles ont su me transmettre. Les échanges que nous avons eu tout au long de ma thèse ont su me porter et m'accompagner

tant sur le plan scientifique que personnel.

Un grand merci à tou·te·s les doctorant·e·s de l'UMR avec qui j'ai pu échanger : mes co-bureaux Guillaume, Audrey, Léa, Margot, Charlotte mais aussi Sylvain, Marie-Charlotte, Elsa, Lory, Marie-Thérèse, et les CDD Johanna, Oïhanna, Juliette. Spéciale dédicace à Léa et Sylvain, la team petites oreilles pour les soirées jeux, bières artisanales. Merci aux doctorant·e·s d'Innovation, Théo, Anaïs, Simon et Maryline pour les moments de dépaysements de l'autre côté du bâtiment 27.

Je remercie les doctorant·e·s rencontré·e·s lors des PhD courses de l'IFSA pour la bouffée d'air frais qu'ils-elles m'ont apporté·e·s avant le début de rédaction, et en particulier Marine qui a été une de mes plus belles rencontres en 2022.

Un grand merci à mes ami·e·s semé·e·s dans toute la France qui m'ont soutenue malgré la distance et mes réponses toujours (très) tardives à leurs messages : Cacou et Mathou pour les vocaux de 3h ; Nolwen, Martin, Augustin, Hélène ; Thibault pour les balades parisiennes ; Lou, Raphael et Marion ; Sarah et Elise pour les partages de livres, podcast et les séjours dans la montagne ; Maureen ; Roxy ; Marine ; Valentin et Kay pour les moments de pause remplis de douceur et de nature dans le Diois et les Cévennes.

Ces trois années montpellieraines ont été riches en rencontres et en rires, je tiens à remercier Louise, Ariane, Violette, Mimi, Léo, Judith, Coralie, Maxou, Elsa, Topi. Un grand merci à Alice, Lucie, Agathe, Manon et Marie pour les soirées Vins and Féminisme et les soirées powerpoint toujours remplies de rires et de blagues misandres. Merci à Marie Frifri pour les paillettes, la fête et l'envie de voyager.

Un grand merci à ma coloc de choc, Mélanie, pour les soirées ravioles, paillettes et chatons et le soutien qu'elle m'a apporté pendant ces derniers mois de thèse.

Merci à ma famille pour le soutien à distance, en particulier mes parents, ma soeur et mon frère.

Et enfin, merci à Léo pour tout le soutien, l'amour, l'humour et la patience qu'il m'a apporté tout au long de cette aventure.

Table des matières

Avant propos	i
Remerciements	iii
Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xvii
Liste des sigles et abréviations	xix
Introduction générale	1
I État de l’art et problématique de recherche	5
Chapitre 1 État de l’art et problématique de recherche	7
1 Concevoir des systèmes de production à bas niveau d’utilisation des pesticides	7
1.1 Cadre conceptuel de la conception: un processus dynamique	7
1.2 Les leviers de réduction de l’utilisation des pesticides en viticulture	10
1.3 L’implémentation des solutions conçues en situation réelle de production dans les systèmes viticoles	15
2 Etudier le processus dynamique des changements de pratiques	20
2.1 L’approche système pour appréhender les changements de pratiques au sein de l’exploitation agricole	20
2.2 Etude des transitions pour étudier les mécanismes de changements de pratiques	21
2.3 L’étude des trajectoires pour comprendre les processus de transition	22
3 Enjeux de la thèse	31
3.1 Les enjeux méthodologiques	32
3.2 Les enjeux cognitifs	33
3.3 Problématique de la thèse	34
4 Stratégie et démarche de la thèse	35

II Cas d'étude et démarche 39

Chapitre 2 Cas d'étude et démarche 41

1	Eléments de fonctionnement et de gestion des systèmes viticoles	41
1.1	Itinéraire technique	41
1.2	Hétérogénéité des pressions cryptogamiques et des ravageurs en France	43
2	Le réseau DEPHY-Ferme	45
3	Démarche d'analyse de la réduction des produits phytosanitaires à partir de la BDD Agrosyst	46
3.1	Présentation de la base de données AGROSYST	46
3.2	Echantillon d'étude pour ce travail de thèse	49
3.3	Différents indicateurs pour caractériser l'évolution de l'utilisation des pesticides et des performances : description et calcul à partir des données brutes de la BDD AGROSYST	50
3.4	Analyses statistiques réalisées sur les indicateurs issus de la base de données AGROSYST	55
4	Enquêtes auprès des viticulteur·ice·s du réseau DEPHY	57
4.1	Echantillonnage des exploitations enquêtées	57
4.2	Entretiens et données collectées	59
4.3	Analyse des données d'enquêtes	59
5	Récapitulatif des méthodes et de l'échantillonnage	61

III Résultats 65

Chapitre 3 Reducing Pesticide Use in Vineyards. Evidence from the Analysis of the French DEPHY Network 67

1	Introduction	69
2	Materials and Methods	74
2.1	DEPHY network and AGROSYST database	74
2.2	Indicator of pesticide use	76
2.3	Statistical analysis	78
3	Results	79
3.1	Pesticide use over time in the DEPHY-Network	79
3.2	TFI factors of variability	79
3.3	Exploring pesticide reduction levers	83
3.4	Yield evolution	86
4	Discussion	87

5	Conclusion	93
Chapitre 4 Pesticide use trajectories during agroecological transitions		
	in vineyards: The case of the French DEPHY network	95
1	Introduction	98
2	Materials and Methods	101
2.1	Vineyard system	101
2.2	DEPHY network and AGROSYST database	101
2.3	TFI calculation	102
2.4	Typology construction	104
2.5	Phytosanitary strategies	105
2.6	Statistical analysis and data processing	107
3	Results	108
3.1	Typology of pesticide use trajectory	108
3.2	Levers implemented within clusters	112
3.3	Change intensity	118
4	Discussion	122
5	Conclusion	126
Chapitre 5 How do environmental and socio–economical performances		
	covary during the pesticide use reduction process?	129
1	Introduction	132
2	Materials and Methods	134
2.1	DEPHY Network and AGROSYST Database	134
2.2	Knowledge gained previously on the DEPHY Network and potential covariations on performances	135
2.3	Individual analysis of the performances	136
2.4	Statistical analysis performed on performance variables	137
2.5	Co-variation analysis of the performance variables	138
3	Results	142
3.1	General trends	142
3.2	PLS-PM	144
4	Discussion	147
4.1	Impact of pesticide use reduction on productivity evolution	147
4.2	Impact of pesticide use reduction on mechanical work intensity and costs evolution	149
4.3	Impact of the pesticide use reduction on costs evolution	149
5	Conclusion	151

Chapitre 6a	Analysis of technical trajectories associated to pesticide use reduction: lessons from the French DEPHY Network	157
1	Introduction	159
2	Materials and methods	161
2.1	Case study	161
2.2	Data analysis	165
3	Results and discussion	169
3.1	Context of the surveyed farms	169
3.2	TFI dynamics per cluster	170
3.3	General trends of changes implemented	170
3.4	Dynamic of change	173
3.5	Linking trajectory of practices and trajectory of pesticide use . . .	177
3.6	Conclusion and Perspective	181
Chapitre 6b	Trajectoires de combinaisons techniques au cours du processus de réduction de l'utilisation de pesticides.	183
1	Introduction	183
2	Materiel et méthodes	184
2.1	Caractérisation des changements avec le cadre conceptuel ESR de Hill and MacRae (1996)	184
2.2	Mise en place d'un score ESR par année	185
2.3	Identification des phases de cohérence dans les trajectoires individuelles	185
2.4	Construction des types de combinaisons techniques en lien avec les phases de cohérence	186
2.5	Lien entre combinaison technique et IFT	186
3	Résultats	187
3.1	Description et caractérisation des trajectoires de combinaisons techniques	187
4	Discussion	197
IV	Discussion générale	203
Chapitre 7	Discussion générale	205
1	Apports cognitifs de la thèse sur les changements et dynamiques de changements des viticulteur·ice·s au cours du processus de réduction de l'utilisation de pesticides	206

1.1	Évolution générale de l'utilisation des pesticides au sein du réseau DEPHY	206
1.2	Les leviers mobilisés pour réduire l'utilisation des pesticides relèvent essentiellement de l'efficience et de la substitution	208
2	Apports et contraintes méthodologiques de la thèse	213
2.1	La base de données AGROSYST présente des avantages et des contraintes	213
2.2	Caractériser la dynamique de variables quantitatives et leurs co-variations	216
2.3	Caractérisation des dynamiques de pratiques	218
3	Perspectives opérationnelles – Apport de cette thèse pour l'accompagnement des transitions	219
3.1	Apport des connaissances produites pour alimenter le processus de conception	219
Conclusion et Perspectives		224
Références bibliographiques		227
Annexes		259
Annexe A	Supplementary material chapitre 2	263
Annexe B	Supplementary material chapter 3	271
Annexe C	Supplementary material chapter 4	287
Annexe D	Supplementary material chapter 6	295

Liste des figures

Figure 1.1	Les trois étapes de la conception définie par Prost (2019) et repris par Merot (2022)	8
Figure 1.2	Leviers de gestion des bioagresseurs situés dans l'espace et dans le temps, d'après Attoumani-Ronceux et al. (2011)	12
Figure 1.3	L'étude des changements par le concept des trajectoires	23
Figure 1.4	Les différentes composantes d'une trajectoire	24
Figure 1.5	Méthode d'analyse développée par Moulin et al. (2008) pour identifier les phases de cohérence dans la trajectoire d'évolution d'une exploitation agricole	26
Figure 1.6	Aperçu des variables calculées permettant d'évaluer la vulnérabilité des exploitations au cours du temps	27
Figure 1.7	Démarche générale de la thèse	36
Figure 2.1	Disparité des IFT moyen (hors biocontrôle) en fonction des bassins viticoles	45
Figure 2.2	Répartition des fermes DEPHY en 2019 en fonction de leur année d'entrée dans le réseau	47
Figure 2.3	Nombre de systèmes de culture présents dans la base de données	49
Figure 2.4	Lien entre les différents chapitres et analyses réalisées	62
Figure 3.1	Locations of the DEPHY network demonstration farms studied depending on the wine-growing region	75
Figure 3.2	Evolution of the treatment frequency index (TFI) over 10 years in the DEPHY network	80
Figure 3.3	Evolution of the Treatment Frequency Index (TFI) over the 10 years depending on the wine-growing region	82
Figure 3.4	Evolution of the partial TFI over the 10 years of the study	84
Figure 3.5	Evolution of biocontrol use within the DEPHY network over the 10 years of the study.	85
Figure 3.6	Evolution of fungicide use over the 10 years of the study.	87
Figure 3.7	Evolution of the yield over the 10 years of the study	88
Figure 4.1	Overview of the indicators calculated to set up the pesticide use trajectory typology inspired by the methodology from Martin et al. (2017)	105
Figure 4.2	Change in the TFI per cluster	109
Figure 4.3	Distribution of the calculated indicators per cluster	111
Figure 4.4	Change in the TFI by cluster and production mode.	119
Figure 4.5	Change in the pest control strategy per cluster	120

Figure 4.6	Summary of changes observed between the initial point and final point	121
Figure 5.1	Indicators used to characterize the dynamic of the selected performances	138
Figure 5.2	Evolution of pesticide use across the 10 years of the study	142
Figure 5.3	Evolution of the economic and working time performances over the ten years of the study	143
Figure 5.4	Evolution of the yield over the ten years of the study	144
Figure 5.5	The complete path model with latent variables (LV, grey ovals) and manifest variables (MV, rectangles)	146
Figure 6a.1	Repartition of the surveyed farms sampled according 3 criteria . .	164
Figure 6a.2	Mean number of changes per farm and per cluster over the 10 years studied	171
Figure 6a.3	Mean number of changes per farm and per cluster over the 10 years studied	172
Figure 6a.4	Mean evolution of implemented changes depending on the cluster of pesticides use trajectory	173
Figure 6a.5	Mean evolution of implemented changes depending on the cluster of pesticides use trajectory	175
Figure 6a.6	General trajectory of pesticide use and practices identified	179
Figure 6b.1	Distribution des combinaisons techniques en fonction des critères d'identification	190
Figure 6b.2	Trajectoire de combinaisons techniques et trajectoire ESR par exploitation	192
Figure 6b.3	Trajectoire combinaison technique moyen par cluster	195
Figure 6b.4	Gamme d'IFT en fonction des différentes combinaisons techniques	198
Figure 7.1	Les trois pôles de la conception définis par Prost (2019) et repris par Merot (2022)	219
Figure 7.2	Corrélations attendues entre intensité de changement selon de cadre ESR	222
Figure A.1	Itinéraire technique viticole d'une parcelle	264
Figure A.2	Schéma représentant la structure de la base de données AGROSYST	265
Figure A.3	Trame d'enquête	268
Figure A.4	Frise temporelle utilisée pour retracer les changements de pratiques	269
Figure B.1	Percentage of type of farming per year	275
Figure B.2	Evolution of TFI depending on the type of farming	277
Figure B.3	Evolution of the number of treatments over time	279
Figure B.4	Evolution of the number of fungicides treatment	281
Figure B.5	Evolution of the number of CMR product used per farming system	283
Figure B.6	Evolution of the TFI_i per treatments	284
Figure B.7	Evolution of the TFI_h per treatments	285
Figure C.1	Distribution of farm depending on the winegrowing region and the identified clusters	291
Figure C.2	Distribution of the farm depending on the DEPHY-group and the cluster	292

Figure C.3	Evolution of the TFI per cluster depending on the wine-growing region	293

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Leviers de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires . .	14
Tableau 2.1	Liste des différents IFTs calculés et utilisés pour suivre l'évolution de l'utilisation des pesticides au sein du réseau DEPHY	52
Tableau 2.2	Récapitulatif des variables utilisées en fonction de la base de don- nées dont elles sont issues	53
Tableau 4.1	Change in the technical levers between initial and final points . . .	114
Tableau 4.2	Change in the technical levers over time	116
Tableau 5.1	Description of the latent variables (LVs) and the associated mani- fest variables (MVs)	139
Tableau 5.2	Hypothesis used to construct the PLS-PM model	148
Tableau 6a.1	Example of levers identified and associated with the three criteria used "target", "compartment" and "mode of action"	168
Tableau 6a.2	Description of the context of the surveyed farms	169
Tableau 6b.1	Description des trajectoires de combinaisons techniques en fonction des différents clusters	193
Tableau A.1	Correspondance entre bassins viticoles DEPHY et bassins viticoles AGRESTE	267
Tableau B.1	Description of the variables used for the study	272
Tableau B.2	Results from the statistical tests (t-test and linear mixed model) for the TFI and yield evolution	273
Tableau B.3	Results from the statistical tests (t-test and linear mixed model) for the TFI and yield evolution	274
Tableau B.4	Coefficient of variation of the TFI_f over space and time	278
Tableau C.1	Description of the variables used for the study	288
Tableau C.2	Description of the variable used to characterized the three clusters	290
Tableau C.3	Distribution of calculated indicators for the 3 identified clusters . .	290
Tableau D.1	Levers identified in the interviews with related target and compart- ment (1)	296
Tableau D.2	Levers identified in the interviews with related target and compart- ment (2)	297
Tableau D.3	Levers identified in the interviews with related target and compart- ment (3)	297

Liste des sigles et abréviations

AB : Agriculture Biologique (OF en anglais)

ACP : Analyse des Composantes Principales (PCA en anglais)

AOP : Appellation d'Origine Protégée (PDO en anglais)

BDD : Base de données

CAN : Cellule d'Animation Nationale

CAH : Classification Ascendante Hierarchique (AHC en anglais)

CT : Combinaison Technique

DEPHY : Démonstration Expérimentation Production de références sur les systèmes économes en pHYtosanitaire

ESR : Efficiency, Substitution, Redesign

IFT : Indice de Fréquence de Traitement (TFI en anglais)

IGP : Indication Géographique Protégée (PGI en anglais)

INAO : Institut National de l'Origine et de la Qualité

IT : Ingénieur·e Territorial

IR : Ingénieur·e Réseau

NODU : NOmbre de Doses Unités (NUD en anglais)

OAD : Outil d'Aide à la Décision

PLS-PM : Partial Least Square Regression - Path Modelling

PNPP : Préparation Naturelle Peu Préoccupante

QSA : Quantité de substance active (QAI en anglais)

SAU : Surface Agricole Utile

SdC : Système de culture

UTH : Unité de Travail Humain

Introduction générale

Les préoccupations liées aux impacts négatifs de l'agriculture basée sur les produits phytosanitaires de synthèse sur l'environnement et la santé des populations se sont accrues depuis le milieu des années 1980 en France comme en Europe (Aubertot et al., 2005). La viticulture n'est pas épargnée par les débats autour de l'utilisation des produits phytosanitaires. La viticulture représente 20% des volumes totaux français de produits phytosanitaires pour une surface agricole utile de seulement 3.7% (Mézière et al., 2009; Aubertot et al., 2005). L'utilisation de produits phytosanitaires (cuivre, soufre et produits de synthèse) reste à ce jour le moyen de lutte le plus efficace pour garantir une vendange quantitative et qualitative (Pujol, 2017).

Les impacts négatifs de ces pratiques sur l'environnement ont été constatés et sont aujourd'hui bien documentés, par exemple les conséquences néfastes pour l'écologie des sols (Schreck et al., 2012) ou encore les effets nuisibles des pesticides sur les eaux profondes et de surface (Bony et al., 2008). Les produits phytosanitaires peuvent aussi affecter la physiologie de la vigne (Petit et al., 2008) et donc sa production (Jermini et al., 2010). Enfin des impacts sur la santé humaine sont également observés. Les viticulteur·ice·s sont directement exposés aux pesticides pendant la préparation et la pulvérisation des pesticides (Tsakirakis et al., 2014). La dérive des pesticides vers les habitations proches des vignobles fait l'objet de conflits de voisinage, car les impacts potentiels des pesticides sur la santé humaine constituent actuellement une préoccupation majeure dans les régions viticoles (Baldi et al., 2012, 2001; Raherison et al., 2019; Thierry and Yengue, 2018).

La mise en lumière des externalités négatives du modèle agricole dominant par la médiatisation suscite de la part des citoyen·ne·s et des consommateur·ice·s, dont les agriculteur·ice·s font aussi partie, le souhait d'un nouveau modèle de protection des plantes (Bourguet and Guillemaud, 2016). Les pratiques agricoles mises en place par les agriculteur·ice·s quittent la sphère privée et se retrouvent au centre des débats publics et des négociations (Aulagnier and Goulet, 2017; Meynard et al., 2012). Cela se traduit par une évolution des attentes des consommateur·ice·s et des demandes de la filière (Meynard, 2008) avec une augmentation de la sensibilité sur la qualité ou encore par une augmentation de la demande pour les produits issus de l'Agriculture Biologique. Il devient alors nécessaire pour les agriculteur·ice·s de changer leurs pratiques pour une agriculture plus durable. Parmi les nouveaux modèles agricoles, celui de l'**agroécologie** est mis en avant. La transition agroécologique est définie comme étant la transition d'un

modèle productiviste reposant sur l'utilisation d'intrants externes vers un modèle agricole reposant sur des processus écosystémiques notamment sur les régulations biologiques (Duru et al., 2015; Wezel et al., 2014).

Pour initier et stimuler une transition agroécologique, les politiques publiques ont mis en place des mesures institutionnelles, inscrivant ainsi la réduction des pesticides dans les agendas politiques. En France, par exemple, le **plan ECOPHYTO** est lancé en 2010 pour répondre aux objectifs du Grenelle de l'environnement qui définit ainsi des objectifs ambitieux de réduction de l'usage des pesticides de moitié sur 10 ans. Les objectifs portés par ces plans politiques impliquent la mutation des systèmes viticoles via des changements plus ou moins importants des pratiques agricoles. Un des moyens mis en œuvre en 2010 dans le cadre du plan ECOPHYTO pour changer les pratiques est le **réseau DEPHY** (Démonstration Expérimentation Production de références sur les systèmes économes en pHYtosanitaire). Les objectifs de ce réseau sont de produire des références sur les systèmes de culture économes en produits phytosanitaires, favoriser les transformations des systèmes de culture, démontrer, communiquer et servir de support de formation. Ce réseau a deux composantes : le réseau DEPHY-Ferme composé par des groupes d'agriculteur·ice·s engagé·e·s volontairement dans une réduction de l'utilisation des pesticides. Ces groupes concernent toutes les filières (grandes cultures, polyculture-élevage, arboriculture, viticulture...) ; et une partie expérimentale (DEPHY-Expe) qui se compose de stations expérimentales, d'établissements d'enseignement agricole.

Les enjeux instaurés par le plan ECOPHYTO sont ambitieux avec une nécessité pour les viticulteur·ice·s de **maintenir de bonnes performances économiques et agronomiques** au cours de cette réduction. Des études portant sur la faisabilité d'une réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires montrent qu'il est possible de réduire leur utilisation de 10% sans réduire le niveau de production (Jacquet et al., 2011). En grandes cultures, il a même été montré qu'une réduction de 30% pourrait impacter la production sans avoir d'effet sur les revenus des agriculteurs (Lechenet et al., 2017). A l'inverse, une diminution des produits phytosanitaires de 50% induirait de profonds changements au sein des systèmes de culture mais également sur l'ensemble de la filière avec des changements dans la nature des produits utilisés pouvant avoir comme conséquence une réduction forte de la production (Jacquet et al., 2011). La réduction des produits phytosanitaires s'ancre ainsi dans un processus complexe qui peut impacter les performances économiques, techniques et organisationnelles des exploitations.

Cependant, malgré les mesures mises en place par les différentes politiques, l'utilisation des pesticides de synthèse ne diminue pas, au contraire, les quantités nationales de produits phytosanitaires vendues augmentent (Hossard et al., 2017) et les agriculteur·ice·s peinent à réduire leur utilisation de produits phytosanitaires (Guichard et al., 2017). L'utilisation des pesticides de synthèse reste une pratique dominante suppléementée avec d'autres mesures (Deguine et al., 2021). **Il existe donc un enjeu fort à mieux connaître les mécanismes de changements permettant de réduire durablement l'utilisation des pesticides de synthèse tout en maintenant des performances agronomiques et économiques satisfaisantes au sein des systèmes viticoles.**

Cette thèse en agronomie propose d'étudier les mécanismes de changements de pratiques dans le temps et leurs impacts sur la dynamique des performances, en focalisant cette étude sur des viticulteur·ice·s engagé·e·s dans une démarche de réduction des pesticides, dans le but de mieux comprendre et accompagner la transition agroécologique

Ce manuscrit est composé de quatre parties. La première partie pose le cadre de la thèse en présentant les enjeux cognitifs et méthodologiques de ce travail. Une deuxième partie présente le cas d'étude et la démarche générale de la thèse. Une troisième partie regroupe les résultats. Elle est elle-même découpée en 4 sous-parties. La dernière partie propose une discussion des résultats obtenus avant de conclure.

PARTIE I

État de l'art et problématique de recherche

Chapitre 1

État de l’art et problématique de recherche

1 Concevoir des systèmes de production à bas niveau d’utilisation des pesticides

1.1 Cadre conceptuel de la conception: un processus dynamique

La prise de conscience sociétale et les mesures institutionnelles incitent les agriculteur·ice·s à adopter de nouvelles pratiques plus durables via l’optimisation de l’utilisation des produits phytosanitaires mais également via **la reconception de leur système de production en intégrant de nouvelles pratiques** (Barbier and Elzen, 2012; Jeuffroy et al., 2022). Les changements que doivent mettre en œuvre les agriculteur·ice·s pour répondre aux demandes appellent à de nouvelles façons de concevoir (Toffolini et al., 2017a; Prost et al., 2017a; Meynard et al., 2006).

Une définition de l’activité de conception

L’activité de conception s’articule autour de trois grands axes : la **formalisation de la problématique de conception**, la **formalisation des solutions de conceptions** et la **confrontation entre la problématique de conception et les solutions de conception identifiées** (Figure 1.1, Merot (2022); Toffolini et al. (2017a); Prost (2019)).

1. La formalisation de la problématique de conception correspond à la formulation du système visé et du diagnostic de la situation actuelle.
2. La formalisation des solutions de conception consiste à générer et explorer des solutions de conception. Les solutions sont conçues à différentes échelles (Belmin

et al., 2022) allant des techniques ou itinéraire technique (Navarrete et al., 2016) à des échelles plus complexes comme des systèmes de culture (Bergez et al., 2010; Deliere et al., 2013), systèmes de production (Teixeira et al., 2018) ou encore à l'échelle des agroécosystèmes (Berthet, 2014; Van Berkel and Verburg, 2012).

3. La confrontation entre la problématique de conception et les solutions de conception identifiées. Cette étape correspond à l'implémentation et l'évaluation des solutions conçues en situation de production. L'implémentation des solutions de conception est définie comme étant un processus dynamique (Prost, 2019) au cours duquel l'agriculteur·ice expérimente (Deffontaines et al., 2020; Toffolini et al., 2017b). Prost et al. (2018) soulèvent le manque de connaissances scientifiques existant autour des processus d'implémentation des agriculteur·ice·s.

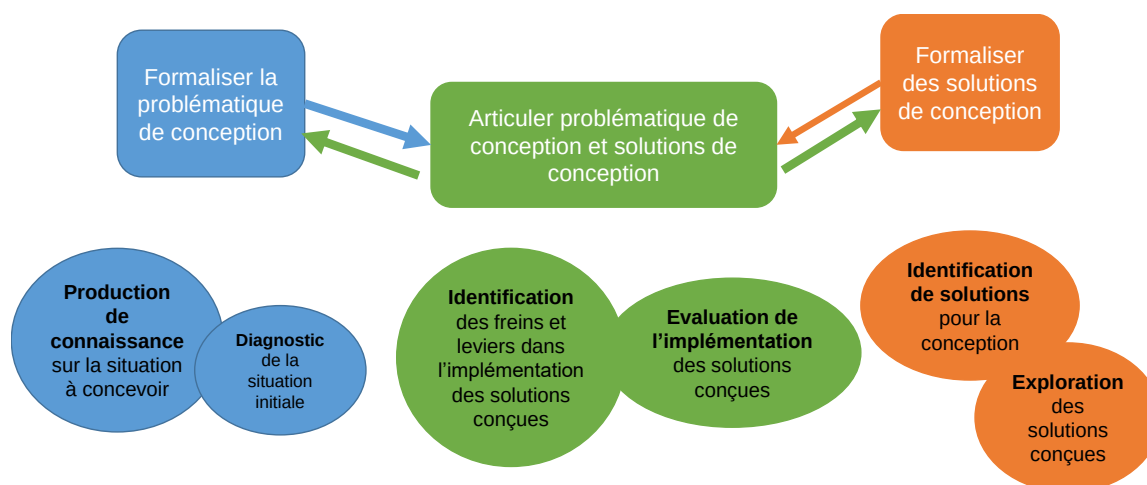


Figure 1.1 Les trois étapes de la conception définie par Prost (2019) et reprise par Merot (2022)

Les trois pôles de l'activité de conception définis par Prost (2019) peuvent être appliqués au contexte de réduction des pesticides. Pour le premier pôle « la formalisation de la problématique de conception », l'objectif de conception correspond à la transition des systèmes de culture dépendant des pesticides vers des systèmes de culture à bas niveau d'intrants pesticides. En France, cet objectif de conception est forcé par l'Etat par le biais des politiques publiques. Par exemple, les objectifs de réduction du plan Ecophyto II+ vise à réduire de 50% l'utilisation des pesticides d'ici 2025. Ce plan se traduit notamment par la mise en place d'un réseau de démonstration, le réseau DEPHY qui a pour objectif de produire des références sur les systèmes de culture à bas niveau d'intrants.

Le deuxième pôle de l'activité de conception « exploration et élaboration de solutions de conception » est un pôle fortement et traditionnellement étudié et approfondi par les chercheur·euse·s (Salembier et al., 2018). Par exemple, le réseau DEPHY-Expé est dirigé par des chercheur·euse·s qui conçoivent et évaluent des parcelles expérimentales à bas niveau d'intrants dans une diversité de contextes pédoclimatiques (Delière et al., 2018; Métral et al., 2018; Thiollet-Scholtus et al., 2019). Ce mode de conception peut être rapproché avec la conception *de novo* définie par Meynard et al. (2012) et vise à concevoir des systèmes de culture ou des systèmes d'exploitation en rupture. Ce processus permet d'explorer le champ des possibles en s'affranchissant des contraintes, avec un faible réalisme à l'échelle de l'exploitation dans le but de ne pas brider la créativité du·de la concepteur·ice. Les connaissances produites par ce réseau peuvent servir d'exemple aux agriculteur·ice·s et les convaincre qu'il est possible de changer de logique (dans notre cas, une agriculture à bas niveau d'intrants) mais les connaissances produites ne sont pas forcément adaptées au contexte réel de production dans lequel sont ancré·e·s les agriculteur·ice·s (Meynard et al., 2017). Les travaux récents de traques aux innovations se concentrent sur les pratiques innovantes ou « hors normes » que les agriculteur·ice·s conçoivent au sein de leur exploitation (Périnelle et al., 2021; Salembier et al., 2021; Verret et al., 2020).

Le dernier pôle de la conception, qui correspond notamment à l'implémentation et l'évaluation des solutions conçues, reste peu exploré et les connaissances manquent (Prost, 2019). Il existe encore peu de travaux sur l'implémentation des solutions de conception par les agriculteur·ice·s en situation réelle de production. Or les systèmes de culture et de production sont rarement conçus *de novo* mais plutôt pas-à-pas (Meynard et al., 2012). La conception pas-à-pas correspond à l'amélioration et l'adaptation progressive du système de culture déjà existant en fonction des nouveaux objectifs des agriculteur·ice·s qui organisent les changements dans le temps (Merot et al., 2019). C'est une démarche itérative avec une combinaison de changements lents et rapides à différentes échelles (Tchamitchian and Le Gal, 2014) avec des levées progressives de blocages (Merot et al., 2019) et des essais-erreurs (Deffontaines et al., 2020).

Avec ce cadre théorique, les travaux de recherche récents sur la conception tendent aussi à remettre les agriculteur·ices au centre de l'activité de conception en les considérant comme des « agriculteurs-concepteurs » (Goulet et al., 2008). Il s'agit de considérer les agriculteur·ice·s comme étant engagé·e·s dans une activité et pilotant le processus de conception de leur exploitation. Chizallet et al. (2019) considèrent la transition agroécologique comme un processus de conception au cours duquel les agriculteur·ice·s construisent chemin faisant et conduisent leur exploitation, l'agriculteur·ice étant concepteur·ice de son travail (Chizallet et al., 2019; Béguin and Darse, 1998). Ainsi, les

agriculteur·ice·s construisent des savoirs et des pratiques, innovent et s'adaptent à leur environnement à travers l'observation, l'échange de connaissances et d'informations et l'expérimentation (Goulet et al., 2008).

Le rôle des chercheur·euse·s dans le soutien à l'activité de conception des agriculteur·ice·s vers des systèmes à bas niveaux d'intrants est multiple et doit (i) alimenter le processus de conception en connaissances agronomiques et outils au niveau des trois pôles, (ii) mettre en scène l'activité de conception (à travers l'organisation d'atelier de conception par exemple) et (iii) soutenir l'activité dans sa dynamique (Toffolini et al., 2017b). Ce dernier point place l'activité de conception dans une temporalité plus longue par l'étude de l'implémentation des solutions conçues.

Ce travail de thèse se situe dans le **cadre de la conception** sans pour autant s'engager dans une démarche de conception. Il se focalise sur la **conception pas-à-pas** des agriculteur·ice·s, c'est-à-dire les évolutions progressives des systèmes de culture déjà existants par les agriculteur·ice·s engagé·e·s dans une réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires à travers l'analyse des **situations d'implémentation passées**. L'étude des processus de conception passés permet d'identifier comment s'est organisé le changement pour pouvoir adapter et accompagner les agriculteur·ice·s au cours du processus de conception et en tirer des connaissances sur la mise en place des solutions de conception. Le cadre de la conception permet également de replacer les agriculteur·ice·s au centre de la conception, comme pilote et moteur de changement au sein de leur exploitation. Il est nécessaire de produire des connaissances sur les processus d'implémentation passés des agriculteur·ice·s pour comprendre et identifier comment ils-elles **organisent le changement sur le temps long** et ainsi de mieux soutenir l'activité de conception des agriculteur·ice·s (Navarrete, 2014; Prost, 2019).

1.2 Les leviers de réduction de l'utilisation des pesticides en viticulture

L'action d'identification de solutions de conception, deuxième pôle du processus de conception, est un pôle déjà riche en connaissances. De nombreux leviers permettant la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires ont déjà été identifiés et conçus. Ces leviers reposent sur différents modes d'action et leur implémentation peut différer dans l'espace et dans le temps.

1.2.1 Les modes d'actions

En viticulture, les leviers techniques existants pour permettre la réduction durable de l'utilisation des produits phytosanitaires sont nombreux (Pertot et al., 2017). Ils peuvent être mis en place en amont des traitements (réflexion autour de l'itinéraire technique, utilisation de variétés résistantes...) ou en aval en repensant les traitements (Aveline, 2009). Ces leviers reposent sur quatre modes d'action définis par Aubertot et al. (2010) (Figure 1.2):

1. L'action sur le stock initial vise à réduire le stock initial de bioagresseurs,
2. L'évitement consiste à éviter la concordance entre la période de sensibilité de la culture et la phase de contamination/attaque de la culture par le bioagresseur.
3. L'atténuation qui vise à augmenter la compétitivité de la culture et à éviter les conditions favorables au développement et à la propagation des bioagresseurs. Ces pratiques sont mises en place lorsque le bioagresseur et la culture sont déjà en contact.
4. Des solutions de rattrapage sont mises en œuvre lorsque les trois actions précédentes n'ont pas été assez efficaces et que les symptômes de maladie, les ravageurs ou les adventices sont déjà visibles.

1.2.2 Les leviers spécifiques à la vigne

Les pratiques permettant de lutter contre les agents pathogènes ont été recensées lors du stage de fin d'étude de Margaux Guy (encadrement par Esther Fouillet et Anne Merot) et classées selon les différents modes d'action décrits par Aubertot et al. (2010) (Tableau 1.1 et annexe 1, 2). Certains leviers mobilisés en grandes cultures tels que l'allongement de rotation, le retard de la date de semis ou encore la diversification des cultures ne sont pas applicables aux cultures pérennes telles que la vigne. 32 leviers en tout ont été identifiés dans la littérature : 21 leviers pour la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires ciblant les fongicides (Tableau 1.1), 6 leviers pour les insecticides et 5 leviers pour la gestion des adventices.

Les leviers permettant de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires en viticulture peuvent concerner les équipements (réglages de pulvérisateur), les pratiques (passage au désherbage mécanique) ou encore les règles de décisions (utilisation d'Outil d'Aide à la Décision). Ces leviers se mettent en place dans des compartiments différents (rang, inter-rang, vigne) et agissent à différentes échelles : de la plante (*e.g.* prophylaxie), de la

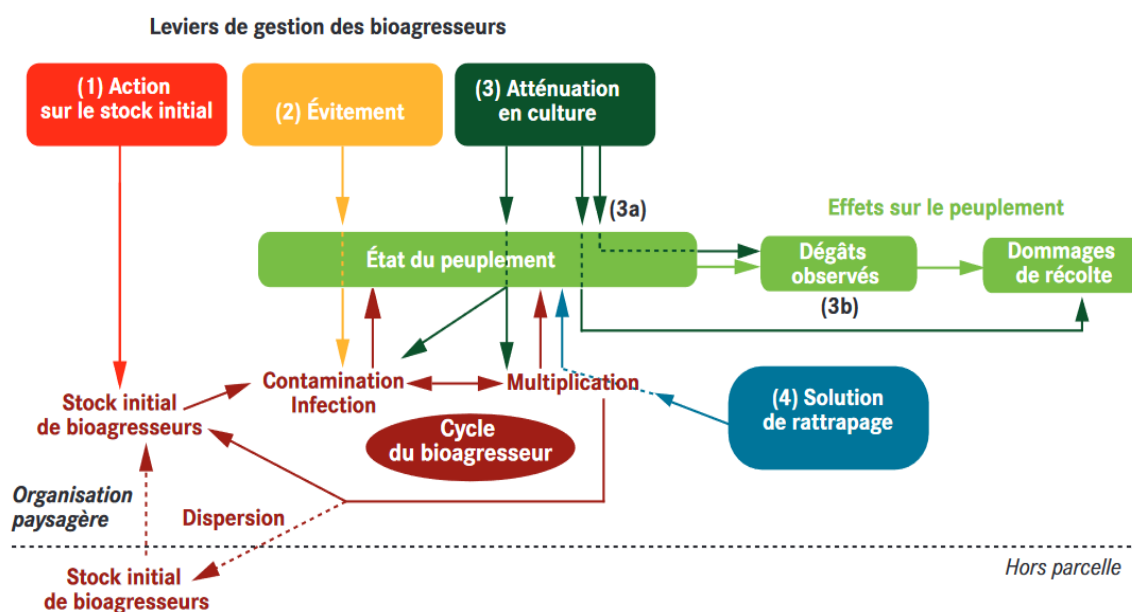


Figure 1.2 Leviers de gestion des bioagresseurs situés dans l'espace et dans le temps, d'après Attoumani-Ronceux et al. (2011)

parcelle (*e.g.* désherbage mécanique) ou encore du paysage (*e.g.* arrachage de parcelles viticoles abandonnées).

Les leviers identifiés permettant une réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires fongicides reposent principalement sur le mode d'action « solution de rattrapage » (voir Tableau 1.1). Tout d'abord, les doses appliquées peuvent être réduites et adaptés à la période phénologique de la vigne (Davy et al., 2020). Cette adaptation peut se faire avec l'aide d'un Outil d'Aide à la Décision (OAD). L'optimisation des traitements passe aussi par un meilleur réglage des pulvérisateurs ou bien l'achat d'un pulvérisateur plus précis (par la pulvérisation confinée par exemple). Un meilleur réglage de la pulvérisation peut permettre jusqu'à 50% de réduction d'utilisation de produit (Delpuech and Carra, 2016). Un décalage tardif du premier traitement contre le mildiou peut permettre de réduire le nombre de traitements appliqués au cours de la campagne culturale (Chen et al., 2020; Mailly et al., 2017).

Les produits utilisés peuvent également être remplacés par des produits de biocontrôle et cuivrés. D'autres leviers reposant sur d'autres modes d'action, moins mobilisés, comme les travaux en vert (mesures prophylactiques comme l'écimage, l'ébourgeonnage, l'épamprage, l'effeuillage ou les vendanges en vert), modifient les caractéristiques microclimatiques de la végétation réduisant ainsi le risque de contamination. Les produits de biocontrôle forment l'essentiel des leviers associés à la réduction des insecticides. La lutte biologique avec des trichogrammes ou encore la confusion sexuelle pour lutter contre les

vers de la grappe sont mises en place. La diminution du recours aux herbicides passe principalement par le désherbage mécanique et/ou l'enherbement de l'inter-rang (Pertot et al., 2017). L'acide pélargonique est la seule molécule herbicide de biocontrôle disponible mais son efficacité est toutefois limitée (Martelloni et al., 2020).

Pour réduire durablement l'utilisation des pesticides, les leviers existants doivent être combinés à différentes échelles, dans l'espace et le temps (Jeuffroy et al., 2022; Boulestreau et al., 2021). Un exemple de couplage d'échelle est celui de la conversion à l'Agriculture Biologique AB, qui correspond à une reconception forte à l'échelle de l'exploitation agricole (Hill and MacRae, 1996). L'AB est un mode de production agricole labélisé combinant des pratiques environnementales plus respectueuses de la biodiversité et avec la volonté de préserver les ressources. Les exploitations agricoles en AB doivent répondre à un cahier des charges interdisant l'utilisation d'intrants chimiques de synthèses (engrais minéraux et pesticides). En 2019, l'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) hors produits biocontrôle était de 12,4 en viticulture conventionnelle et de 8,1 en AB (Simonovici and Caray, 2021). La conversion à l'AB passe par l'implémentation de leviers techniques combinés à l'échelle parcellaire, que ce soit pour lutter contre les maladies cryptogamiques ou bien pour la gestion des adventices, qui impactent l'échelle de l'exploitation agricole (Merot and Smits, 2020).

Merot and Smits (2020) ont étudié les différentes stratégies de conversion à l'AB, se focalisant sur la dimension organisationnelle en étudiant à la fois la dimension technique (à travers les leviers techniques) et les facteurs de production associés. Lors de la conversion, les auteur·ice·s observent une complexification de la gestion avec un nombre d'interventions techniques et d'indicateurs de pilotage qui augmentent. Ainsi, une augmentation du temps de travail et du nombre de travailleur·euse·s ou encore l'achat et l'adaptation des équipements sont observés. Ces changements entraînent différentes stratégies de conversion : une réduction du nombre de parcelles en production pour limiter l'augmentation du travail pendant la conversion, ou encore une augmentation de la disponibilité du personnel qui conduit à une augmentation de la surface en production et un turnover de parcelles avec la même surface avec la même charge de travail (Merot and Smits, 2020). Les changements de pratiques à l'échelle de la parcelle ont des impacts à une échelle supra-parcellaire.

Les leviers peuvent être combinés à des échelles supérieures à l'exploitation agricole. Meynard et al. (2017) introduit la notion d'innovations couplées qui correspond « à la conception d'innovations de manière coordonnée en amont et en aval des filières agricoles ». L'innovation couplée permet de reconnecter les dynamiques d'innovation entre agriculteur·ice·s et système alimentaire et ainsi de lever des verrous existants.

Tableau 1.1 Leviers de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires ciblant les maladies fongiques classés en fonction des modes d'action de Aubertot et al. (2010) identifiés par Margaux Guy

Mode d'action	Levier	Pratique	Références bibliographiques
Action sur le stock	Travail du sol	Labour de pré-débournement	AgroBio Périgord, 2014
	Entretien des outils	Nettoyage régulier des outils de taille et de mutilation	AgroBio Périgord, 2014
	Entretien de la parcelle et de ses abords	Élimination des tissus végétaux infectés (1), destruction des vignes abandonnées et élimination des résidus de culture (2)	(1) AgroBio Périgord, 2014, (2) Blancard et al., 2017
Atténuation	Choix variétal	Utilisation de variétés résistantes aux maladies fongiques	Pertot et al., 2017
	Travaux en vert	Effeillage, ébourgeonnage, épamprage, rognage, éclaircissage	Barbier et al., 2011
	Taille	Formes de taille favorisant les mouvements d'air	Reynolds et Heuvel, 2009
	Système de conduite	Conduite sous abri	Garcia et al., 2016
	Couverture du sol	Enherbement maîtrisé	(1) AgroBio Périgord, 2014, (2) Barbier et al., 2011
	Fertilisation	Limiter la fertilisation	AgroBio Périgord, 2014
	Choix du clone et du porte greffe	Choix d'un couple clone-porte greffe peu vigoureux	Barbier et al., 2011
	Densité de plantation	Eviter une trop forte densité de plantation	Blancard et al., 2017
	Organisation paysagère	Eviter d'établir une parcelle à proximité de cours d'eau, lieux humides	Barbier et al., 2011
	Orientation des rangs	Choisir une orientation favorisant la circulation de l'air dans les rangs et un microclimat défavorable aux maladies	Hunter et al., 2016
Solutions de rattrapage	Biostimulants	Stimulateurs des défenses naturelles des plantes (SDN ou SDP), éliciteurs	Blanchard, 2018
	Biocontrôle	Produits de biocontrôle	Pertot et al., 2017
	Modulation de la dose	Adapter la dose appliquée à la végétation et à la pression du pathogène : OAD (Outils d'aide à la décision) (1), technologies d'observation (2), bulletins techniques (3) et tours de parcelles réguliers avec protocole d'observation (4)	(1) Pertot et al., 2017, (2) Kerkech et al., 2020, (3) Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2016, (4) Barbier et al., 2011
	Lutte chimique	Amélioration de la qualité de pulvérisation : pulvérisation confinée, buses anti-dérive et réglages adaptés, adaptation du débit, rampe lers traitements en début de végétation (1), amélioration du matériel déjà possédé (2); Amélioration de la pénétration des traitements dans la végétation: travaux en vert favorisant un feuillage aérée et hauteur de palissage maximale; Décalage de la date de première application de fongicides	(1) Auvergne et al., 2017, (2) Petit, 2018; Barbier et al., 2011; Mailly et al., 2016
Evitement	Travail du sol	Travail du sol drainant : sous-solage et décompactation avant plantation, labour	Barbier et al., 2011
	Couverture du sol	Enherbement maîtrisé	Barbier et al., 2011
	Drainage	Drainer la parcelle en cas de stagnation d'eau	Barbier et al., 2011

Les choix des leviers et leurs combinaisons vont dépendre des priorités, du mode de production ou encore du contexte de l'exploitation (Darnhofer et al., 2010a). Les changements techniques mis en œuvre dans le cadre d'une réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires vont différer d'une exploitation à l'autre même si les différentes trajectoires peuvent mener au même état final (Deffontaines et al., 2020; Merot et al., 2019). Il existe ainsi une diversité de combinaisons de leviers possibles propres à chaque exploitation.

Ainsi en viticulture, de nombreux leviers existent déjà pour permettre une réduction durable de l'utilisation des pesticides. Ces leviers doivent être combinés et implémentés dans les systèmes de culture déjà existants. Ils sont associés à différentes échelles et peuvent augmenter la complexité des itinéraires techniques et l'organisation de l'exploitation agricole. Chaque agriculteur·ice implémente, combine et adapte des leviers en fonction des caractéristiques de l'exploitation agricole. Il existe donc une diversité de possibilités de mise en place de changements dans le temps et l'espace.

1.3 L'implémentation des solutions conçues en situation réelle de production dans les systèmes viticoles

Malgré les nombreux leviers existants présentés dans le paragraphe précédent et les incitations gouvernementales, les agriculteur·ice·s peinent à réduire leur utilisation de produits phytosanitaires (Guichard et al., 2017; Hossard et al., 2017). Le système dominant reste structurellement dépendant de l'utilisation des pesticides et freine le changement de mode de production (Jeuffroy et al., 2022; Meynard et al., 2012).

Les leviers proposés par les agronomes sont généralement testés et issus de stations expérimentales ou de fermes pilotes. Ils ne tiennent pas compte de certaines situations d'agriculteur·ice·s à l'échelle des exploitations (Merot, 2022). La conception de solutions et de stratégies alternatives via l'expérimentation à l'échelle de la parcelle ne permet pas la prise en compte des contraintes d'un changement de stratégie par l'agriculteur·ice. En effet, les freins et blocages rencontrés au sein d'une exploitation peuvent être techniques, biophysiques, organisationnels, économiques et psycho-sociaux (Aouadi et al., 2015). Certains leviers peuvent également impacter l'organisation et la charge de travail (*e.g.* augmentation du temps de travail, achat d'équipement) (Merot et al., 2019; Merot and Smits, 2020; Merot and Wery, 2017).

En particulier, les blocages et les freins liés à la mise en œuvre de leviers permettant la réduction de l'utilisation des pesticides peuvent avoir lieu à différentes échelles : à l'échelle de la parcelle (*e.g.* présence d'infrastructure), de l'exploitation (*e.g.* ressources

matérielles et cognitives), du territoire (*e.g.* exigence de la filière) mais également au niveau de l'agriculteur·ice (*e.g.* valeurs morales). Il existe, au sein de la la filière viticole, de nombreux freins, de différentes natures et présent à différentes échelles.

1.3.1 Blocages et freins techniques et biophysiques

La conduite de la vigne comporte un grand nombre d'opérations techniques et l'hétérogénéité intraparcellaire ou encore la diversité du parcellaire complexifient un peu plus l'organisation de l'exploitation. L'implémentation de nouvelles pratiques augmente cette complexité du système par l'augmentation des composantes biophysiques pilotées, du nombre d'indicateurs de pilotage et des opérations culturales (Merot and Belhouchette, 2019). La mise en œuvre de nouvelles pratiques nécessite également l'acquisition de nouveau matériel qui requiert un temps d'apprentissage et une qualification. Par exemple, le désherbage mécanique, alternative au désherbage chimique sous le rang, nécessite l'achat de matériel adapté (interceps, tracteur) mais également l'emploi de personnel qualifié pour ces opérations techniques (Merot and Belhouchette, 2019).

La dimension biophysique freine également la mise en œuvre des changements. La vigne étant une culture pérenne, les changements sont majoritairement opérés sur une vigne en place en cours de production. En conséquence, le système de culture présente une certaine inertie face aux changements. Par exemple, le rendement de la vigne s'élabore en 2 ans, Merot and Smits (2020) ont montré une réduction des rendements lors des deux premières années de conversion vers l'AB, avant que les rendements ne reviennent au niveau initial d'avant conversion, en lien notamment avec un stress azoté plus important les deux premières années de conversion et une plus forte incidence de l'oïdium et du mildiou.

1.3.2 Blocages et freins économiques

Un des principaux freins à la mise en œuvre de pratiques permettant une réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires est le coût de la mise en œuvre d'alternative (Chèze et al., 2020). Les pressions et attaques parasitaires représentent un risque majeur en viticulture et peuvent entraîner la perte totale de la récolte (Fermaud et al., 2016). L'usage des pesticides représente pour les viticulteur·ice·s une méthode peu coûteuse et efficace pour lutter contre les bioagresseurs et ainsi d'assurer de bons rendements (Chèze et al., 2020). L'aspect économique est un déterminant majeur dans le changement technologique et l'adoption d'innovation. Le coût du changement technique peut se distinguer à travers deux aspects : (i) le coût d'achat du matériel d'investissements commerciaux et (ii) la perte temporaire de revenus dû à une baisse de rendement.

Le coût d'achat du matériel mais aussi les investissements commerciaux peuvent présenter un frein à la mise en place de changements (Merot et al., 2019). L'utilisation systémique des pesticides permet aux agriculteur·ice·s des économies d'observation mais aussi de coût, la pulvérisation de plusieurs traitements pouvant se faire en un passage. Lors de la conversion en AB, une hausse des coûts de l'utilisation du matériel est observée, elle entraîne une hausse de l'utilisation de carburant (Delarue, 2011).

La mise en place d'une innovation peut impacter la quantité et la qualité de la production entraînant ainsi une perte temporaire de revenus. Des techniques mal maîtrisées comme le désherbage mécanique sous le rang par exemple peuvent endommager les souches des ceps et donc impacter la productivité (Jacquet et al., 2019). Si l'implémentation de nouveaux leviers techniques n'est pas bien réalisée, il y a un risque que la culture soit plus impactée par les bioagresseurs. Les produits biocontrôle sont la plupart du temps moins efficaces que les produits de synthèse, rendant la vigne plus sensibles aux maladies. En plus d'impacter la quantité de production, ces attaques peuvent affecter la qualité des produits, certains bioagresseurs comme le botrytis ont un effet négatif sur la qualité des baies et donc du vin (Jermini et al., 2010; Pons et al., 2018; Gadoury et al., 2001).

1.3.3 Blocages et freins organisationnels

Des freins organisationnels au sein de l'exploitation sont également observés. La complexification de l'itinéraire technique nécessite une réorganisation des tâches ainsi que des liens au travail. Certains changements de pratiques peuvent amener une augmentation du nombre de passages entraînant ainsi des pics de travaux et des tensions dans le calendrier de travail (Munier-Jolain et al., 2008). En cas de surcharge de travail, des opérations techniques peuvent être privilégiées au détriment du désherbage notamment les traitements phytosanitaires (Jacquet et al., 2019). Pour que ces changements techniques soient gérables, des changements opérationnels peuvent être mis en place se traduisant par une réduction du parcellaire, une simplification des pratiques, des embauches ou encore une mécanisation plus importante (Merot and Smits, 2020).

L'implémentation de nouvelles pratiques, telle que le désherbage mécanique ou encore la mise en place de culture de service, peuvent aussi affecter les conditions de travail (Duval et al., 2021; Delecourt et al., 2019). Certaines interventions peuvent entrer en compétition dans le calendrier de travail et nécessitent une période d'apprentissage (Delecourt et al., 2019; Duval et al., 2021). Ce changement dans les conditions de travail peut être un frein à la mise en œuvre de nouvelles pratiques. Ainsi, l'étude de Coulon et al. (2007) sur les changements de pratiques de viticulteur·ice·s lors de leur réduction des pesticides montre une faible adoption de la prophylaxie. Cette pratique étant fortement consommatrice de

temps de travail cela représente un frein important pour certain·e·s viticulteur·ice·s.

A l'échelle de l'exploitation, dans les systèmes viticoles, des assemblages de cépages sont parfois réalisés. Pour une exploitation où plusieurs cépages sont cultivés, différents modes de conduite sont nécessaires. La gestion des parcelles peut être donc très diversifiée au sein d'une exploitation avec une diversité d'itinéraires techniques.

1.3.4 Freins et blocages réglementaires

Des contraintes réglementaires peuvent également apparaître. En particulier, les fortes contraintes de production imposées par l'Institut National de l'Origine et de la Qualité (INAO) et de la filière viti-vinicole rendent l'adoption de certaines pratiques parfois difficiles. Par exemple, la plantation de cépages résistants, la modification de la hauteur de palissage sont des leviers qui peuvent être impossibles à mettre en œuvre car non conformes au cahier des charges de l'appellation. De même, un levier organisationnel envisageable est celui de jouer sur les prix de vente. Mais lorsque les viticulteur·ice·s sont engagé·e·s au sein d'une cave coopérative, ils·elles ont peu de marges de manœuvre sur ce point-là.

1.3.5 Freins et blocages psycho-sociaux

En plus des freins techniques, économiques et organisationnels, des freins d'ordre psycho-sociaux peuvent bloquer l'adoption de certaines pratiques. Dans le travail agricole, les incertitudes sont omniprésentes, que ce soit d'un point de vue météorologique, sur la récolte ou encore dans la valorisation des produits (Lamine, 2017). La perception des risques de l'agriculteur·ice est un facteur non négligeable dans les décisions d'adoption de nouvelles technologies (Marra et al. 2003). Les facteurs comportementaux et l'attitude de l'agriculteur·ice face aux risques de l'innovation ou de l'environnement tendent à expliquer les écarts face aux décisions d'adoption uniquement motivées par des raisons économiques. De fait, ces facteurs sont à prendre en compte car ils peuvent influencer la décision d'un agriculteur face aux mesures politiques fondées sur des incitations financières (Lefebvre et al., 2015). L'analyse des pratiques seule ne permet donc pas de comprendre pleinement et d'étudier les processus de décision.

Des freins liés aux valeurs de l'agriculteur·ice peuvent également freiner l'adoption de certaines pratiques (Meynard, 2013). Par exemple, l'importance de l'esthétisme peut influencer l'adoption ou non de certaines pratiques (Compagnone, 2014; Villain, 2022). Les pratiques du désherbage chimique notamment restent fortement utilisées s'associant au culte du « propre » de certain·e·s viticulteur·ice·s (Villain, 2022). Finger and Möhring (2022) identifient une plus grande adoption de pratiques agroécologiques chez les agriculteur·ice·s qui ont une perception positive des effets sur l'environnement et la santé humaine d'une agriculture sans pesticide.

Le réseau social de l'agriculteur·ice joue un rôle fondamental dans l'adoption ou non de nouvelles pratiques (Barbier and Lemery, 2000; Compagnone, 2004). Les agriculteur·ice·s sont entouré·e·s par une pluralité d'acteurs que ce soit les pairs, les conseiller·ère·s et technicien·ne·s ou encore la famille, les voisin·e·s. Ces acteur·ice·s peuvent jouer un rôle important dans l'évolution des pratiques en freinant ou facilitant le changement de pratiques (Compagnone, 2004; Barbier et al., 2015). Les interactions sociales professionnelles impactent également les prises de décisions. L'insertion d'un·une viticulteur·ice au sein d'un groupe peut être moteur de changement, notamment avec la circulation de connaissances, l'apprentissage et la transmission d'expérience (Goulet et al., 2008; Compagnone, 2004). Plus récemment des travaux ont montré l'importance des groupes sur les plateformes numériques et les réseaux sociaux (Twitter, groupes Facebook, forums...) dans la mise en œuvre de nouvelles pratiques par les agriculteur·ice·s via l'échange d'information et de connaissances et la mise en commun des expérimentations (Bliss et al., 2019; Mills et al., 2019; Prost et al., 2017b; Rénier et al., 2022). L'utilisation de ces plateformes permet aux agriculteur·ice·s de s'extraire des contraintes géographiques et les autonomise vis-à-vis des conseillers (Goulet et al., 2008).

Ainsi, les leviers existants pour initier une baisse de l'utilisation des pesticides sont nombreux. La mise en œuvre de ces leviers peut faire face à des freins de différentes natures (économiques, techniques, psycho-social...) se situant à différentes échelles. Il y a donc des enjeux à comprendre comment les pratiques implémentées impactent les différentes performances aussi bien à l'échelle parcellaire qu'à une échelle supra-parcellaire. Les déterminants des pratiques sont multi-échelles et vont de la parcelle à l'échelle du territoire. L'échelle minimale pour étudier les processus d'implémentation est l'échelle de la parcelle mais il est nécessaire de prendre en compte son échelle complémentaire, l'échelle de l'exploitation. C'est à cette échelle qu'il est possible d'étudier plus précisément les changements techniques et organisationnels.

2 Etudier le processus dynamique des changements de pratiques

L'implémentation de solutions de conception peut conduire à des changements systémiques entraînant une reconception partielle ou totale du système d'exploitation (Bellon et al., 2007; Le Gal et al., 2011).

2.1 L'approche système pour appréhender les changements de pratiques au sein de l'exploitation agricole

Dans le cadre de la réduction de l'utilisation des pesticides, comme évoqué dans la section 1.2., les leviers implémentés doivent être combinés dans l'espace et le temps et sont ainsi en interaction. Les leviers implémentés peuvent être relatifs à différentes composantes du système, décisionnelle (utilisation d'Outil d'Aide à la Décision) ou technique (passage au désherbage mécanique), et agissent sur le compartiment biophysique (plante, sol, bioagresseurs...). Les différentes combinaisons de ces leviers impactent différemment les performances de l'exploitation (temps de travail, charges, rendement...), modifiant plus ou moins l'organisation et de la structure de l'exploitation (Merot et al., 2019). La conception de systèmes de culture à faible utilisation de pesticides est donc déterminée par les interactions entre le système biophysique, le système technique et le système décisionnel. Pour étudier les changements de pratiques et leurs effets, il est donc important de prendre en compte les interactions complexes entre les pratiques implémentées par les agriculteur·ice·s, leur mise en œuvre dans le temps et l'espace et leurs impacts sur les processus biophysiques (Le Gal et al., 2010). Le choix des pratiques se fait en fonction des objectifs fixés par l'agriculteur·ice, des contraintes et des ressources de l'exploitation agricole (Aubry and Michel-Dounias, 2006). La compréhension de l'agroécosystème dans sa globalité permet d'appréhender les effets directs, indirects, synergiques ou antagonistes des pratiques et changement de pratiques sur les performances de ce système.

La conception de systèmes agricoles agroécologiques nécessite d'avoir une vision systémique du système étudié. L'approche système permet de représenter le système étudié comme une entité composée d'un ensemble de sous-systèmes en interaction plongé dans un contexte et un milieu, un environnement (Walliser, 1977). Cette approche permet de faire le lien entre le fonctionnement biophysique du champ cultivé et les pratiques.

L'objet étudié dans le cadre de cette thèse est le système de production défini :

- Par la combinaison de ses activités productives et de ses moyens de productions (FAO),
- Le système de production est défini par la combinaison d'un sous-système bio-physique en interaction avec un sous-système technique sous l'influence du système décisionnel et dans un cadre de contraintes défini par la nature et la quantité de facteurs de production (travail, équipements, terre, ressources financières) Le Gal et al. (2011).

2.2 Etude des transitions pour étudier les mécanismes de changements de pratiques

La transition vers des systèmes à faible utilisation de pesticides est un processus de conception qui s'inscrit dans le temps. Aussi, les systèmes agricoles font face à des changements constants qui peuvent être lents et prévisibles mais aussi rapides et parfois imprédictibles (Darnhofer, 2021; Schiere et al., 2012; Darnhofer et al., 2008). Ces changements constants nécessitent d'avoir une approche dynamique dans l'étude des pratiques.

Pour étudier les changements et leurs dynamiques au sein des exploitations et des sous-systèmes, plusieurs cadres d'analyse et concepts peuvent être mobilisés : le cadre des transitions (Lamine et al., 2009), les trajectoires (Moulin et al., 2008), la conception pas-à-pas (Meynard et al., 2012) ou encore l'adaptabilité des pratiques (Darnhofer et al., 2010b). Dans cette partie, nous nous focaliserons sur les concepts de transition et de trajectoire comme cadres conceptuels pour renseigner sur les mécanismes de changement et le processus de conception.

2.2.1 Théorie des transitions sociotechniques pour l'étude des transitions agricoles

La transition a été conceptualisée par Geels (2002) à travers la théorie des transitions sociotechniques qu'il définit comme l'étude du processus de changement technologique sur le temps long et à grande échelle. Geels and Schot (2007) articulent l'étude des transitions autour de la perspective multiniveau qui ancre la transition comme le passage du système dominant vers un autre système structuré autour d'une technologie alternative. La perspective multiniveau est vue comme un processus non linéaire qui résulte de l'interaction de développement de trois niveaux analytiques : les niches (les innovations

radicales), les régimes sociotechniques (les pratiques établies et les règles qui leurs sont associées pour stabiliser le système existant) et le paysage sociotechnique exogène (Geels and Schot, 2007; Darnhofer, 2014). La niche est impliquée dans un complexe de changements interdépendants (des nouvelles valeurs ou croyances, de nouvelles technologie ou pratiques) (Darnhofer, 2015). Le cadre théorique posé par Geels and Schot (2007) propose une approche dynamique des transitions où le changement de pratique est un processus sociotechnique dynamique à trois échelles (paysage, régime sociotechnique et niche).

Les transitions agricoles sont décrites par Wilson (2008) comme des processus non linéaires, hétérogènes et imprévisibles. Il insiste également sur la nécessité d'étudier les transitions sur un temps long afin d'identifier les verrouillages technologiques, les effets de dépendance entre le chemin emprunté et le résultat de la transition (path-dependency) et introduit aussi la mémoire des systèmes qui va influencer les décisions.

A l'échelle de l'exploitation agricole, la transition est un processus, impacté par une dimension sociale portant sur l'apprentissage, l'expérimentation et les essais-erreurs (Chantre and Cardona, 2014; Toffolini et al., 2016). La transition vers des systèmes plus économes en pesticides se fait chemin faisant (Caquet et al., 2020), et peut se faire de deux façons différentes : de manière progressive et sur un long pas de temps, ou de façon brutale sur une courte période de temps (Lamine and Bellon, 2009). Les changements radicaux associés à une transition brutale sont rares et ne sont pas forcément robustes (Chantre and Cardona, 2014).

Ainsi, la définition de la transition inclut la notion de dynamique et donc de trajectoire suivie lors de la transition. L'étude des transitions permet de comprendre comment s'organise l'implémentation dans le temps et la réussite ou non de la transition. Pour comprendre comment s'opère la réorganisation des exploitations, il est nécessaire de prendre en compte le pas de temps pluriannuel pour comprendre les processus d'implémentation et produire de nouvelles connaissances pour des processus de conception futurs.

2.3 L'étude des trajectoires pour comprendre les processus de transition

Pour étudier les transitions au-delà de l'écart entre situation d'arrivée et situation de départ et rendre compte du processus de transition, le concept de trajectoire est utilisé. Merot (2022) définit une trajectoire comme étant «le chemin visualisé et dessiné par un ensemble d'étapes qui correspondent aux positions, successives dans le temps, occupées par un système au cours de son mouvement par rapport à un repère donné ». Une trajectoire est ici considérée comme le chemin d'une transition partant d'un état initial

vers un état final en passant par des états intermédiaires (Merot et al., 2019). Des effets de rupture peuvent apparaître au cours des trajectoires, et ces ruptures correspondent à des changements d'orientation soudains de la trajectoire (Wilson, 2008). Les trajectoires peuvent donc être vues comme une succession de périodes de stabilité délimitées par des changements.

D'après Ross et al. (2008), le changement peut se caractériser à l'aide de trois éléments: (1) l'agent du changement, considéré comme la force instigatrice du changement ; (2) l'effet du changement qui correspond à la différence entre les états avant et après le changement ; (3) le mécanisme du changement, c'est-à-dire la trajectoire que prend le système pour passer de son état initial vers son état post changement. Ce dernier point indique la nécessité de ne pas seulement regarder les changements à un instant t mais bien sur le temps long en regardant le chemin emprunté par les agriculteur-ice-s. Le concept de trajectoire permet ainsi d'exprimer la temporalité des changements des exploitations. Le concept de trajectoire peut être utilisé afin de mieux saisir les processus de changements dans les pratiques agricoles (Chantre and Cardona, 2014). L'approche trajectoire nécessite de changer de point de vue passant d'une approche statique à une approche dynamique (Figure 1.3).



Figure 1.3 L'étude des changements par le concept des trajectoires d'après Blackmore et al. (2012)

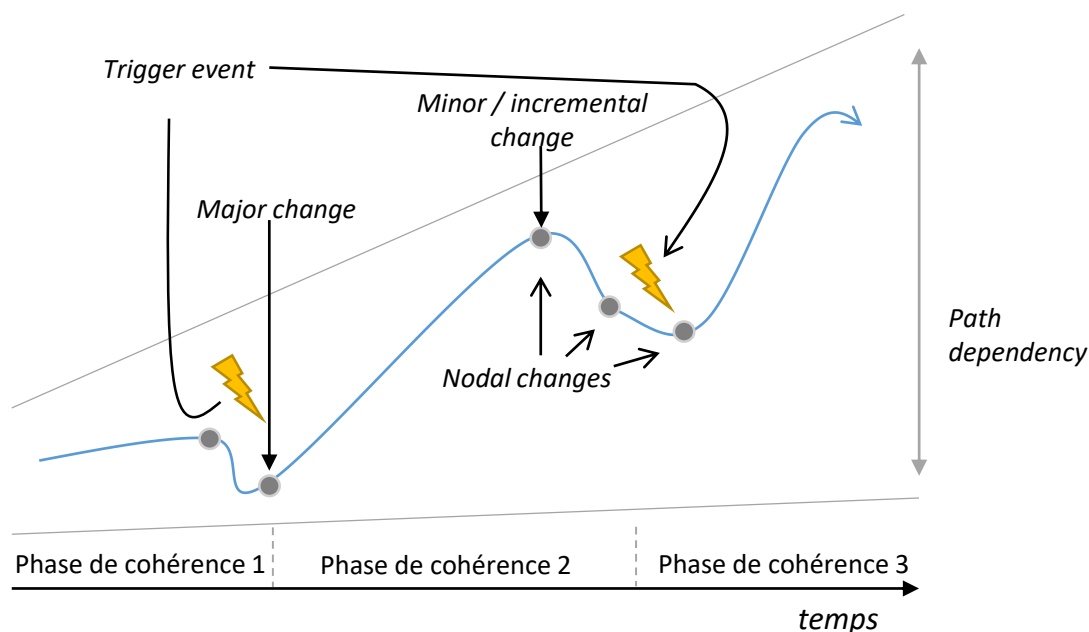


Figure 1.4 Les différentes composantes d'une trajectoire, inspiré de Petit (2017) d'après Wilson (2008) et Sutherland et al. (2012)

2.3.1 Conceptualisation et description théorique d'une trajectoire

Wilson (2008) qualifie le chemin pendant une transition comme une succession de périodes linéaires. Le changement de période linéaire associé à des changements sociotechniques est qualifié par Wilson comme des changements nodaux (nodal change) qui vont réorienter la trajectoire (Figure 1.4). La réorientation de la trajectoire est limitée et contrainte : chaque période linéaire définit la possibilité d'un système d'aller dans une direction et est contrainte dans des 'transitionnels corridors' limitant les possibilités de la trajectoire. Cette dépendance au chemin (path dependency) traduit la mémoire du système, les changements ayant eu lieu en amont conditionnant les changements futurs. Les limites de la dépendance au chemin peuvent être formées par les effets de verrouillages.

Pour Sutherland et al. (2012), les changements mineurs se font de manière incrémentales tandis que les changements majeurs répondent à des triggers events, éléments déclencheurs du changement que l'on peut rapprocher des 'nodal points' définis par Wilson (2008).

2.3.2 L'étude des trajectoires d'exploitation en agronomie : perspective historique à travers l'utilisation de typologie

Les trajectoires d'exploitations agricoles ont déjà fait l'objet d'études et deux méthodes d'analyse se distinguent initialement, se basant toutes les deux sur l'utilisation de typologies. La première méthode, développée par Capillon (1993), se base sur des enquêtes retraçant l'évolution des exploitations. Les exploitations ayant des fonctionnements et des évolutions antérieures similaires sont regroupées par type avec l'hypothèse que leurs évolutions seront similaires (Capillon and Manichon, 1978; Moulin et al., 2008).

Une deuxième méthode plus dynamique est ensuite développée par Perrot (1990). Cette approche à dire d'expert s'appuie sur une typologie d'exploitation dans une période de temps donnée, réactualisant la typologie (tous les 5 ans par exemple). La méthode prend également en compte les trajectoires d'exploitations individuelles, une exploitation pouvant passer d'un type à l'autre au cours de sa trajectoire.

De nombreuses études s'inspirent de ces méthodologies afin de classer des transitions d'exploitation via l'élaboration de typologies comparant état initial, intermédiaire et final mais également pour anticiper les potentiels changements futurs (Falconnier et al., 2015; García-Martínez et al., 2009; Rueff et al., 2012; Ryschawy et al., 2013; Teixeira et al., 2018). Cependant, ces méthodes restent statiques et comparatives, s'intéressant donc plutôt à la transition d'un état à l'autre. L'utilisation de typologie dans les deux approches se fait en amont de l'analyse des trajectoires et fait perdre l'information sur la trajectoire prise par l'exploitation.

En s'inspirant de la méthode de Perrot (1990), Moulin et al. (2008) ont mis en place les trajectoires de cohérence, découpant la trajectoire en phases de cohérence, définies comme « une cohérence dans l'organisation et la conduite des activités » (Moulin et al. (2008), Figure 1.5). Les changements qui sont effectués au sein des exploitations peuvent rendre compte d'une phase exploratoire pour identifier les possibilités qui se présentent à l'agriculteur·ice. La méthode de Moulin et al. (2008) permet la prise en compte du ou des mécanismes permettant le passage d'un point à l'autre et retraçant les modifications progressives et les transformations mises en place au sein de l'exploitation. Cette approche est plus dynamique, les changements sont retracés et caractérisés en fonction de leur intensité. La typologie est faite à partir de la caractérisation des pratiques, et l'enchaînement de type de pratiques est caractérisé.

Les méthodes présentées se basent sur des typologies des pratiques mais ne caractérisent pas la trajectoire en elle-même. Par la suite, d'autres méthodes ont été conçues, inspirées par les premières méthodes de Capillon and Manichon (1978), Perrot (1990) et Moulin

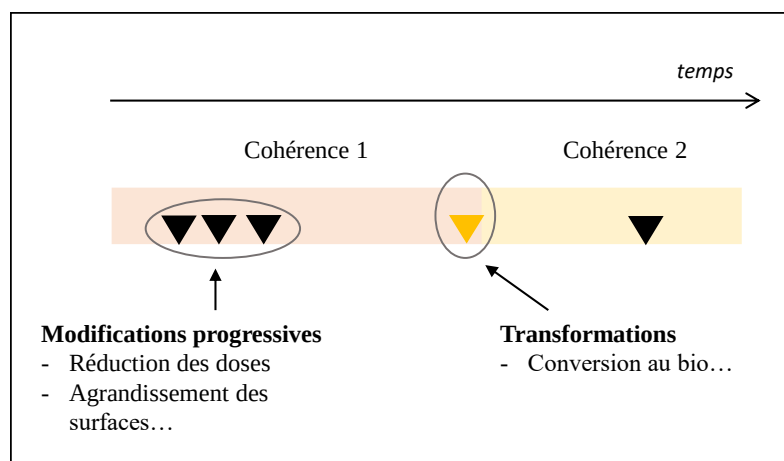


Figure 1.5 Méthode d'analyse développée par Moulin et al. (2008) pour identifier les phases de cohérence dans la trajectoire d'évolution d'une exploitation agricole

et al. (2008). Toutes mettent en place des typologies, soit en faisant une typologie des trajectoires directement, ou bien en combinant typologies de pratiques et typologie de trajectoires. Ces études qualifient les trajectoires à travers les pratiques ou à travers les performances à l'aide de différents indicateurs. Ces analyses peuvent se faire ex post (après la transition) ou in itinere (étude des changements au cours de la transition).

2.3.3 Etude des trajectoires de transition à travers une typologie de trajectoires

Certaines études caractérisent les trajectoires elles-mêmes se basant sur une caractérisation des pratiques qualitatives ou des données de performances quantitatives pour établir la typologie.

Revoyron et al. (2022) étudient les trajectoires de diversification d'agriculteur·ice·s à partir d'indicateurs extraits des changements de pratiques sur une moyenne de 8.5 ans (entre 2 et 26 ans). Des indicateurs issus de l'évolution des pratiques de diversification sont calculés pour établir ensuite une typologie de trajectoires de diversification. Par exemple, les changements relatifs et changements annuels moyens du nombre d'espèces cultivées au sein de l'exploitation agricole sont calculés. D'autres approches s'appuient sur des indicateurs de performances ce qui permet d'ouvrir à des méthodes d'analyse différentes des typologies issues d'analyses d'enquêtes ouvertes. Par exemple, les travaux de Martin et al. (2017) repris par Bouttes et al. (2018) puis par Perrin and Martin (2021) évaluent la vulnérabilité des exploitations d'élevages laitiers aux aléas climatiques et économiques à travers le temps. Cette méthode se base sur l'utilisation d'indicateurs quantitatifs (performances) sur plusieurs années et cherche à caractériser leur dynamique via la mise en

place d'un modèle linéaire et l'extraction d'indicateurs associés (Figure 6). Par exemple, la pente extraite du modèle linéaire va révéler la tendance générale (hausse, baisse ou stagnation), les résidus permettent d'évaluer la robustesse et la variabilité de la mesure.

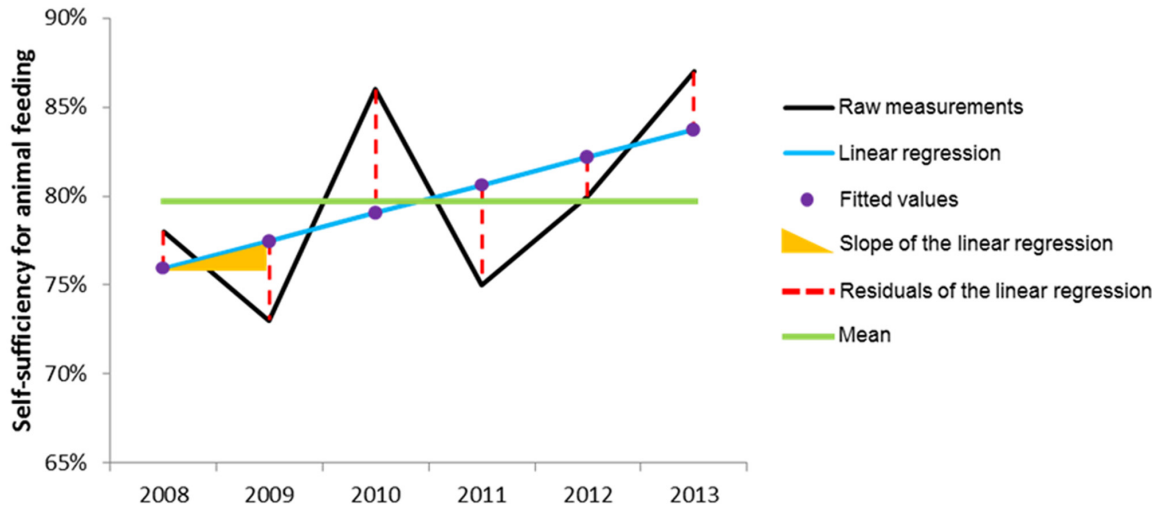


Figure 1.6 Aperçu des variables calculées permettant d'évaluer la vulnérabilité des exploitations au cours du temps d'après Martin et al. (2017)

L'utilisation d'indicateurs quantitatifs issus de données de performances ou de pratiques permet ainsi de caractériser le dynamique de changements de l'exploitation agricole.

2.3.4 Etude des trajectoires de transition à travers une double typologie de pratiques et de trajectoire de pratiques

De nombreuses méthodes utilisent des doubles typologies caractérisant à la fois les changements et les motifs de changements. Les changements sont dans un premier temps caractérisés puis classés en types. Pour étudier les trajectoires de changement de pratiques au sein des exploitations ou des systèmes de culture, l'utilisation d'indicateurs est nécessaire pour caractériser les pratiques. Afin de caractériser les niveaux de changements de pratiques, de nombreux auteur·ice·s s'appuient sur le cadre conceptuel Efficience-Substitution-Redesign (ESR) proposé par Hill and MacRae (1996) (Chantre, 2014; Lamine, 2011; Padel et al., 2020). Ce cadre conceptuel permet d'analyser le degré d'intensité de changement lors de la transition d'un système conventionnel vers une agriculture durable. Il formalise que les conversions vers une agriculture à faible utilisation d'intrants se font à travers trois étapes successives. La première étape, l'Efficience (E) correspond à l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation des intrants (*e.g.* réduction des doses). La deuxième étape de changement correspond à la Substitution (S) des intrants chimiques par des intrants organiques ou bien des pratiques alternatives (*e.g.* utilisation de produits

biocontrôle). La dernière étape, le Redesign (R) correspond à une reconception globale du système de culture. Les travaux de Chantre et al. (2015) s'appuient sur le cadre ESR et le concept de phases de cohérence de Moulin et al. (2008) pour identifier des trajectoires de pratiques de 20 céréaliers en Champagne Berrichonne sur 30 ans. Les auteur·ice·s identifient sept phases de cohérence en fonction des pratiques et de la dépendance aux intrants. Puis les séquences de phases de cohérences sont classées en trois grands types. Les trajectoires identifiées correspondent à des successions de phase de cohérence de pratiques caractérisées par la suite à l'aide du cadre ESR. Ce travail permet d'identifier des pratiques clés permettant le passage d'une phase de cohérence à une autre vers la Protection Intégrée des Cultures et les processus d'apprentissage associés. Cette méthode est reprise par Mawois et al. (2019) pour caractériser les trajectoires de diversification des fermes en grande culture dans l'introduction de légumineuses.

Merot et al. (2019) qualifient les changements de pratiques réalisés par des viticulteur·ice·s en conversion à l'Agriculture Biologique également à l'aide du cadre ESR. Un score ESR final est attribué par année et exploitation dépendant du nombre de E, S ou R identifiés cette année-là. La typologie est faite par la suite en classant les trajectoires ESR. Les auteur·ice·s calculent également des indicateurs de vitesse et d'intensité de changement à partir des scores donnés à chaque changement. D'autres indicateurs sont utilisés pour caractériser les changements de pratiques. Par exemple, Dupré et al. (2017) qualifient les pratiques à l'échelle de l'exploitation chez des producteur·ice·s d'agrumes à la Réunion via le calcul de scores techniques (technical score), qui permettent d'identifier par la suite les dynamiques de stratégies techniques des exploitations de 1980 à 2010. Les travaux étudiant les trajectoires de changements permettent également l'analyse des dynamiques d'apprentissage et de mobilisation de connaissance au cours du processus de changement de pratiques (Catalogna, 2018; Chantre and Cardona, 2014; Toffolini et al., 2016). Les travaux de thèse de Marie Chizallet retracent les changements de pratiques mis en œuvre à travers des ateliers « Chronique du Changement ». Ces ateliers visent à reconstruire l'activité de conception d'agriculteur·ice·s céréaliers engagés dans une TAE pour comprendre l'activité de conception de ces agriculteurs. Cette compréhension passe par l'identification des freins rencontrés par les agriculteur·ice·s mais aussi des objectifs et des ressources mobilisées. Certaines études tournées autour de la transition agroécologique se focalisent sur des dimensions liées à l'évolution de la satisfaction des éleveurs (Perrin et al., 2020) ou encore du travail (Duval et al., 2021).

Les études sur les trajectoires sont assez récentes et le nombre de méthodes et cadres conceptuels utilisés pour les étudier est encore faible : cela traduit les difficultés méthodologiques rencontrées pour intégrer la notion dynamique des exploitations. Il existe donc

des enjeux autour de la création d’outils méthodologiques pour évaluer le changement des systèmes de façon dynamique, comprendre les interactions entre les différents sous-systèmes sur le temps long. Pour ce faire, il est nécessaire d’identifier et intégrer des indicateurs qui rendent compte de la dynamique des changements dans les exploitations, en complément des indicateurs d’état « statiques ». Les méthodes détaillées ci-dessus se basent uniquement sur des informations détaillées obtenues par enquêtes. Il est donc difficile de travailler sur un grand échantillon d’agriculteur·ice·s. De plus, retracer les trajectoires de changements nécessite l’acquisition d’un grand nombre de données en faisant appel à la mémoire des enquêtés, ce qui peut être un exercice difficile. Dans les travaux cités précédemment, le nombre d’agriculteur·ice·s enquêté·e·s est généralement ‘faible’ allant d’une dizaine (Chantre et al., 2015) à une trentaine (Dupré et al., 2017; Martin et al., 2017; Mawois et al., 2019; Revoyron et al., 2022). Il est ainsi difficile d’acquérir des données sur le long terme dans des zones géographiques étendues ou d’intégrer la diversité pédoclimatique et de contextes d’exploitations. Dans le cas de la viticulture par exemple, l’effet des bassins viticoles est très fort et les pratiques phytosanitaires peuvent être très différentes d’un bassin à l’autre. Une approche « big data », mobilisant des échantillons plus grands et plus variés pour plus de genericité serait intéressante à mettre en œuvre.

Pour comprendre comment les pratiques sont implémentées et comment elles impactent le fonctionnement de l'exploitation, il est nécessaire d'avoir une approche multidimensionnelle dans l'espace et dans le temps. **L'échelle spatiale** concerne l'échelle du système de production de la parcelle à l'exploitation agricole, et permet d'identifier les leviers mis en œuvre et leurs impacts sur l'organisation (*e.g.* temps de travail) et les ressources (*e.g.* économiques). **L'échelle temporelle** permet de comprendre comment les leviers sont implémentés dans le temps, de manière plus ou moins progressive. **L'approche systémique** permet d'appréhender la complexité des exploitations agricoles et systèmes de culture en étudiant leurs différentes composantes, et d'analyser leurs interactions dans le temps. Aussi, l'étude de la **dynamique des systèmes et des interactions entre leurs composantes** et les choix faits par les agriculteur·ice·s pose encore des questions méthodologiques. Il existe aussi des enjeux à comprendre les compromis (*i.e.* antagonismes et synergies) faits entre les objectifs de l'agriculteur·ice au sein du système de production (*e.g.* rendement vs durabilité). Ces analyses peuvent se baser sur des indicateurs liés aux pratiques agricoles ainsi qu'aux performances des exploitations. En matière d'implémentation, plusieurs études montrent que la connaissance pour le changement s'acquière progressivement en lien avec une dynamique dans l'apprentissage (Chantre et al., 2015; Coquil et al., 2014). L'évaluation de l'efficacité de l'implémentation ne peut donc se faire à un instant t mais bien sur le temps long : il est donc nécessaire d'avoir une **approche dynamique** dans l'étude des transitions. Ainsi, il existe des enjeux scientifiques pour l'analyse des trajectoires des exploitations agricoles, prenant en compte l'aspect dynamique des transitions (*e.g.* conception pas à pas). La production de connaissances sur les processus de changement sur le temps long et l'identification des leviers et freins au changement rencontrés par les agriculteur·ice·s et nécessaire pour accompagner la transition agroécologique en viticulture. Cette compréhension passe par la caractérisation des dynamiques et l'évaluation des performances des exploitations agricoles et sous-systèmes au cours de leur transition. Il s'agit donc d'évaluer les états initiaux et finaux, mais aussi d'acquérir des connaissances sur les états intermédiaires des exploitations agricoles et de leurs sous-systèmes au cours des processus d'implémentation des leviers. Cette compréhension peut se faire à travers l'étude des **pratiques** et des **performances** des systèmes de production et de leurs sous-systèmes. De plus, l'étude des trajectoires nécessite l'acquisition de données sur plusieurs années, que ce soit des données associées aux pratiques ou aux performances : une approche « big data » peut-être propice pour ce type de travail.

3 Enjeux de la thèse

Dans un contexte de réduction de l'utilisation des pesticides, la production de connaissances en situation réelle de production permet d'identifier les leviers ainsi que les freins techniques et organisationnels qui influencent les changements de pratiques à l'échelle du système de production. Ces connaissances pourront être utilisées dans des processus de conception futurs pour outiller la transition vers des systèmes viticoles à faible utilisation de pesticides. L'analyse du processus d'implémentation peut passer par l'analyse de trajectoires de réduction de pesticides et des changements de pratiques associés.

Pour faciliter la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires et mieux accompagner les transitions agroécologiques, cette thèse vise à apporter de la connaissance sur les processus d'implémentation mis en œuvre dans les exploitations viticoles, par une approche d'analyse des trajectoires des performances (environnementales, techniques et économiques) et des changements de pratiques associés, ainsi que la manière dont elles sont implémentées au sein des systèmes de production.

Les enjeux scientifiques de cette thèse sont méthodologiques et cognitifs, ils portent à la fois sur la création de connaissances à intégrer pour l'accompagnement de la réduction des produits phytosanitaires et sur les méthodes d'analyse des trajectoires ex ante pour construire ces connaissances.

3.1 Les enjeux méthodologiques

Des limites méthodologiques ont été identifiées dans la littérature scientifique concernant les méthodes de caractérisation dynamique des processus de transition. Pour permettre la compréhension de la transition des exploitations viticoles et de leurs sous-systèmes dans le processus de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, il est nécessaire de considérer l'aspect multidimensionnel des transitions dans l'espace et dans le temps. Cette intégration peut se faire à travers l'analyse de leurs trajectoires en qualifiant leurs états, leurs dynamiques et les changements sous-jacents, mais aussi à travers l'étude des trajectoires de pratiques (identification et caractérisation des pratiques implémentées au cours du temps). Pour ce faire, plusieurs cadres conceptuels ont été mobilisés afin de proposer des méthodes pour caractériser le processus de réduction des pesticides des vignobles de façon dynamique, et les compromis réalisés entre les différentes performances techniques, environnementales et productives :

- Les phases de cohérences agronomiques (Moulin et al., 2008; Chantre and Cardona, 2014) pour étudier les trajectoires de changements de pratiques des viticulteur·ice·s et faire le lien entre changements techniques et performances.
- Le cadre ESR de Hill and MacRae (1996) a été utilisé pour caractériser des pratiques ou groupe de pratiques sur le temps long mais aussi pour calculer des indicateurs de vitesse et d'intensité de pratiques.
- Les indicateurs proposés par Martin et al. (2017) dans leur méthode d'évaluation de la vulnérabilité des exploitations laitières basée sur la caractérisation des performances de façon dynamique sur le temps long.
- L'utilisation de typologie de trajectoires qui permet de gagner en genericité face à la diversité de trajectoires existantes en les classifiant et en les caractérisant à l'aide d'indicateurs.

3.2 Les enjeux cognitifs

La littérature présente des limites importantes concernant les connaissances des processus et des dynamiques d'implémentation des solutions de conception en situation réelle de production. Pourtant, ces connaissances sont nécessaires pour accompagner les viticulteur·ice·s à la conception de nouvelles façons de produire mais aussi pour comprendre les liens entre changements techniques et performances sociotechniques, économiques et agronomiques.

- Un grand nombre de travaux a produit des connaissances sur la possibilité de réduire l'utilisation des pesticides à partir de l'expérimentation à l'échelle de la parcelle qu'il est nécessaire de compléter et éprouver à l'échelle exploitation agricole.
- Les travaux sur les trajectoires des agriculteur·ice·s lors de leur transition vers des systèmes à bas niveau d'utilisation d'intrants se concentrent principalement sur les changements de pratiques en lien avec les performances environnementales. Il est nécessaire d'intégrer dans la réflexion d'autres performances, ainsi que d'autres régions géographiques et gagner en généralité.

Ce travail de thèse a pour objectif de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les différentes trajectoires de pratiques qui permettent de réduire l'utilisation des pesticides en viticulture ?
- Quels sont les liens entre les changements techniques et la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires sur le temps long, à l'échelle du système de culture mais aussi à l'échelle du système de production ?
- Quels sont les compromis faits entre les différentes performances agronomiques, environnementales et socio-économiques, dans la transition vers la réduction de la dépendance aux produits phytosanitaires ?

3.3 Problématique de la thèse

Les enjeux scientifiques et opérationnels font émerger la question suivante :

Peut-on identifier des trajectoires de pratiques types permettant de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires ?

L'objectif de cette thèse est d'étudier les systèmes viticoles engagés dans une réduction des produits phytosanitaires à travers les trajectoires de pratiques et des performances associées pour comprendre et mieux accompagner la transition agroécologique. L'objet d'étude de cette thèse est le système de production viticole en transition agroécologique. Il se décline en trois sous-objectifs :

- (i) Evaluer et caractériser les trajectoires d'utilisation des pesticides (IFT, nombre de traitement) au sein de systèmes de culture engagés dans une réduction des pesticides dans une diversité de contexte de production
- (ii) Identifier et caractériser l'impact des changements de stratégie phytosanitaires sur les différentes performances (environnementales, techniques et économiques)
- (iii) Identifier et caractériser les changements de pratiques mis en œuvre au cours du temps par les viticulteurs engagés dans une réduction de PPs

4 Stratégie et démarche de la thèse

Pour répondre à ces objectifs, deux voies de travail seront explorées (Figure 1.7) :

- (i) Une approche big data s'appuyant sur la base de données DEPHY-AGROSYST, permettant une analyse globale de l'évolution des performances et des pratiques au cours du temps à une échelle nationale et individuelle dans un contexte de réduction de l'utilisation des pesticides. Les questions de recherche 1 et 2 seront ainsi traitées par cette approche.
- (ii) Une approche par enquêtes pour retracer plus finement les changements de pratiques dans le temps et répondre à la question de recherche 3. Les analyses couvrent un pas de temps de 10 ans, se basant sur un jeu de données à l'échelle nationale dans les principaux bassins viticoles français. La base de données permet de considérer l'évolution de l'utilisation des pesticides, les leviers mobilisés, l'impact des changements de stratégie phyto sur les différentes performances. Pour compléter la base de données, des enquêtes ont été réalisées pour identifier plus précisément les changements de pratiques implémentés au cours des trajectoires de réduction des produits phytosanitaires mises en œuvre par les viticulteur·ice·s. La combinaison de ces approches permet de considérer l'évolution de l'utilisation des pesticides sur un pas de temps long par l'approche des performances et des pratiques des systèmes de production. Pour répondre à l'enjeu d'avoir des résultats génériques, nos résultats s'articulent à deux échelles différentes i) l'échelle de la filière viticole et (ii) l'échelle individuelle.

Cette thèse s'articule autour de quatre articles dans des revues en comité de lecture (2 publiées et 2 en prévision). L'évolution de l'utilisation des pesticides à l'échelle nationale est d'abord caractérisée à partir de la base de données (Chapitre 3). Une typologie des trajectoire individuelle d'utilisation des produits phytosanitaires a ensuite été réalisée (Chapitre 4). Suite à l'analyse globale de l'évolution des pesticides, l'identification des potentielles synergies et antagonismes entre performances, en relation avec les différents types de trajectoires de diminution de produits phytosanitaire est faite (Chapitre 5). L'approche par enquêtes permet de retracer plus finement les changements de pratiques implémentés et de tracer les changements de phases de cohérence au sein des exploitations (Chapitre 6a).

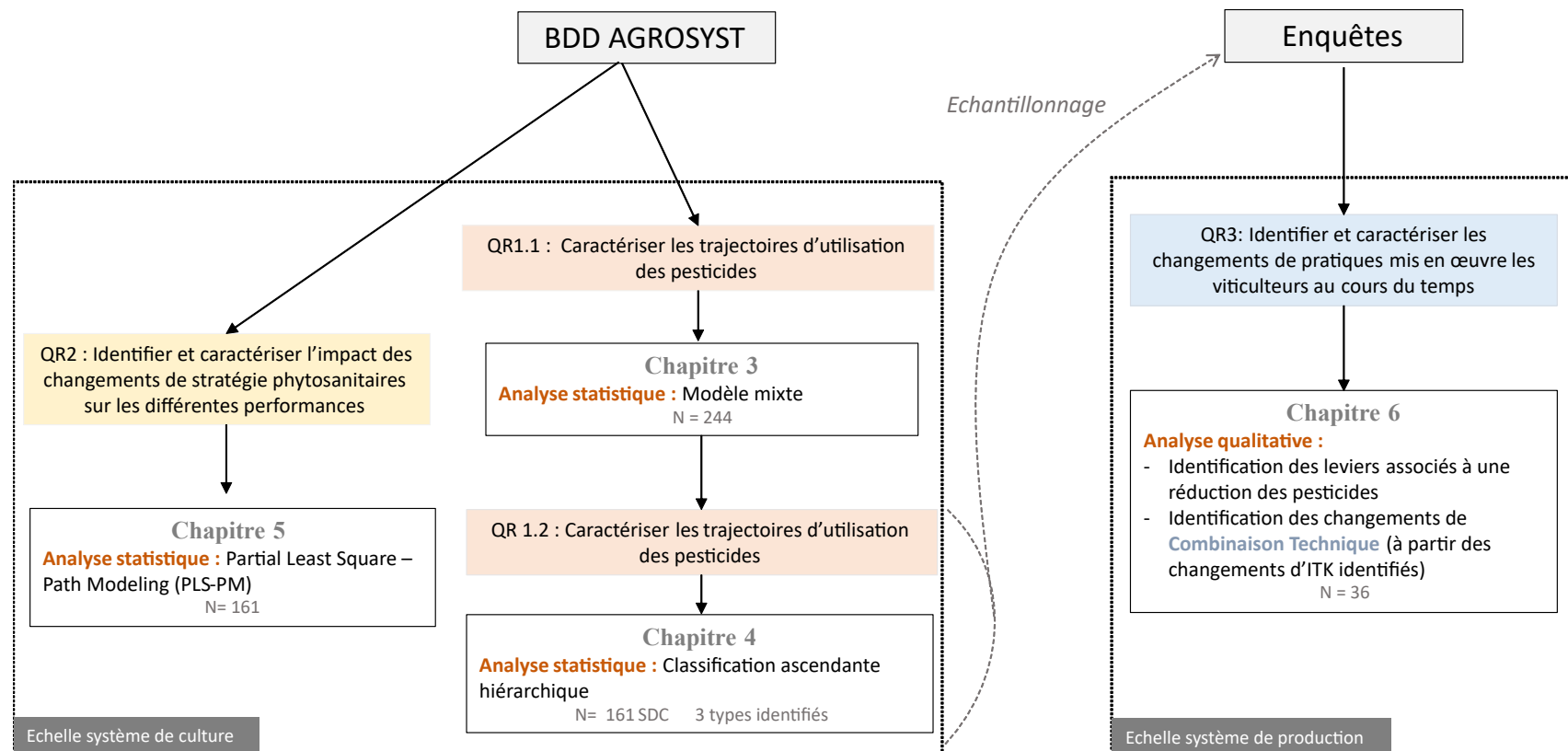


Figure 1.7 Démarche générale de la thèse

PARTIE II

Cas d'étude et démarche

Chapitre 2

Cas d'étude et démarche

Chaque chapitre, rédigé sous forme d'article publié, accepté, ou en prévision de soumission contient sa propre section de Matériels et Méthodes. Cette section détaille les éléments communs aux différents chapitres. Les références bibliographiques associées aux chapitres sous formes d'article sont rassemblées à la fin du manuscrit de thèse.

1 Eléments de fonctionnement et de gestion des systèmes viticoles

Les systèmes viticoles sont des systèmes à base d'une plante pérenne, la vigne (*Vitis vinifera*), cultivée principalement en culture pure et implantée pendant plusieurs décennies au sein d'une parcelle. Les systèmes viticoles représentent 3% de la surface agricole utile en France et sont répartis au sein de différents bassins viticoles.

1.1 Itinéraire technique

Pour favoriser le développement de la vigne et la qualité des baies, plusieurs travaux sont effectués dans la parcelle pendant le cycle végétatif de la vigne. Les pratiques culturales relèvent de décisions tactiques ou opérationnelles tandis que d'autres font l'objet de choix stratégiques à la plantation (*e.g.* la densité de pieds à l'hectare) et restent en place pendant toute la durée de vie de la parcelle (Barbier et al., 2011; Carbonneau et al., 2020). Les pratiques culturales réalisées déterminent ainsi l'architecture du vignoble et des ceps. L'itinéraire technique de la vigne est très spécifique en fonction des bassins viticoles. Certaines pratiques, comme le type de taille ou la largeur des rangs sont d'ailleurs contraintes par le cahier des charges des appellations. Les principales opérations sont détaillées ci-après. En hiver, une taille est réalisée pour façonner les bois du cycle

suivant. Cette pratique peut être précédée d'une pré-taille après les vendanges. Différentes formes de taille existent, elles vont déterminer l'architecture du feuillage, son exposition au soleil et vont donc influencer sur les rendements, l'état sanitaire des grappes et sur des composantes physiologiques telles que la transpiration foliaire.

Au printemps, des opérations « en vert » (*i.e.* mise en œuvre sur la vigne en phase végétative) sont mises en œuvre pour façonner l'architecture du feuillage et des grappes, notamment pour éviter l'entassement du feuillage et maîtriser la charge en fruits, modifiant ainsi le microclimat du cep, fortement corrélé au développement des maladies (Carbonneau et al., 2020; Pertot et al., 2017). Les travaux d'ébourgeonnage et d'épamprage sont ainsi réalisés pour retirer les bourgeons foliaires et rameaux sur les parties pérennes du cep (Carbonneau et al., 2020). Ces travaux peuvent se faire chimiquement avec des produits de contact, mécaniquement en utilisant des brosses rotatives ou encore manuellement (Gaviglio, 2021). Pour limiter la hauteur et l'épaisseur de la végétation, la taille en vert de l'extrémités des rameaux verticaux (écimage) et horizontaux (rognage) est réalisée. Avant la véraison, des travaux de vendanges en vert pour supprimer les grappes surnuméraires en fonction de la capacité des pieds de vignes peuvent parfois être effectués. A l'approche des vendanges, un effeuillage au niveau de la zone fructifère contribue à créer un microclimat favorable à la qualité sanitaire de baies. Le palissage permet également d'orienter la pousse de la végétation en hauteur plutôt qu'en largeur, et d'aérer les grappes.

Si la vigne nécessite peu d'apports d'azote, un programme de fertilisation est généralement pensé sur plusieurs années. La fertilisation (organique ou minérale) peut se faire par apport au sol, par irrigation (ferti-irrigation) ou par pulvérisation foliaire. La fertilisation se fait avant plantation (fumure ou fertilisation de fond), lors des années suivant la plantation et lorsque la vigne est en production (fertilisation de conduite).

Un travail du sol est réalisé plusieurs fois dans l'année avec un passage profond en automne et des passages d'entretien au printemps. Le travail et l'entretien du sol ont différents objectifs : amélioration de la structure et la portance du sol, enfouissement de l'amendement, gestion de l'enherbement semé ou spontané ou encore gestion des contraintes hydriques et azotées (Merot, 2022). Les pratiques de gestion du sol peuvent être différenciées entre le rang et l'inter-rang de la vigne. Le désherbage de la parcelle et l'entretien du couvert végétal peuvent se faire de façon mécanique, chimique ou thermique (Gonthier, 2021).

Pour les parcelles de vigne avec un enherbement spontané ou semé sur l'inter-rang, un entretien de la végétation est nécessaire. L'enherbement de l'inter-rang permet d'améliorer la structure et la porosité du sol, de réduire le ruissellement et d'améliorer sa fertilité. Les pratiques liées à la gestion de l'enherbement varient en fonction de la nature du couvert,

du mode de conduite de la vigne et de la période de présence du couvert (Carbonneau et al., 2020; Garcia et al., 2018).

La protection phytosanitaire est principalement menée au printemps. Les produits utilisés pour lutter contre les maladies et ravageurs peuvent être des produits de lutte chimique classiques conformément à la réglementation en vigueur ou bien des produits de biocontrôle. Les périodes de floraison et de véraison sont les périodes les plus sensibles du cycle phénologique de la vigne et nécessitent une vigilance accrue. Une fois le premier traitement réalisé, des traitements réguliers sont généralement faits tous les 14 à 20 jours environ sur une période allant de de mi-mai à mi-août.

Un itinéraire technique viticole type est présenté en Figure A.1.

1.2 Hétérogénéité des pressions cryptogamiques et des ravageurs en France

La vigne est cultivée principalement en culture pure et particulièrement sensible aux maladies cryptogamiques tel que le mildiou (*Plasmopara viticola*), l'oïdium (*Erysiphe necator*) et la pourriture grise (*Botrytis cinerea*). Ces maladies touchent les inflorescences des baies et peuvent être à l'origine de pertes de rendement jusqu'à 100% certaines années (Fermaud et al., 2016). Le black rot (*Phyllosticta ampellicida*) est aussi un agent pathogène pouvant engendrer des dégâts dans certains vignobles. Des ravageurs sont également visés par les traitements phytosanitaires : les tordeuses de la grappe, qui sont les chenilles des espèces de papillon *Lobesia botrana* et *Eupoecilia ambiguella*. Des traitements sont obligatoires pour lutter contre la flavescence dorée dont le vecteur est l'espèce de cicadelle *Scaphoideus titanus*. Le nombre de traitements obligatoires dépend de bassins viticoles. En 2022, dans le Languedoc, trois traitements étaient obligatoires contre la cicadelle tandis que dans le bordelais, aucun traitement n'était obligatoire.

L'utilisation de produits phytosanitaires reste la première solution mobilisée par les viticulteur·ice·s pour lutter contre les pressions de bioagresseurs et garantir une vendange qualitative et quantitative. Les fongicides représentent 80% des traitements réalisés (Simonovici and Caray, 2021). La vigne fait partie des cultures les plus consommatrices en produits phytosanitaires (Aubertot et al., 2005).

Le développement des agents pathogènes est lié aux conditions climatiques du vignoble, en particulier la pluviométrie, l'humidité et le vent (Mailly et al., 2017). Les différents bassins viticoles français sont situés dans des conditions pédologiques et climatiques variées. Ils peuvent être classés en trois grands ensembles climatiques (Mézière et al., 2009):

- Les régions au climat continental : Alsace, Champagne et Bourgogne
- Les régions au climat atlantique : Val de Loire, Bordelais et Sud-Ouest
- Les régions au climat méditerranéen : Vallée du Rhône, Midi, Provence et Corse

Du fait de cette hétérogénéité climatique entre les bassins viticoles, la pression phytosanitaire sera différente entre les bassins (Mézière et al., 2009).

Il existe deux gradients d'intensité, un gradient nord-sud et un gradient est-ouest (Figure 2.1). Les bassins viticoles au nord ont un IFT moyen plus élevé qu'au sud. Par exemple en 2019, l'IFT en Champagne était de 17.3 tandis que dans les Bouches-du-Rhône il était de 8 en 2019. De même, les bassins viticoles à l'ouest ont des IFT plus élevés qu'à l'est. L'IFT moyen pour 2019 était de 15.0 dans le Bordelais contre 8.7 en Provence.

Cette diversité de contextes climatiques et de pression de maladie est à prendre en compte dans la réduction des pesticides car les prises de risque seront différentes d'un bassin viticole à l'autre.

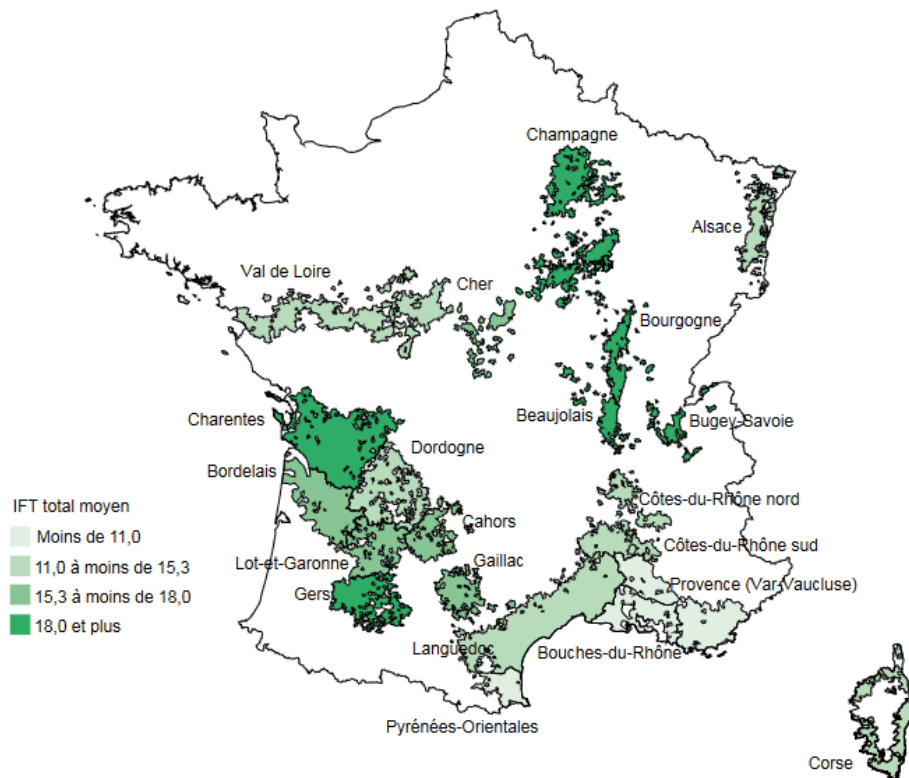


Figure 2.1 Disparité des IFT moyen (hors biocontrôle) en fonction des bassins viticoles.
Source : Agreste, 2016

2 Le réseau DEPHY-Ferme

En France, la transition agroécologique impulsée par le gouvernement repose principalement sur la réduction des produits phytosanitaires à travers la mise en place de différents programmes et mesures. Le plan **ECOPHYTO I**, lancé en 2008 à la suite du Grenelle de l'environnement (loi n° 2009-967), est un des plans précurseurs de cette transition annoncée. Ce plan avait pour objectif de réduire de moitié l'usage des pesticides en France en 10 ans. Cependant, aucune diminution des ventes de pesticides n'a été observée entre 2008 et 2013 (Hossard et al., 2017). Face à cet échec, un nouveau plan d'action, le plan 'Produisons autrement' a été lancé en 2015 comprenant le plan **ECOPHYTO II**.

Au sein du plan ECOPHYTO I, le réseau **DEPHY** (Démonstration Expérimentation Production de références sur les systèmes économes en pHYtosanitaire) a été mis en place en 2010. Le rôle du réseau est triple : il vise i) à produire des références sur les systèmes de culture économes en produits phytosanitaire, ii) à favoriser la transformation des systèmes de culture et iii) à servir de support de production de connaissances scientifiques. Plusieurs acteur·ice·s sont impliqu·e·s dans le réseau, des agriculteur·ice·s volontaires,

des chambres d'agriculture, des coopératives, des instituts techniques et des instituts de recherche (Institut National de la Recherche en Agronomie et Environnement).

Ce réseau concerne toutes les filières : la grande culture et polyculture-élevage (59%), la viticulture (18%), l'arboriculture (9%), les cultures légumières (9%), l'horticulture (2%) et les cultures tropicales (3%). Il se découpe en 2 parties : DEPHY-EXPE et DEPHY-FERME.

Le réseau **DEPHY-EXPE** se compose de stations expérimentales et de parcelles en établissements d'enseignement agricole. Des parcelles expérimentales à très bas niveaux d'intrants ont été conçues, mises en place et sont maintenant évaluées (Thiollet-Scholtus et al., 2019; Métral et al., 2018; Deliere et al., 2013).

Le réseau **DEPHY- FERME** est constitué de systèmes de culture dans des exploitations agricoles, formant un réseau de démonstration. Ces systèmes de culture sont rassemblés en groupes d'une dizaine d'agriculteur·ice·s en fonction de leur localisation. Chaque groupe est guidé par un·une **Ingénieur·e Réseau** (IR) également chargé·e de récolter les données sur les pratiques et les performances, et de les saisir dans la **base de données AGROSYST**. L'accompagnement par l'IR se fait de façon individuelle pour chaque agriculteur·ice. L'accompagnement est aussi collectif à travers la construction d'un projet collectif au sein de chaque groupe établi sur des thématiques spécifiques (couverture du sol, régulation biologique...). Les IR sont soutenus et accompagnés par des **Ingénieur·e·s Territoriaux** (IT), également en charge de faire le lien avec les acteur·ice·s régionaux·ales. Au niveau national, le réseau est supervisé par la *Cellule d'Animation Nationale* (CAN) en charge de communiquer sur les résultats du réseau et de faire appliquer les directives des instances nationales.

Le réseau DEPHY-Ferme a été partiellement renouvelé en 2016 et en 2021. En 2016 et en 2021, certain·e·s agriculteur·ice·s se sont engagé·e·s, d'autres se sont réengagé·e·s, tandis que d'autres encore sont sorti·e·s du réseau.

3 Démarche d'analyse de la réduction des produits phytosanitaires à partir de la BDD Agrosyst

3.1 Présentation de la base de données AGROSYST

Le système d'information AGROSYST fournit des informations sur les systèmes de culture engagés au sein du réseau DEPHY-Ferme et DEPHY-Expé. Il centralise les données sur le contexte de l'exploitation (surface agricole engagée, matériel agricole...), les interventions agricoles (fertilisation, travail du sol...) et les indicateurs agronomiques

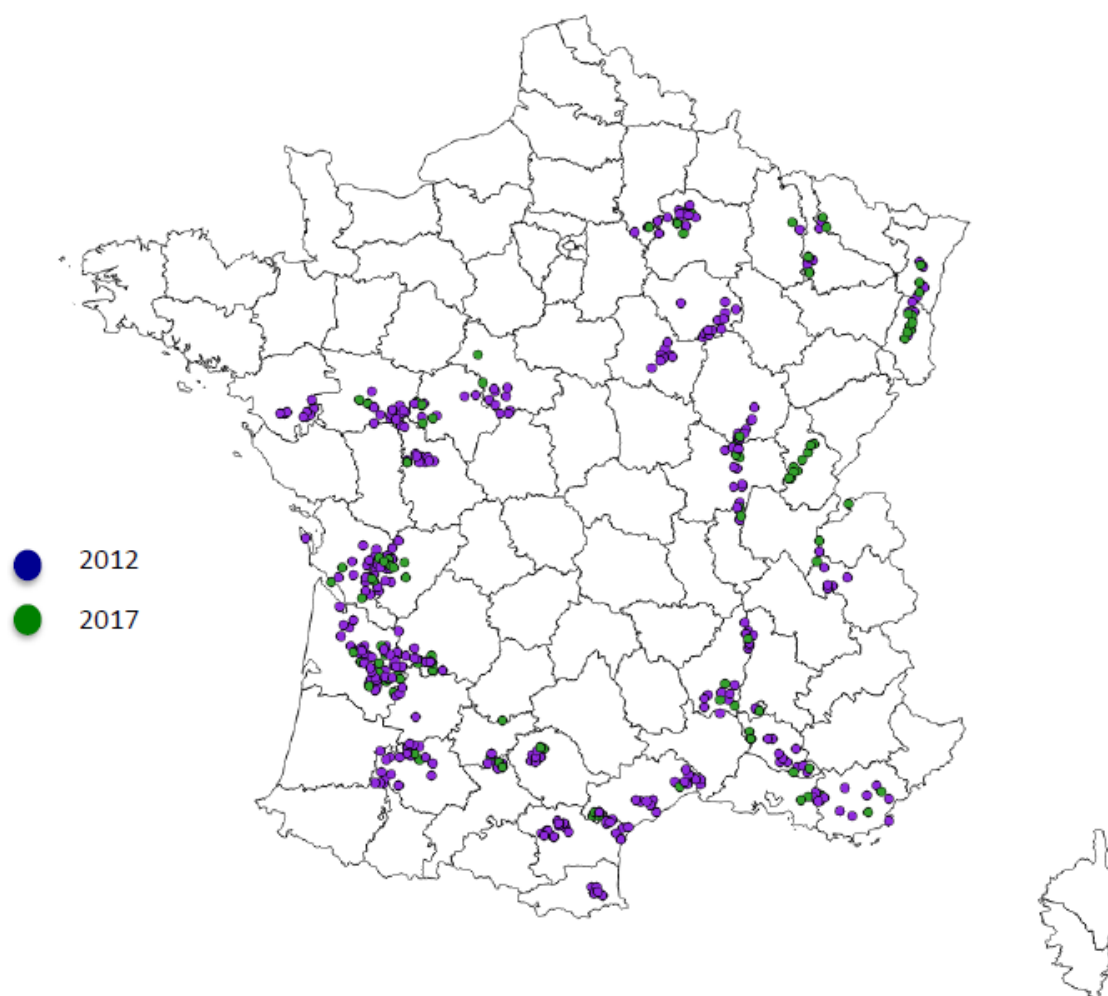


Figure 2.2 Répartition des fermes DEPHY en 2019 en fonction de leur année d'entrée dans le réseau : en violet les systèmes entrés entre 2010 et 2011, en vert les systèmes entrés en 2016

(rendements...). D'autres indicateurs de performances, calculés à partir des données brutes sont disponibles dans la base de données (quantité de cuivre appliquée, nombre de passages...). **Les exploitations engagées sont suivies à l'échelle du système culture. Le système de culture est défini dans le réseau DEPHY comme un ensemble de parcelles d'une même culture ayant des pratiques agricoles homogènes.** Le nombre de parcelles composant le système de culture n'est pas indiqué dans AGROSYST. Les données sur les pratiques et les performances sont récoltées chaque année et sont saisies au niveau de l'intervention. Lors de l'entrée de l'agriculteur-ice dans le réseau, un diagnostic est fait avec l'IR. Ce diagnostic est considéré comme le point de départ et correspond à la moyenne des trois années précédant l'engagement dans le réseau DEPHY.

3.1.1 Organisation de la base et différence entre les données synthétisées vs. réalisées

La base de données AGROSYST s'organise en différents fichiers en fonction de la nature des informations qu'ils contiennent. Les différents fichiers et leur contenu qui ont concerné cette thèse sont présentés en annexe (Figure A.2). Les systèmes de culture sont anonymes et un code DEPHY leur est attribué. Certaines variables comme les interventions culturales peuvent être présentées de façon réalisée ou bien synthétisée. Les actes réalisés correspondent à la description de ce qu'il s'est produit réellement sur chacune des parcelles du système de culture engagé dans DEPHY. Les actes synthétisés correspondent à ce qu'il s'est produit en moyenne sur l'ensemble des parcelles engagées dans DEPHY. Dans la filière viticole, c'est la saisie synthétisée qui a été privilégiée.

3.1.2 Point Initial (PZ0)

Lorsque les agriculteur·ice·s s'engagent au sein du réseau DEPHY, un bilan de leurs pratiques est réalisé à leur entrée dans le réseau DEPHY avec l'IR. Ce bilan intègre en synthétisé les données de pratiques et performances des trois dernières années avant l'entrée dans le réseau sur la période 2009-2011. Pour chaque système de culture et pour chaque variable de performances, on calcule la moyenne des années 2009-2011 pour obtenir la valeur au PZ0. Pour les agriculteur·ice·s qui se sont engagé·e·s en 2016, les données de 2014 à 2016 servent à établir le point initial.

3.1.3 Base de données Performances

En complément de la stricte BDD AGROSYST, un travail de calcul d'indicateurs à partir des données brutes de la base de données a été réalisé au sein de la CAN. Les indicateurs calculés et disponibles dans une BDD complémentaire « performances » se concentrent sur les performances économiques, environnementales et sociales. La table contenant les différents indicateurs de performances nous a été transmise au cours de l'année 2021.

3.2 Echantillon d'étude pour ce travail de thèse

Nous avons travaillé avec les données extraites le 16 décembre 2020. Au total, les données de 631 systèmes de culture sont compilées dans la base de données (voir Figure 2.3). La thèse ayant débuté en 2019, les systèmes de culture entrés en 2016 n'avaient que 3 ans seulement de données disponibles (2016, 2017, 2018) ce qui est trop court pour travailler les trajectoires, en particulier avec des données synthétisées. Nous avons donc choisi de traiter les systèmes de culture entrés entre 2010 et 2011 pour étudier l'évolution des systèmes de culture au cours du temps avec un plus grand nombre d'années. Le nombre de système de culture entrés entre 2010 et 2011 représente 326 systèmes de culture. En 2019, 27% de ces systèmes étaient en agriculture biologique (AB) et 73% en agriculture conventionnelle. **Sur les 326 systèmes de culture sélectionnés, le nombre de systèmes de culture réellement étudiés varie entre les différentes analyses réalisées en fonction de la complétude des données.**

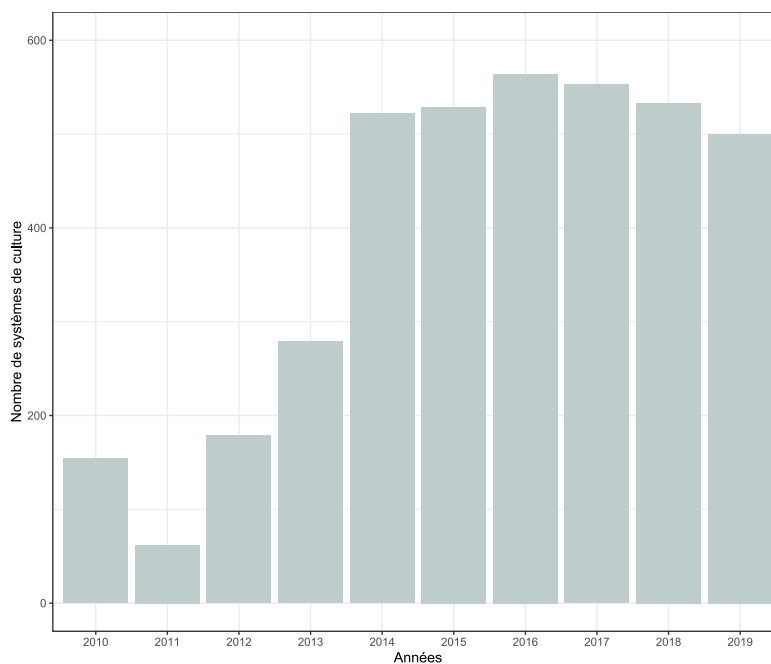


Figure 2.3 Nombre de systèmes de culture présents dans la base de données

3.3 Différents indicateurs pour caractériser l'évolution de l'utilisation des pesticides et des performances : description et calcul à partir des données brutes de la BDD AGROSYST

3.3.1 Calcul de l'Indicateur de Fréquence de Traitement

Au sein du Plan ECOPHYTO, dans lequel s'inscrit le réseau DEPHY, un des principaux indicateurs pour évaluer et quantifier l'évolution de l'utilisation des pesticides est l'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) (Guichard et al., 2017). Cet indicateur est un indicateur intégré renseignant sur le niveau d'utilisation des produits phytosanitaires, particulièrement adapté aux produits de synthèse. Il permet de suivre l'évolution des pratiques concernant l'utilisation des produits phytosanitaires et les marges de progrès réalisées quelque soient les produits utilisés. L'IFT comptabilise le nombre de doses de référence de produits commerciaux (possédant une Autorisation de Mise sur le Marché AMM) utilisés sur un hectare sur une campagne culturale

L'IFT peut se calculer de différentes manières :

- **À la culture** – en se basant sur les doses homologuées qui sont définies pour chaque produit et culture
- **À la cible** – en se basant sur les doses homologuées qui sont définies pour chaque produit et culture et cibles visées par les traitements, les doses homologuées pouvant varier d'une cible à l'autre pour un même produit.

Notre choix s'est porté sur l'IFT à la cible car il permet de calculer un IFT par catégorie de cible visée (fongicide, herbicide et insecticide) et donc d'identifier plus finement les évolutions en terme de stratégie phytosanitaire. Lors du démarrage de la thèse (fin 2019), seul l'IFT historique était fourni dans la BDD AGROSYST. Nous avons dû calculer les IFT à la cible à partir des données brutes contenues dans la BDD. Le calcul de l'IFT à la cible est détaillé dans l'Equation 2.1.

$$IFT_{traitement} = \frac{Dose_{pulvérisée}}{Dose_{recommandée}} \times \frac{Surface_{pulvérisée}}{Surface_{totale}} \quad (2.1)$$

Equation 2.1 : Calcul de l'IFT pour un traitement à l'échelle du système de culture (Pingault et al., 2008). La dose pulvérisée correspond à la dose de pesticide pulvérisée ; la dose recommandée correspond à la dose recommandée par le Ministère de l'Agriculture pour un produit et une cible donnés. Les doses recommandées sont issues des fichiers de la base de données e-phy disponible en ligne (<https://alim.agriculture.gouv.fr/ift/fichiers-csv>, visitée le 15/01/2020). La Proportion de la Surface Concernée par l'intervention phytosanitaire (PSCi phyto), comprise entre 0 et 1, est disponible dans la base de données DEPHY.

Les différentes variables utilisées pour calculer l'IFT sont indiquées dans le Tableau 2.2. Pour identifier les doses recommandées pour l'ensemble des produits autorisés nous nous sommes appuyées sur les données e-phy (<https://alim.agriculture.gouv.fr/ift/fichiers-csv>). La liste des produits autorisés et les doses recommandées ont pu évoluer d'une année sur l'autre depuis 2010. Afin d'être certaines de refléter des changements de stratégie phytosanitaire et pas des changements réglementaires, nous avons choisi de ne travailler qu'avec une seule valeur de dose recommandée sur toute l'étendue temporelle de l'étude. Les valeurs e-phy 2020 ont été choisies comme valeurs de référence afin de caractériser les produits les plus récents. Pour les produits retirés du marché qui ne sont plus listés en 2020, nous avons choisi comme référence les doses autorisées les plus proches temporellement parlant, à savoir 2019, ou un peu plus anciennes si 2019 n'était pas disponible non plus, jusqu'en 2014.

Du fait de la forte hétérogénéité de saisie dans la base de données, la prise en main de la base de données, sa mise en forme et le travail de calcul des IFTs à la cible ont été particulièrement longs, de l'ordre de 5 mois. Certaines variables telles que le nom des produits ou le nom des cibles ont demandé un travail important d'homogénéisation pour permettre le calcul des IFT ensuite. Une fois ce travail d'homogénéisation fait, l'IFT a d'abord été calculé pour chaque traitement (un produit*une date*un système de culture). Puis, les IFT par traitement phytosanitaires ont été sommés par cible (fongicides, herbicides et insecticides) par année et par système de culture. La somme de tous les IFTs par traitement, toutes cibles confondues, permet d'obtenir l'IFT annuel pour chaque système de culture.

Des seuils ont été posés afin de filtrer des systèmes de culture pour lesquels la saisie était considérée comme erronée : un nombre de traitements trop bas ou trop élevé par exemple, un IFT herbicide supérieur à 5, un IFT total supérieur à 30. Sur les 326 systèmes de culture sur lesquels nous avons travaillé au départ, **244 ont été gardés après les**

Tableau 2.1 Liste des différents IFTs calculés et utilisés pour suivre l'évolution de l'utilisation des pesticides au sein du réseau DEPHY

Nom	Abréviation	Type de produits comptabilisés
IFT hors biocontrôle	IFT	Tous (herbicides, insecticides, fongicides) – sauf biocontrôle
IFT herbicide	IFT _h	Herbicides – sauf biocontrôle
IFT insecticide	IFT _i	Insecticides – sauf biocontrôle
IFT fongicide	IFT _f	Fongicides – sauf biocontrôle
IFT biocontrôle	IFT _{biocontrôle}	Produits compris dans la liste des produits de biocontrôle établie par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation Français.

différents tris.

Les produits de biocontrôle étant considérés comme un levier de réduction des pesticides, un IFT spécifique à ces produits a été calculé séparément de l'IFT hors biocontrôle pour les produits de synthèse. Les mêmes règles de décisions sont appliquées pour le calcul de l'IFT hors biocontrôle. La base de donnée e-phy utilisée pour les doses recommandées permet également d'identifier les produits inclus dans la catégorie biocontrôle. Les différents IFT calculés à partir de la base de données sont résumés dans le Tableau 2.1.

3.3.2 Comparaison des pratiques phytosanitaires du réseau avec le vignoble français

Afin de comparer les données de la base de données DEPHY avec les pratiques moyennes du vignoble français, nous avons utilisé les données du Service de la Statistique et de la Prospective (SSP) du ministère français en charge de l'agriculture. Cette base de données recueille des informations sur les pratiques culturales dans le pays. Les données sont collectées tous les 3 ans à l'échelle de la parcelle et les enquêtes sont réalisées sur un échantillon représentatif de 4000 exploitations. Les données utilisées sont uniquement celles des indicateurs d'intensité de traitement dans chaque région viticole (Indice de Fréquence de Traitement IFT). Les données issues des enquêtes de 2010, 2013, 2016 et 2019 ont été utilisées. Les valeurs d'IFT moyen par bassins viticoles sont disponible sur le site AGRESTE. Le nombre de bassins viticoles et les noms associés variant chaque année enquêtée, un tableau de correspondance a été fait (voir Appendix A).

Tableau 2.2 Récapitulatif des variables utilisées en fonction de la base de données dont elles sont issues. Les lignes grisées indiquent les variables utilisées pour le calcul de l'IFT à la cible

BDD	Table Agrosyst	Nom de la variable	Définition	Nature de la variable	Unité	Variables calculées
Agrosyst	Toutes les tables	domaine_campagne	Année de l'intervention	Quantitative	Ø	/
Agrosyst	Intervention_synthétisé	date	Date de l'intervention	Quantitative	jour/mois	IFT, nombre de passage, nombre de traitement
Agrosyst	Toutes les tables	sdcode_deploy	Système de culture DEPHY anonyme	Quantitative	Ø	/
Agrosyst	domaine	bassin_viticole	Bassin viticole	Qualitative	Ø	/
Agrosyst	Intrants_synthétisé	produit	Produit	Qualitative	Ø	IFT, nombre de traitement
Agrosyst	Intrants_synthétisé	type de produit	Type de produit (fongicide, insecticide ou insecticide)	Qualitative	Ø	IFT et IFT à la cible
Agrosyst	Intrants_synthétisé	dose	Dose	Quantitative	kg/ha ou L/ha ou unité/ha	IFT et IFT à la cible
Agrosyst	Intrants_synthétisé	cible	cibles	Qualitative	Ø	IFT et IFT à la cible
Agrosyst	Intervention_synthétisé	psci_phyto	Proportion de surface traité	Quantitative	Ø	IFT et IFT à la cible
Performance	/	rendement_moyen	Rendement moyen observé pour une année donnée	Qualitative	hl.ha ⁻¹	/
Agrosyst	sdcode	mode_conduite	Mode de conduite (conventionnel, agriculture biologique, en conversion)	Qualitative	Ø	/
e-phy	/	biocontrôle	1 si le produit est un produit biocontrôle, sinon 0	Qualitative	Ø	IFT biocontrôle
e-phy	/	dose_recommande	dose recommandée par produit et par cible visée	Quantitative	kg.ha ⁻¹ ou L.ha ⁻¹ ou unité.ha ⁻¹	IFT, IFT à la cible, IFT biocontrôle
Performance	/	qte_cuivre_SDC	Quantité de cuivre	Quantitative	kg.ha ⁻¹	/
Performance	/	qte_soufre_SDC	Quantité de soufre	Quantitative	kg.ha ⁻¹	/
Performance	/		Nombre de produits CMR appliqués	Qualitative	Ø	/
Performance	/	CM	Charges de mécanisation	Quantitative	€·ha ⁻¹	/
Performance	/	CO	Charges opérationnelles	Quantitative	€·ha ⁻¹	/
Performance	/	Consommation_fuel	Consommation de carburant	Quantitative	L.ha ⁻¹	/
Performance	/		Temps de travail manuel	Quantitative	€·ha ⁻¹	/
Performance	/		Temps de travail mécanique	Quantitative	€·ha ⁻¹	/
Agreste	/	IFT_moyen	IFT moyen par bassin viticole	Quantitatif	Ø	IFT normalisé

3.3.3 Autres indicateurs relatifs à la protection phytosanitaire

En complément de l'IFT, d'autres indicateurs ont été calculés. A partir de la BDD AGROSYST, d'autres indicateurs relatifs à la protection phytosanitaire ont pu être calculés, comme le nombre de passages effectués et le nombre de traitements sur des périodes de l'année bien précises ou sur l'année complète ont été calculés.

Dans la BDD complémentaire de Performances fournie par la CAN, le nombre de produits CMR (Cancerigènes, Mutagènes et Reprotoxiques) utilisés, ainsi que les quantités de cuivre et de soufre appliqués sur une année culturale ont aussi été utilisés pour identifier des évolutions dans les pratiques phytosanitaires.

3.3.4 Etude de l'évolution des performances agronomiques, économiques et organisationnelles

Nous avons utilisé des données pour étudier l'évolution les différentes performances organisationnelles, agronomiques et économiques issues de la BDD AGROSYST et complémentaire Performances.

Des indicateurs classiques tels que la marge semi-nette n'étant pas disponibles pour la filière viticole, les performances économiques sont ici caractérisées par différentes variables relatives aux charges :

- Les **charges opérationnelles** (euro.ha-1) correspondant aux dépenses liées à l'achat des intrants. Elles sont calculées sur la base d'un référentiel AGROSYST,
- Les **charges de mécanisation réelles** (euro.ha-1),
- Les **charges de main d'œuvre tractoriste et de main d'œuvre pour les opérations manuelles** (euro.ha-1)

Des performances sociales telles que le temps de travail mécanique (unité) et manuelle (unité) ont également été calculées.

Pour comparer les performances énergétiques en relation avec l'évolution d'utilisation des pesticides, nous avons pris en compte la **quantité de carburant utilisée lors de l'ensemble des interventions** (L.ha-1) qui est calculée par la cellule de la BDD AGROSYST à partir de références issues du BCMA (Bureau Commun du Machinisme Agricole). Toutes les variables utilisées sont compilées dans le Tableau 2.2.

3.4 Analyses statistiques réalisées sur les indicateurs issus de la base de données AGROSYST

3.4.1 Analyses portant sur la significativité de l'évolution de variables dans le temps

Pour évaluer l'évolution dans le temps de chaque indicateur, deux méthodes différentes ont été utilisées :

- *Les modèles linéaires mixtes* : Un travail avec des modèles linéaires mixtes prenant en compte l'effet région et l'effet millésime a été réalisé. Ces analyses ont permis d'identifier et de quantifier les évolutions des performances liées à l'utilisation des pesticides au cours du temps. Pour analyser les évolutions et observer si celles-ci connaissaient des hausses ou des baisses significatives, nous avons travaillé avec des modèles linéaires mixtes tenant compte d'un éventuel effet année et région.

- *La comparaison de moyennes entre point initial et point final* : Pour identifier si une évolution de la variable étudiée s'était produite après l'entrée dans le réseau, nous avons calculé la différence entre le point final (2017, 2018 et 2019) et le point initial pour chaque système de culture. Un t-test a été effectué pour voir si le delta Point final-Point initial était significativement différent de zéro pour les variables étudiées.

3.4.2 Typologie de trajectoires d'utilisation des pesticides

Un travail pour qualifier plus précisément les trajectoires de transition des viticulteur·ice·s du réseau DEPHY a été réalisé. Ce travail s'est basé sur la méthode de Martin et al. (2017) qui évalue la vulnérabilité des exploitations d'élevage laitier à travers le temps via la mise en place d'un modèle linéaire en utilisant les données brutes qui permet d'extraire différents indicateurs. Il visait à identifier différentes trajectoires d'utilisation des pesticides pour qualifier au mieux les trajectoires individuelles d'utilisation des pesticides à partir d'une typologie. Pour qualifier la transition, différents indicateurs ont été extraits permettant de qualifier l'état initial, le sens de la transition et la trajectoire.

3.4.3 Analyse des compromis réalisés au cours du temps

Un travail sur une méthode pour qualifier les co-variations faits entre les performances au cours de la réduction de l'utilisation des pesticides a été réalisé. Ce travail s'est basé sur la méthode statistique Partial Least Square – Path Modelling (PLS-PM) pour identifier les corrélations entre l'évolution de différentes performances agronomiques (rendement), sociotechniques (temps de travail) et économiques (coûts) au cours du temps en utilisant des indicateurs de pentes et de points initiaux.

Toutes les analyses et les calculs d'indicateurs ont été réalisés avec le logiciel R-Studio (version 3.6.2) à l'aide des packages tidyverse (Wickham et al., 2019), lme4 (Bates et al., 2015), broom (Robinson and Hayes, 2020) et plsrm (Sanchez et al., 2015).

4 Enquêtes auprès des viticulteur·ice·s du réseau DEPHY

La base de données AGROSYST est un bon outil pour travailler sur les évolutions de performances (IFT, rendements...). Les pratiques mises en place par les viticulteur·ice·s du réseau sont également compilées dans la BDD. Les interventions et les outils associés sont saisis dans AGROSYST dans les tables `intervention_synthétisée` et `matériel`. Le stage de fin d'études d'ingénieur de Margaux Guy visait à identifier les changements de pratiques à partir de la BDD. La forte hétérogénéité de saisie a demandé un lourd travail de réécriture. Les résultats ne sont pas présentés dans ce manuscrit car ils demandent à être affinés encore. Dans tous les cas, les pratiques saisies ne permettent pas d'identifier des changements fins tels que des modifications dans les modes de taille ou encore des modalités de gestion du couvert tel que le pâturage par exemple.

Afin d'identifier plus finement les changements mis en place par les viticulteur·ice·s du réseau, une deuxième partie du travail présentée dans cette thèse s'appuie sur des enquêtes chez des viticulteur·ice·s du réseau. Ces enquêtes visaient également à capter plus d'informations concernant le contexte de l'exploitation notamment sur le parcellaire et le mode de commercialisation.

4.1 Echantillonnage des exploitations enquêtées

Au total, 36 viticulteur·ice·s ont été enquêté·e·s entre avril 2021 et avril 2022. Le choix des viticulteur·ice·s enquêté·e·s s'est fait en fonction de plusieurs critères :

- **L'année d'entrée** : les viticulteur·ice·s sélectionné·e·s sont entré·e·s dans le réseau entre 2010 et 2011. Ce choix était nécessaire afin de pouvoir travailler sur un nombre suffisant d'années.
- **La zone climatique** : nous avons choisi d'aller enquêter des viticulteur·ice·s présent·e·s dans une diversité de contextes climatiques. Nous avons considéré trois grands contextes climatiques : la zone Méditerranéenne (Languedoc et Vaucluse), la zone Atlantique (Bordelais et Val de Loire) et la zone continentale (Champagne). Ces trois zones climatiques se distinguent par des différences de températures et de précipitations (en quantité et en répartition) (Mézière et al., 2009). Les pressions phytosanitaires sont par ailleurs différentes entre les zones. Nous savons que les pressions maladies, notamment mildiou, sont fortement dépendantes des conditions climatiques. Dans la zone méditerranéenne, la pression du mildiou est plus faible

en raison d'une humidité plus faible au printemps, tout comme la pression des adventices. Dans la zone continentale, la densité de la vigne est élevée ce qui augmente la sensibilité de la vigne à l'oïdium et au mildiou. Les températures sont plus basses et le débourrement de la vigne a lieu plus tardivement que dans les deux autres zones. En zone atlantique, la pression du mildiou et des adventices est élevée du fait des fortes précipitations. Le nombre d'intervention y est donc plus élevé.

- **Le type de trajectoire d'IFT** : au sein de chaque zone climatique, des systèmes ayant suivi trois types de trajectoires d'IFT (résultats issus du Chapitre 4) ont été sélectionnés :
 - * Le cluster 1, partant d'une faible utilisation de pesticides et réduisant faiblement,
 - * Le cluster 2, avec un faible IFT au départ et réussissant à réduire l'utilisation de produits phytosanitaires,
 - * Le cluster 3, partant d'une forte utilisation des pesticides et réduisant fortement l'IFT.

Les clusters de trajectoire d'IFT permettent de garantir une diversité de trajectoires de pratiques au sein de chaque zone géographique et donc une diversité de situations pour des conditions pédoclimatiques similaires.

- **Le mode de conduite** : dans chaque zone climatique, des systèmes en AB et en agriculture conventionnelle ont été sélectionnés. Il n'était pas possible d'avoir des proportions similaires entre les types x régions et mode de conduite. En effet, nous n'avons pas identifié de systèmes de culture en AB dans le type 3 sur la BDD. Nous faisons l'hypothèse que les leviers mobilisés en AB car les systèmes en AB utilisent déjà plus de produits de synthèse lessivables et non systémiques (cuivre et soufre).

Les exploitations en raisin de table étaient exclues, les pratiques associées étant trop différentes des exploitations en raisin de cuve.

4.2 Entretiens et données collectées

Les entretiens réalisés étaient semi-directifs. Une trame d'enquête reprenant les principales informations à collecter était utilisée comme support au cours de l'entretien (voir Figure A.3). Toutes les informations étaient retranscrites à la main, les entretiens n'ont pas été enregistrés. En cas de questions, les viticulteur·ice·s étaient rappelé·e·s pour préciser certains points.

L'entretien commençait par une description précise de l'exploitation et de son contexte. Puis l'itinéraire technique était retracé ainsi que les changements de pratiques depuis l'entrée du réseau à l'aide d'une frise temporelle (voir Figure A.4). Pour la suite des entretiens, nous nous sommes appuyées sur différents supports, certains issus des données de la BDD. La liste de matériel de chaque viticulteur·ice était extraite de la base de données pour chaque exploitation enquêtée. Cette liste permettait de faciliter la collecte des informations relatives au parc matériel et l'identification de l'achat d'outils associés à la mise en place de nouvelles pratiques. La trajectoire d'IFT a aussi été extraite de la BDD et a servi de support à la discussion.

L'ensemble des données collectées a été organisé ensuite sous Excel et analysé sous R à l'aide du package *tidyverse* (Wickham et al., 2019) et *ggplot2* (Wickham, 2016).

4.3 Analyse des données d'enquêtes

4.3.1 Caractérisation de l'échantillon

Dans un premier temps, l'échantillonnage a été caractérisé plus précisément à l'aide des données de contexte collectées lors des enquêtes :

- La surface agricole utile (SAU)
- L'appellation (AOP/IGP)
- Le mode de commercialisation (cave particulière ou cave coopérative)
- Le prix de vente moyen (bas, moyen, haut)
- Les objectifs de rendement ($hL.ha^{-1}$)
- Unité de Travailleur Humain (UTH)

4.3.2 Trajectoire globale des changements de pratiques

Pour caractériser et comparer les changements implémentés dans le temps en fonction des types de trajectoires d'IFT, différents cadres conceptuels ont été utilisés :

- **Les modes d'action formalisés par (Aubertot et al., 2010)**

Les leviers de réduction d'utilisation des intrants identifiés au cours des enquêtes ont été classifiés en quatre modes d'action : (i) Une **action sur le stock** permet de réduire le stock initial de bioagresseurs, (ii) une **atténuation** vise à minimiser les dégâts lorsque la culture et le bioagresseur sont en contact en augmentant la compétitivité de la culture et en évitant les conditions favorables au développement et à la propagation des bioagresseurs. (iii) Un **évitement** vise à éviter la concordance entre la phase de contamination ou d'attaque du bioagresseur et la période de sensibilité de la culture. (iv) Une **solution de rattrapage** mise en place lorsque les précédentes actions ne suffisent pas et que les symptômes des maladies, ravageurs ou adventices sont déjà visibles.

- **La modélisation conceptuelle d'après Lamanda et al. (2012)**

L'analyse des leviers s'appuie sur une représentation conceptuelle du système viticole en lien avec la réduction des pesticides et développée précédemment dans l'UMR ABSys. Cette représentation s'appuie sur un découpage du système viticole en composantes qui s'apparentent à des compartiments biophysiques et techniques du système viticole : les traitements phytosanitaires, la vigne, la gestion sous le rang et dans l'inter-rang concerne la dimension parcellaire et un compartiment exploitation lorsque les changements sont implémentés à une échelle supra-parcellaire.

Chaque changement observé pendant les enquêtes a donc été associé à un composant du système. On parlera de changement systémique quand le changement identifié impactera plusieurs composantes du système viticole.

- **Le cadre Efficiency, Substitution, Redesign formalisé par Hill and MacRae (1996) et adapté par Merot et al. (2019)**

Chaque levier est caractérisé par une intensité de changement vue comme l'intensité du pas qui est fait vers la réduction des intrants. Quatre niveaux d'intensité (E, S, Ro ou Re) sont définis par Merot et al. (2019) s'appuyant sur Hill and MacRae (1996): (i) **l'efficience (E)** qui traduit une réduction des intrants, (ii) **la substitution (S)** remplacement d'un intrant ou d'une opération par une autre, (iii) **la réorganisation (Ro)** pour qualifier le changement d'une opération technique conduisant à repenser une ou deux autres opérations techniques et (iv) **la reconception (Re)** qui correspond au changement de toute une partie du système technique. Une nouvelle catégorie est rajoutée, **Arrêt (A)**, pour rendre compte de l'arrêt d'une pratique non remplacée (exemple : arrêt des anti-germinatifs).

4.3.3 Trajectoire individuelle des changements de pratiques

Nous avons par la suite cherché à reconstituer des stratégies phytosanitaires et techniques vue comme des combinaisons de pratiques afin de retracer plus finement les trajectoires de changements prises par les exploitations enquêtées et d'identifier des phases de cohérence en s'appuyant sur les travaux de Chantre et al. (2015) et Mawois et al. (2019). Une phase de cohérence est définie par Moulin et al. (2008) comme un changement de fonctionnement important de l'exploitation affectant la cohérence de l'exploitation.

L'ensemble de ces caractérisations a ensuite été analysé dans le temps (analyse de la dynamique de modes d'action, de dynamiques d'ESR, et de stratégies techniques) et par type de trajectoires d'IFT.

Enfin, pour chaque exploitation, des trajectoires des combinaisons techniques combinant gestion des maladies cryptogamiques et gestion de l'herbe ont été retracées. Les combinaisons techniques mises en place sont inspirées de la méthode de Moulin et al. (2008) et Chantre and Cardona (2014).

5 Récapitulatif des méthodes et de l'échantillonnage

La Figure 2.4 présente la démarche de cette thèse dans son ensemble avec les différentes questions de recherches et les chapitres du manuscrit en lien avec l'origine des données et les méthodes de traitements de données associées.

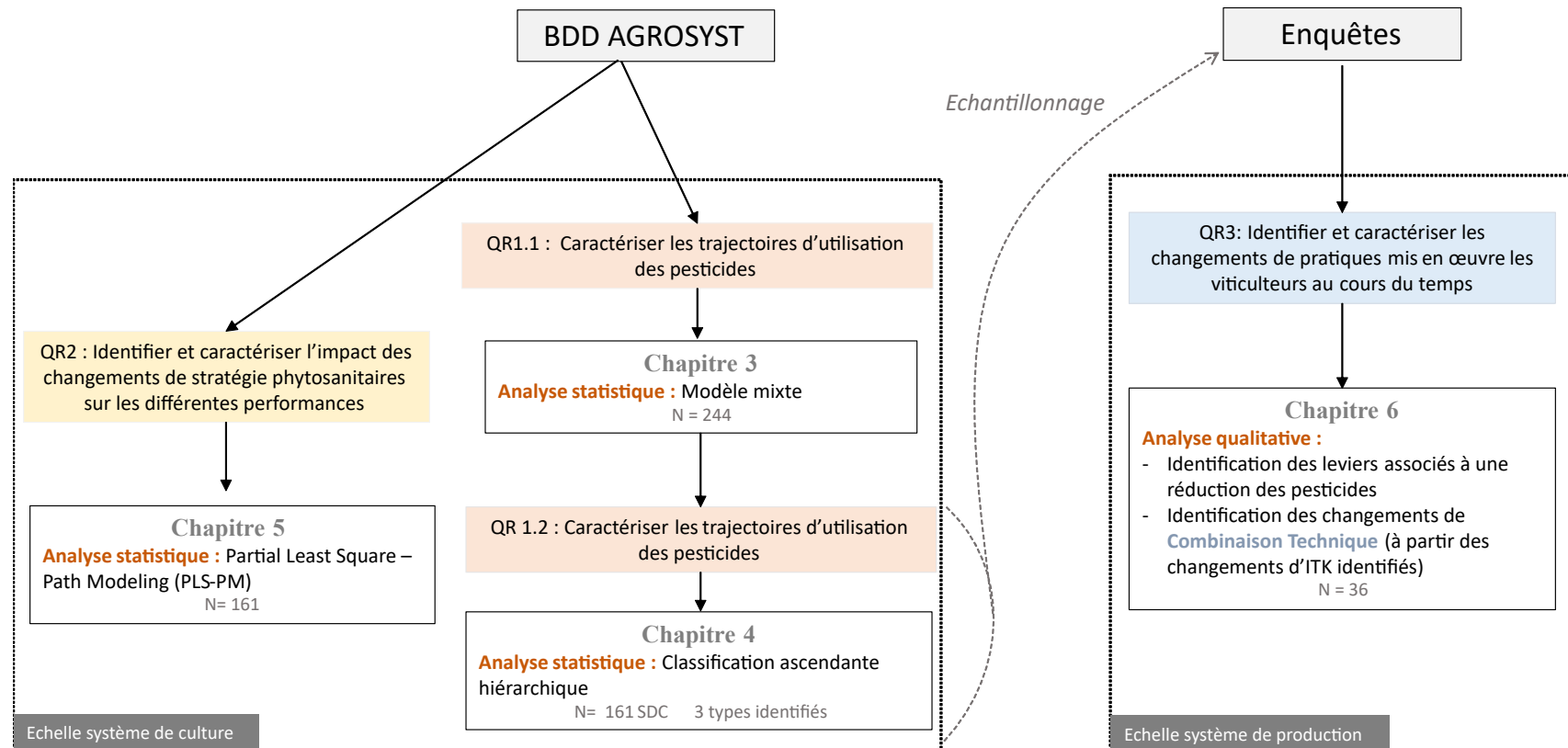


Figure 2.4 Lien entre les différents chapitres et analyses réalisées

PARTIE III

Résultats

Chapitre 3

Reducing Pesticide Use in Vineyards. Evidence from the Analysis of the French DEPHY Network

Contenu du chapitre : Dans ce chapitre 3, nous avons caractérisé l'évolution de l'utilisation des pesticides à travers l'indicateur IFT et de différents facteurs qui influencent l'utilisation des pesticides. L'analyse est réalisée à l'échelle du réseau DEPHY. Cette première analyse globale a été réalisée sur un total de 244 systèmes de la base de données AGROSYST. Ces systèmes sont entrés dans le réseau entre 2010 et 2012 et se répartissent sur 12 bassins viticoles.

Résultats principaux :

- Une réduction de l'IFT de 32% sur 10 ans a été identifiée à l'échelle du réseau DEPHY. Cette réduction concerne principalement les fongicides.
- Une forte variabilité inter- et intra-annuelle a été identifiée. Cette variabilité s'explique par l'effet millésime et l'effet bassin viticole.
- Les premiers leviers de réduction identifiés en se basant uniquement sur l'évolution de l'IFT sont l'augmentation de l'utilisation des produits de biocontrôle et la réduction des doses par traitement.
- Ces leviers impactent les performances agronomiques et techniques. En effet, une baisse des rendements est observée sur la période d'analyse, rendant compte de compromis entre baisse des pesticides et maintien des objectifs de rendements.

Ce chapitre est rédigé sous la forme d'un article scientifique publié dans la revue *European Journal of Agronomy*.

Fouillet E., Delière, L., Chartier, N., Munier-Jolain, N., Cortel, S., Rapidel, B., and Merot, A. (2022). Reducing Pesticide Use in Vineyards. Evidence from the Analysis of the French DEPHY Network *European Journal of Agronomy*,136. DOI : 10.1016/j.eja.2022.126503.

Abstract

High quantities of pesticides are applied on vineyards. For example, the average treatment frequency index (TFI) for French vineyards was 13.5 in 2016, whereas the average TFI for wheat (a major annual crop in France) was 4.9 in 2017. Reducing pesticide use is a key issue to improve viticulture sustainability. The aims of this study were (i) to analyse the evolution of pesticide use in vineyard farms voluntarily participating in a pesticide reduction programme, and (ii) to understand the options winegrowers used to reduce their pesticide use. We analysed data from the DEPHY farm network, including 244 cropping systems followed over 10 years and spread across 12 winegrowing regions. We used the TFI to assess the intensity of pesticide use. Mean pesticide use within the network decreased over the 10-year period and mostly concerned fungicide use. By analysing several indicators such as the number of treatments and the mean TFI per fungicide treatment, we were able to identify some of the management options mobilised for achieving this pesticide reduction. The use of biocontrol products and the reduction of sprayed doses were often associated with a low TFI. The analysis of yield evolution showed a significant mean reduction, although it was smaller than the TFI reduction. This raised the question of the impact of pesticide reduction on productivity. Further trade-off analyses are required in the future.

Keywords: Pesticide reduction, Vineyard, TFI, Treatment frequency, Dose reduction, Agroecological transition, Substitution .

1 Introduction

The negative impact of pesticides on the environment and on human health is widely recognised today (Aubertot et al., 2005; Mailly et al., 2017; Wilson and Tisdell, 2001). Consequently, reducing pesticide use is a major issue to enhance agriculture sustainability. Debates about pesticide use also extend to the wine sector, as it is one of the most intensive agricultural sectors in terms of pesticide use (Urruty et al., 2016a). The treatment frequency index (TFI, Pingault et al. 2008) is an indicator of pesticide use intensity, taking into account the number of treatments, the dose applied relative to a standard reference dose, and the proportion of the treated vineyard area. In 2016, the average TFI for French vineyards was 13.5, with an average of 20 treatments per year (Simonovici, 2019) whereas the average TFI for wheat (a major annual crop in France) was 4.9 in 2017 (Agreste 2020). Pesticide use in vineyard systems has many negative environmental impacts. Harmful consequences for soil biodiversity (Coll et al., 2011; Schreck et al., 2012) and detrimental

effects on deep and surface water (Bony et al., 2008) are reported. Pesticides can also affect the physiological processes of grapevine, such as limiting photosynthesis (Petit et al., 2008). Herbicide use can lead to soil erosion and a reduction in biodiversity (Cerdà et al., 2021; Keesstra et al., 2019).

Moreover, winegrowers are directly exposed to pesticides during pesticide preparation and spraying (Tsakirakis et al., 2014), while pesticide drift towards housing near vineyards is often a subject of neighbourhood conflicts, because the potential impacts of pesticides on human health is currently a major concern in winegrowing regions (Baldi et al., 2001, 2012; Raherison et al., 2019; Thierry and Yengue, 2018). Because of water fluxes, pesticide residues can affect the quality of water far away from the fields where pesticides were applied (Rodrigo Comino et al., 2018).

The vineyard system faces strong pest and disease pressures. Downy mildew (*Plasmopara viticola*), powdery mildew (*Erysiphe necator*), botrytis (*Botrytis cinerea*) and grape moth (*Eupoecilia ambiguella*) can cause major damage impacting the qualitative and quantitative characteristics of grapevine production (Fermaud et al., 2016). Among the pesticides used in France, 80% are fungicides, 15% insecticides and 5% herbicides (Mailly et al., 2017; Ageste, 2016). Grape moths (*Lobesia botrana*) and the leafhopper vector of Flavescence dorée (*Scaphoideus titanus*) are sprayed with insecticides. On average, 1 to 4 insecticides per year are sprayed (Pertot et al., 2017), representing around 15% of the total TFI. Treatments against the leafhopper vector of Flavescence Dorée (1 to 3 treatments depending on the winegrowing region) have been mandatory in France since 1994, which means that significantly reducing the insecticide TFI against the leafhopper vector will not be possible. Meanwhile, chemical treatments against grape moths can be more easily replaced with biocontrol (*e.g.* mating disruption). If not controlled, downy mildew and powdery mildew can cause yield losses of up to 100% during a high disease pressure year (Fermaud et al., 2016). These diseases can also affect the photosynthetic rate and grape maturation (Jermini et al., 2010), and lead to off flavours and organoleptic defects in wines (Pons et al., 2018). The wrong choice of lever or poor management during the technical change can pose substantial risks (Merot and Smits, 2020).

Technical levers can be mobilised to reduce pesticide use in vineyards. The ESR framework (Efficiency, Substitution, Redesign, see Hill and MacRae 1996; Merot et al. 2019) can also be used to classify the changes implemented to reduce pesticide use according to the intensity of change (Wezel et al., 2014). Efficiency (E) corresponds to the reduction of inputs by making individual treatments more efficient, often resulting in a reduction in the amount of pesticide sprayed per unit area. Hill and MacRae (1996) consider efficiency (E) as the first step in a change process. Substitution (S) corresponds

to the replacement of chemical inputs either by a non-chemical pest control method or by a chemical treatment with a lower environmental impact (in France, this can be a product from the official list of so-called biocontrol products, see below). Substitution is the second level in term of intensity of change after Efficiency and before Redesign (R). Redesign (R) corresponds to comprehensive changes made to the whole cropping system, most often combining several non-chemical pest management measures. Redesign impacts the whole cropping system and the use of production factors.

To reduce the use of fungicides after vineyards are planted, several levers can be activated. First, treatments can be optimised by adapting the dose and frequency of application (Efficiency) with the help of plant health reports or decision support systems. Most decision support systems rely on epidemiological models, mainly based on climate data. By integrating weather forecasts and epidemiological data, these models calculate the current or forecasted level of risk (Bleyer et al., 2011; Raynal et al., 2010; Viret et al., 2011). These models also include the effects of disease management strategies and are therefore used to establish recommendations for growers. Some authors have developed decision rules to help growers determine the start of spraying and adapt the maximal time lag after the application (Caffi et al., 2012; Carisse et al., 2009). Other decision support systems aim to integrate different disease risk indicators, such as phenological stage, rainfall, shoot growth, disease or outputs from a risk model (Davy et al., 2020; Delière et al., 2015; Kuflik et al., 2009). While other aims to adapt the amount of fungicide used to the canopy characteristics of the canopy and the phenological stage (Gil et al., 2011; Siegfried et al., 2007). Thiollot-Scholtus et al. (2019) and Deliere et al. (2013) designed and evaluated low-input vineyards that were mostly based on the use of decision support systems to achieve a reduction in both doses and the number of treatments. Pesticide use was reduced by 30% to 50% in these systems. Several studies have assessed the potential of TFI reduction while postponing the first fungicide treatment. The date of the first treatment against downy mildew will impact the number of treatments during the growing season (Chen et al., 2019). Delaying the first treatment against downy mildew could decrease the total TFI by up to 25% (Chen et al., 2020). A study by Mailly et al. (2017) also showed that the number of fungicide applications was reduced by half in winegrowing region when the first fungicide treatment was applied after 15 May. The date of the first treatment is a major lever to significantly decrease pesticide use in vineyards (Chen et al., 2020).

Another lever is the optimisation of spraying (Efficiency and Substitution). Spraying techniques are a key factor when it comes to environmental and human health risks. Pressure, air blast spraying and confined spraying can be used to prevent pesticides drifting into the atmosphere (Naud et al., 2018; Sinfort and Vallet, 2003). For example,

the use of a side-by-side sprayer resulted in a 30% dose reduction while confined spraying cut the amount of product used by 50% (Delpuech and Carra, 2016). Winegrowers can also use recovery panels or side-by-side product applications for more efficient spraying. The optimisation of treatments and the postponement of the first fungicide treatment also impact operator health (Chen et al., 2020).

In addition, synthetic products are increasingly being replaced with biocontrol products (Substitution). In France, a list of authorised biocontrol plant protection products is updated annually (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2020). Biocontrol methods include mating disruption to disrupt reproduction of a target insect and the use of sulphur, natural defence stimulators, or *Bacillus thuringiensis*-based insecticides (Wezel et al., 2014). Most of these solutions are only partially effective; this means pest and disease pressure is reduced, but pests are not fully eradicated (Lamichhane et al., 2017). Cropping system redesign entails more drastic changes in vineyards. For example, growers can plant grape varieties that are resistant or tolerant to downy and powdery mildew (Pertot et al., 2017). Moreover, some preventive practices such as the use of elicitors of plant defence mechanisms or thinning are also often mentioned to limit the development of cryptogamic diseases by modifying the microclimate around the clusters (Valdés-Gómez et al., 2008; Pertot et al., 2017; Aveline et al., 2009). By studying trajectories of conversion to organic agriculture, Merot et al. (2020) showed redesign mostly contributed to pesticide reduction through the stop of herbicide and the change in the disbudding strategy, with a strong work reorganisation. Concerning fungicides, few practices associated with redesign exist except for elicitors or resistant grape varieties. Farmers are adapting their systems to changing conditions (pest pressure and climate) through innovation (Verret et al., 2020).

Herbicides account for a minor share of the total TFI but they have a major impact on the environment, and especially water quality (Louchart et al., 2001). Herbicides are used to control weed pressure, from sown or natural weeds. Weeds can compete with grapevines for water and mineral resources (Celette and Gary, 2013; Celette et al., 2009), which can result in lower yields. There is only one biocontrol product available to destroy plant cover – pelargonic acid, a contact herbicide – but it shows limited effectiveness (Cordeau et al., 2016). The most common alternative to herbicide use consists in weed management and cover cropping via tillage, mowing or rolling (Garcia et al., 2018). However, these practices involve a higher risk of soil compaction (Polge de Combret Champart et al., 2013), nutrient competition (Celette and Gary, 2013) and an increase in costs and working time (Jacquet et al., 2019). Intercropping with a plant cover between rows or over the whole plot (including on-rows) is a growing practice within vineyards (Simonovici, 2019). Indeed,

the use of herbicides in the inter-row has been largely reduced since 2000. Moreover, disparities are observed between regions in relation to pedoclimatic conditions (Mailly et al., 2017). Weed and disease pressures are mainly influenced by meteorological factors such as rainfall, air humidity and temperature. For an even more comprehensive system redesign, agroforestry or the use of animals to manage weeds in the vineyard are possible options, although these have obvious impacts at the farm level (Niles et al., 2018; Zhu et al., 2020). However, references and knowledge on these levers are lacking.

The abovementioned pest control methods can be combined to varying degrees and depending on the desired level of in-depth change during the transition towards more sustainable systems. Minor changes are related either to technical adaptations to enhance treatment efficiency and reduce doses, or to treatment substitutions using a given alternative control method. Major changes requiring a full farm-level redesign (R) may have more profound impacts on the cropping system. The transition towards more sustainable systems can be challenging for winegrowers because changes in practices are often complex to implement (Merot and Belhouchette, 2019). Minor changes are more easily managed. The risk of yield losses is also limited, whereas more profound changes might present higher risks of yield losses, as in the case of conversion to organic farming (Deffontaines et al., 2020; Merot and Smits, 2020). Major system redesign that aims to reduce reliance on pesticides could also have consequences on workload and work organisation (Merot and Wery, 2017). Indeed, some practices increase working time (Merot et al., 2020) and mechanisation costs, which may or may not be offset by lower pesticide costs (Merot et al., 2019). Impacts of major changes on farm functioning and profitability may also be substantial when redesign involves combinations of levers rather than an isolated one (e.g. decision support systems at field and farm scale, combined with cover cropping and a resistant grape variety, see for example Métral et al. 2018; Delière et al. 2018; Thiollet-Scholtus et al. 2021).

In recent years, public policies have been created to support the transition towards low pesticide inputs. In France, the central government created the ECOPHYTO national action plan in 2008, with the objective of reducing pesticide use by half by 2025 (Barzman and Dachbrodt-Saaydeh, 2011). A network of demonstration farms, called the DEPHY farm network, was created in 2010 as a major initiative of this national action plan to promote and assess the implementation of practices to reduce the use of plant protection products. Today, this network provides a unique long-term perspective on the evolution of quite a large number of farms undertaking a transition process.

Within the DEPHY network, across all agricultural sectors, different types of levers are used in the pesticide reduction process. These levers can be classified according

to their mode of action: cultural control, genetic control, biological control, biotechnical control, chemical control, chemical control and physical control (Deliere et al., 2016). The main technical levers employed to reduce pesticide use in vineyards are generally based on using decision support systems, reducing doses, and changing pulverisation methods (Chen et al., 2019; Mailly et al., 2017). In this study, we hope to identify new levers (rather than redesign).

This article aims to describe and analyse the trajectories of pesticide use in the DEPHY network demonstration vineyards, as well as to assess the trade-off between pesticide use and other farm performances. Our analysis first focuses on the assessment of changes in pesticide use using the TFI indicator and the different factors that influence pesticide use. Secondly, we analyse the management levers employed to reduce pesticide use. Finally, we examine the evolution of vineyard productivity and discuss how it relates to pesticide use reduction.

2 Materials and Methods

2.1 DEPHY network and AGROSYST database

The main objective of the DEPHY network is to demonstrate the capacity of farms voluntarily participating in the network to reduce their pesticide use. The vineyard sector includes about 280 vineyards that joined the network between 2010 and 2012, and another 270 vineyards that joined in 2016. Vineyards are divided into 49 groups across the 12 main French winegrowing regions (Alsace, Bordeaux, Bouches-du-Rhône, Bugey-Savoie, Burgundy, Champagne, Charente, Côtes-du-Rhône, Gaillac, Languedoc, Loire-Valley, Provence). Each group of vineyards is coordinated by a network engineer who guides farmers in their pesticide reduction process and collects data using the AGROSYST system. The AGROSYST database gathers information collected every year on the practices and performances of cropping systems used on all network farms.

The cropping systems in the DEPHY network cover a wide range of production contexts. Data available for 303 vineyards (*i.e.* 55% of the network) reported the different levers mobilised in the DEPHY network. The main levers mentioned to reduce pesticide use are: soil management (cover cropping, soil tillage) against weeds (83%), pest monitoring (45%), insect mating disruption (24%), adaptation of the dose and frequency of fungicide spraying (79%), use of decision support systems (76% of the groups), and optimisation of spraying against fungal diseases (26%).

The AGROSYST database provides information about the cropping system: farm

context (e.g. agricultural area, farm equipment), agricultural interventions and agronomic indicators such as yield. Other performance indicators, calculated from raw data, are available in the database. When joining the network, cropping system details were collected every year. In this study, only the cropping systems of the farms that joined the network between 2010 and 2012 were analysed. Only those systems with at least six years of data were selected. In total, our study focuses on 12 winegrowing regions with a total of 244 cropping systems, after removing cropping systems with missing data or outliers ($TFI > 30$) (see Figure 3.1). Data on the mode of production were also available and allowed us to classify cropping systems as conventional or organic farming (see Table ?? for details on the variable used).

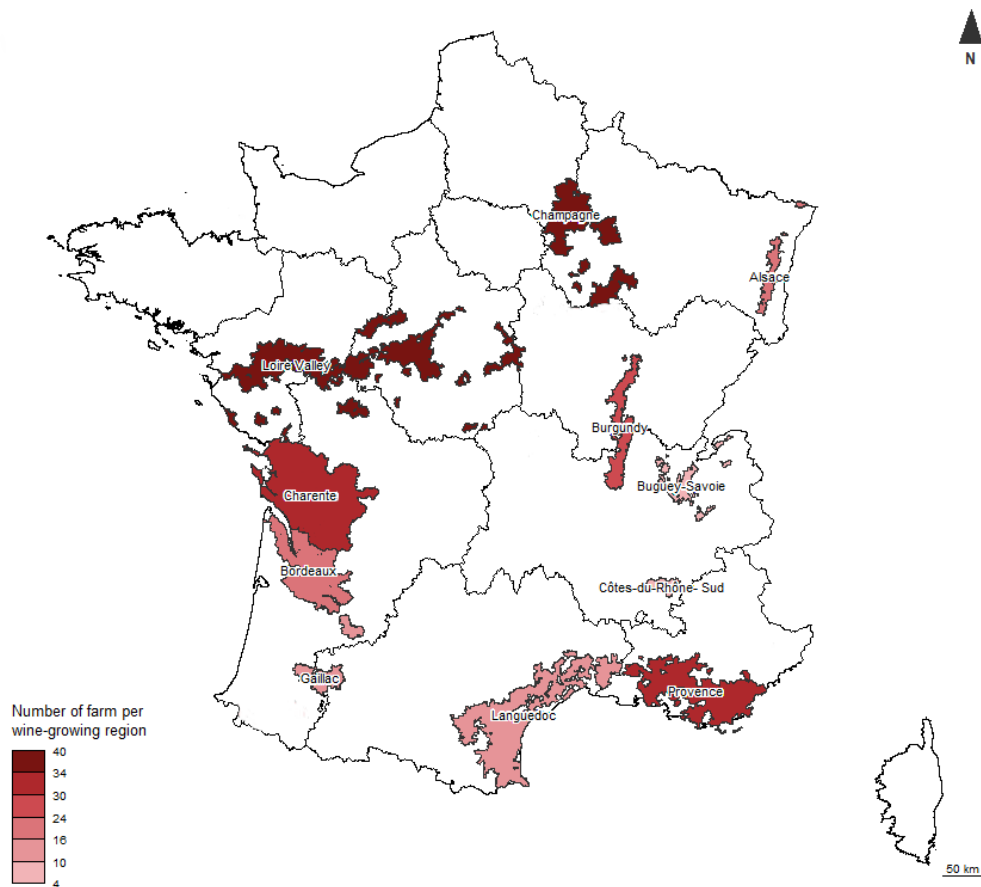


Figure 3.1 Locations of the DEPHY network demonstration farms studied depending on the wine-growing region. Provence includes Var, Vaucluse and Bouches-du-Rhône. Winegrowing region are coloured according to the number of DEPHY-farms engaged in the region

2.2 Indicator of pesticide use

We estimated the level of pesticide use by calculating the TFI. The TFI is the main indicator used within the DEPHY network to assess and monitor pesticide use. Contrary to other indicators such as the number of treatments, the TFI integrates the actual consumption of plant protection products, taking into account the actual applied dose relative to the full recommended dose (Brunet et al., 2008).

Different methods are possible for calculating the TFI. The differences between these methods are derived from the recommended dose, either established by product or by targeted pest or disease. To obtain a detailed TFI for our study, we calculated the TFI with the applied dose expressed as a fraction of the dose recommended to control specific targeted pests or diseases and by the proportion of sprayed area (see detailed variable in Table ??).

$$TFI = \sum_p \frac{Dose\_sprayed_p}{Dose\_recommended_p} \times \frac{Area\_sprayed_p}{Area\_total_p} \quad (3.1)$$

Equation 3.1 : Calculation of the TFI (Pingault et al., 2008) for a given year at the farming system scale. The dose sprayed per product corresponds to Doses_prayed ; the recommended dose for a product P for the target pest is Dose_recommended; Area_sprayed represents the surface area where the product was applied and Area_total is the total surface of the field where the treatment was sprayed (Pingault et al., 2008)

We used the recommended doses per product and per target pest/disease from the e-phy database published by the French Ministry of Agriculture in 2020 (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2020) for all 10 years of the study, so that variations in the TFI would not be due to variations in dose regulations during this period. For 3% of the treatments, we could not locate the product in the official databases. Those treatments were arbitrarily allocated a TFI of 1.

The TFIs per treatment were summed up to assess pesticide use over each growing season. First, the TFIs for the whole year were calculated as the sum of the TFI per treatment for all interventions performed.

We differentiated between three partial TFIs: fungicide TFI (TFI_f), herbicide TFI (TFI_h) and insecticide/acaricide TFI (TFI_i), which were added together to obtain the sum of all TFIs per treatment for the three types of pesticides.

Since treatment dates are recorded in the database, we were also able to calculate partial TFIs by phenological periods or by month. We calculated the average TFI_f per

treatment according to three main phenological periods. The three periods considered are April-May as the pre-flowering period; June as the flowering and fruit set period and July-August as the ripening period.

The list of biocontrol products authorised by the Ministry of Agriculture includes macroorganisms, microorganisms, natural substances, pheromones and elicitors that have no apparent negative impact on health or the environment. These products were excluded from the TFI calculation. The TFI including the biocontrol product was calculated separately following the principle of Equation 3.1.

To compare the DEPHY network with national trends, we used the average TFI from the three national surveys carried out in 2010, 2013 and 2016 by the French Ministry of Agriculture's Department of Statistics and Prospective Services in the main French winegrowing regions as a reference. This database provides a representative view of cropping practices in France's different winegrowing regions. Data are collected every three years at the field scale and surveys are carried out on a representative sample of 4000 farms. The data we used here were limited to the TFI in each winegrowing region in 2010, 2013 and 2016. Data from 2019 are not available yet. A normalised TFI was calculated corresponding to the ratio between calculated TFI and average TFI from the national surveys.

For each cropping system, the 'Initial Point' was defined as the average practices during the three years immediately preceding the year when farmers joined the DEPHY network. For the systems entering the network in 2010, the 'Initial Point' corresponded to years 2008 to 2010, while for the systems entering the network in 2011, the 'Initial Point' corresponded to years 2009 to 2011. Practices at the 'Initial Point' were therefore not affected yet by the changes favoured by the network activities. Practices were described at the cropping system level, *i.e.* for all field plots of a given farm managed with the same consistent strategy (either at the plot level, *i.e.* all details of the crop management sequences described for each plot, or directly as a cropping system synthetic crop management sequence representing all variants of crop management across the plots of the cropping system).

Because some of the pesticide-reduction solutions can rely on dose reduction and/or a change in application frequency, three complementary indicators were assessed (at the cropping system level) to better characterise the crop protection changes:

- The number of treatments corresponding to the number of treatments during a growing season whatever the date of intervention.
- The average TFI_f per treatment representing the ratio between TFI_f divided by

the number of treatments.

- The number of product applied containing carcinogenic, mutagenic, or toxic for reproduction (CMR)

Finally, we also used the Yield ($hL.ha^{-1}$) available in the database, to assess if trade-offs were made between pesticide reduction and agricultural performance.

2.3 Statistical analysis

To assess the evolution over time of each indicator, two different methods were used.

First, linear mixed-effects models were used to assess if there was an evolution of a studied variable over time (mod Equation 3.2)((Zuur et al., 2009)). We assumed that the studied variable X varied over time and by winegrowing region. Winegrowing Region was integrated as a fixed effect to collect the slope and intercept coefficients and cropping system followed over the time was integrated as a random effect.

$$mod = lmer(X \sim Year * Winegrowing Region + (1 + Year|cropping system)) \quad (3.2)$$

Equation 3.1 Linear models used to visualise the evolution of a variable X over the 10 years of the study taking into account the winegrowing region effect (Winegrowing Region). The cropping system effect followed over time is integrated as a random effect. The equation is formulated using the language of the lme4 package of the R software.

Normality and heteroscedasticity were verified to validate the statistical analysis (Zuur et al., 2009). We then used an ANOVA on each variable to test the significance of the fixed variables (Year and Winegrowing Region) effect. A classical 0.05 level of significance was considered. Secondly, to assess if a variable evolution occurred after a vineyard joined the network, we calculated the difference between the Final Point (2017, 2018 and 2019) and the Initial Point for each vineyard. A t-test was performed for each winegrowing region to see if the delta Final Point-Initial Point was significantly different from zero.

Statistical analysis was conducted using the R-software version 3.6.2 and the R package *tidyverse* (Wickham et al., 2019), *lme4* (Bates et al., 2015) and *broom* (Robinson and Hayes, 2020). The boxplot and graph were created using the *ggplot2* package (Wickham, 2016). The cartography was made using the package *sf* (Pebesma, 2018) and cartography (Giraud and Lambert, 2017).

3 Results

3.1 Pesticide use over time in the DEPHY-Network

TFI significantly decreased over the 10 years ($p < 0.001$) in the DEPHY-network (Figure 3.2A). The TFI difference between the Initial Point and the Final Point (2017, 2018, 2019) indicates an average reduction of 33%. Considerable variability among the cropping systems could be noted each year. At the Initial Point, the average TFI value was 12.1 ± 6.3 whereas the TFI value was 8.1 ± 4.6 at the Final Point. The TFI varied between 1.7 and 29.2 at the Initial Point and between 0.5 and 24.1 at the Final Point. The year effect was statically verified ($p < 0.001$). The normalised TFI shows trends in pesticide use, excluding the ‘noise’ due to inter-annual variations in climate conditions and pest pressure, and excluding regional differences (Figure 3.2B). At the Initial Point, the mean normalised TFI was close to 1. This result indicates that the cropping systems within the DEPHY network had similar initial TFIs compared to representative vineyards sampled in the French Ministry of Agriculture’s Department of Statistics and Prospective Service database. However, high variability was observed: the normalised TFI varied between 0.1 and 2.72. In 2013 and 2016, the median of the normalised TFI dropped below 1, close to 0.75. In 2019, the median of the normalized TFI was 0.55. The DEPHY network has sustained the pesticide reduction at a higher rate than the general population of wine growers in France. The variability decreased compared to 2010, with TFI ranging from 0.09 to 1.5 in 2013 and from 0.08 to 1.66 in 2016. The variability increase in 2019 with TFI from 0.03 to 2.1 in 2019

3.2 TFI factors of variability

3.2.1 Winegrowing region

A variety of TFI evolutions can be observed among winegrowing regions (Figure 3.3). The TFI at the Initial Point varied widely depending on the winegrowing regions. Some regions such as Charente and Loire Valley had a high level of pesticide use at the Initial Point (higher than 15). Meanwhile, Gaillac and Languedoc had a low TFI when they joined the network (below 10). The evolution of TFI by winegrowing region differed from one region to another. The regional effect was significant ($p < 0.001$, see Table B.2, Table B.3).

Some regions managed to significantly reduce the TFI (Alsace, Charente, Bordeaux and Loire Valley) according to the linear model ($p < 0.001$) and the t-test ($p < 0.01$). Loire

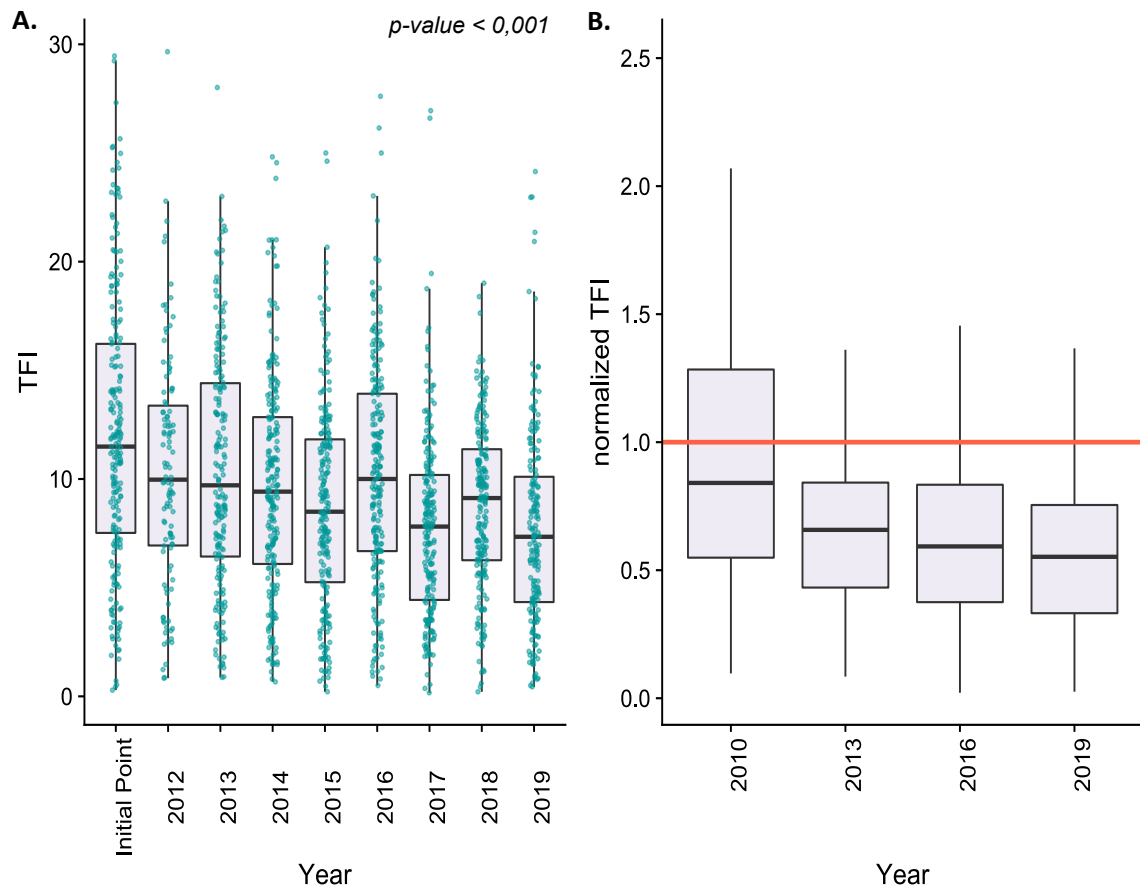


Figure 3.2 Evolution of the treatment frequency index (TFI) over 10 years in the DEPHY network. A. Box plot representing the evolution of the TFI over 10 years. B. Box plot representing the normalized TFI with data from the French Ministry of Agriculture’s Department of Statistics and Prospective Service’s database from 2010, 2013, 2016 and 2019; we compared 2010 with the Initial Point. Outliers are not represented. Whiskers display the 5th and 95th percentiles. Horizontal bars indicate the first quartile, median and third quartiles. The p-value correspond to the results of the linear model (see Eq(2)).

Valley was the region with the highest TFI reduction (-66%). In Côtes-du-Rhône, the linear model shows a significant TFI decrease ($p < 0.05$). In Provence, the t-test between the Initial Point and the Final Point shows a significant TFI decrease. In Provence, the difference between the TFI at the Initial Point and 2012 was -37.4%.

In Bouches-du-Rhône, Bugey-Savoie, Champagne neither of the two tests showed no significant evolution ($p > 0.05$). The average TFI decreased slightly, but not significantly ($p = 0.09$). The lowest TFI reduction average (-5.5%) was observed in Bugey-Savoie. In Gaillac, a TFI increase was observed, from 8.7 in 2010 to 10.4 in 2019, i.e. +19.2% ($p\text{-value} < 0.05$). Within each winegrowing region, high intra-annual variability was also observed. In Bordeaux and Champagne, for example, the TFI at the Initial Point varied from 2.1 to 23.2 and from 2.1 to 19.3, respectively. Meanwhile, the regions Gaillac,

Languedoc and Bouches-du-Rhône showed a lower intra-annual variability.

3.2.2 Production mode

A significant decrease in the TFI has been observed since 2010 for conventional and organic farming ($p < 0.001$ for organic farming and $p < 0.001$ for conventional farming). At the Initial Point, the TFI of conventional cropping systems was higher than the TFI of organic cropping systems ($p < 0.001$). The TFI was from 11.9 ± 5.4 for the conventional cropping system and 6.7 ± 5.6 for the organic cropping system. Despite the differences in value, the TFI trajectories for the two production modes were similar, with declines after the vineyards joined the network and peaks in 2016 and 2018. The TFI decrease observed in organic farming (-45.9%) was significantly steeper than the decrease observed in conventional systems (-26.8%) ($p < 0.001$). An increase in the number of organic farming systems was observed between the Initial Point and 2019 (see Figure B.1, Figure B.2). At the Initial Point, 11.6% systems were organic versus 18.8% in 2019. The conversion rate among the network winegrowers increased after 2016. A total of 9.5% of the cropping systems converted to organic farming during the 10 years of the study: 2.1% of the cropping systems before 2015 and 7.4% of the cropping systems between 2016 and 2019. Some 17.6% were still in conversion in 2019.

3.2.3 Evolution of partial TFI

We observed a stagnation in the insecticide TFI but a significant decrease in the fungicide and herbicide TFI in the DEPHY network (Figure 3.4B). Fungicides were the most sprayed pesticides (Figure 3.4A) to control downy mildew and powdery mildew. They accounted for 86% of the total TFI in 2010 and 83% in 2019. A substantial, statistically significant reduction of 27% in fungicide use was observed between the Initial Point and the Final Point ($p < 0.001$). The average TFI_f was 10.1 ± 5 in 2010 and 7.3 ± 5.8 in 2019. Inter-annual variability was also observed and was very high for the TFI_f , with two spikes in 2016 and 2018. In 2016, the mean TFI_f was 8.5 ± 4.3 and 7.55 ± 3.1 in 2018. However, looking at the coefficient of variation (CV) over time and space, we observed that the inter-annual variability was higher than the intra-annual variability (see Table B.4). Looking at the CV over time (*i.e.* inter-annual variability), the minimal CV was 41.4 in 2018 and the maximum CV 79.8 in 2019. If we compare to the CV over space (*i.e.* intra-annual variability), it varied from 31.4 for Côtes-du-Rhône and 58.9 in Champagne.

Insecticide use over the 10 years did not show any significant evolution with the linear model ($p = 0.76$) (Figure 3.4B) and ranged from 0.82 to 1.03. Insecticides accounted for 5.5% of the total TFI when the vineyards joined the network and 10.4% in 2019. The

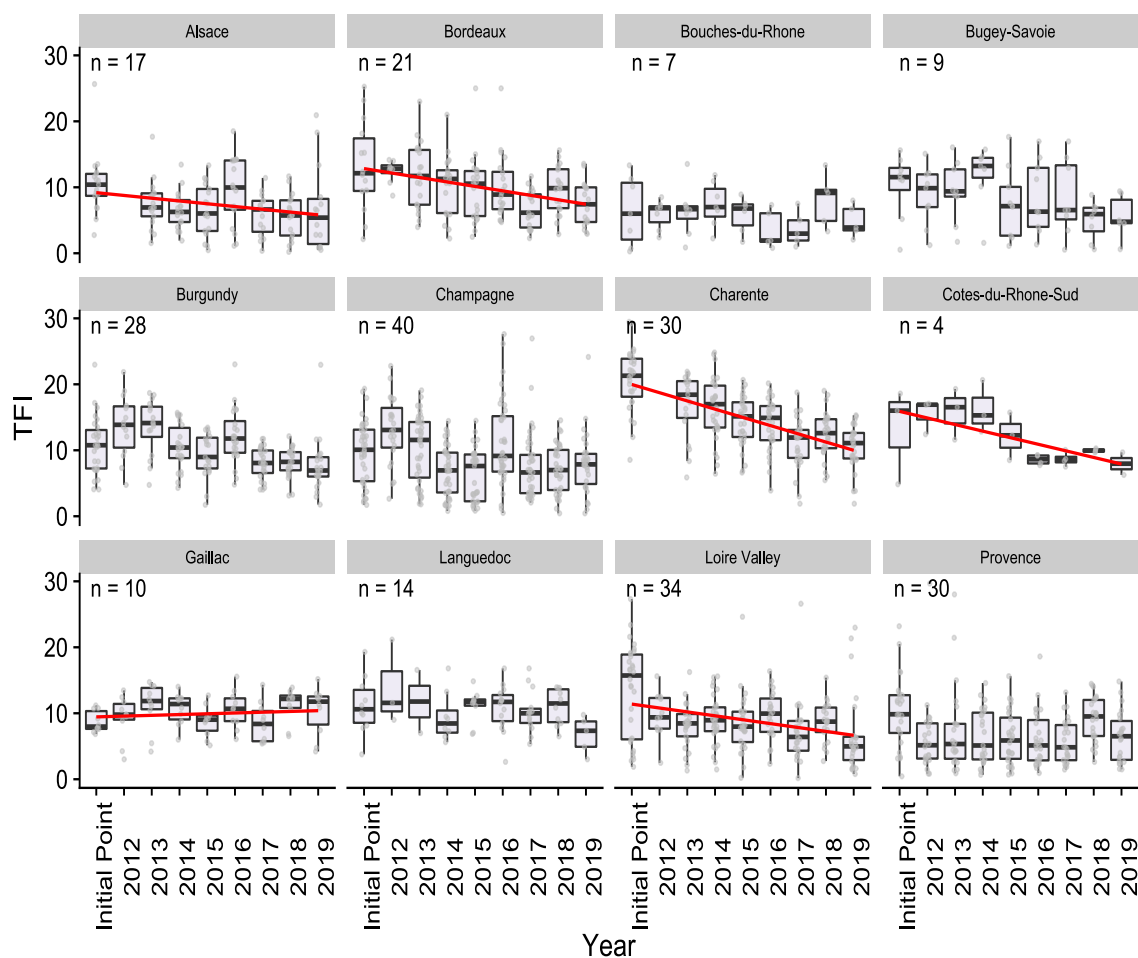


Figure 3.3 : Evolution of the Treatment Frequency Index (TFI) over the 10 years depending on the wine-growing region. Outliers are not represented. Whiskers display the 5th and 95th percentiles. Horizontal bars indicate first, median and third quartiles. N represents the number of cropping systems engaged in the DEPHY-network in each wine-growing region. The red line corresponds to the linear trend of TFI over time for the winegrowing region with a significant TFI evolution (see Eq(2)).

TFI_i presented a very low inter-annual and intra-annual variability. At the Initial Point, the TFI_i was from 0.9±1.1 and in 2019 from 1.1±1.3. Among the cropping systems using herbicides, the linear model showed a significant decrease in the TFI_h: from 1.4±1.4 to 1±1.1 ($p<0.001$) (Figure 3.4C). The sprayed areas were not always representative of the entire plot. The reduction rate of 58% for TFI_h over the 10 years was sharper compared that for fungicides and insecticides. This percentage corresponds to the total use of herbicides, and also includes winegrowers who do not use herbicides. An early drastic decrease was observed from 2010 and 2012. On average, TFI_h accounted for 8.5% of the total TFI in 2010 and 4.8% in 2019. The intra-annual variability was higher at the Initial Point, rising from 0 to 5 while the TFI_h varied from 0 to around 2 in the following years.

In addition, the percentage of cropping systems using herbicides decreasing considerably, from 88.8% at the Initial Point to 51.3% in 2019 (Figure 3.4C). This decrease was mainly observed early after vineyards joined the DEPHY network between the Initial Point and 2013.

3.3 Exploring pesticide reduction levers

3.3.1 Change in the type of product used

The use of biocontrol products increased significantly in the DEPHY network over the 10 years of the study ($p<0.001$) (Figure 3.5). The TFI_{biocontrol} rose from 2.5 at the Initial Point to 3 in 2019. Biocontrol use increased by 20% between 2010 and 2019. Moreover, the number of cropping systems using biocontrol products increased between 2010 and 2019. At the Initial Point, 35.2% of the cropping systems used biocontrol products versus 80.9% in 2019. A shift was observed between 2010 and 2012 indicating that biocontrol was adopted early after inclusion in the network. Although biocontrol product use rose, this did not account for the entire decrease in pesticide use, since the increase in the TFI_{biocontrol} was well below the total decrease in the TFI quantifying reduced pesticide use. We observed a significant decrease in the number of treatment regardless of the type of pesticides ($p<0.001$, see Figure B.3). At the Initial Point, the mean number of treatment was 14.4±5.1 and 13±5 in 2019. Among the cropping systems which still use herbicides, the number of herbicide treatments held stable at around 2.1 over the 2010–2019 period. At the DEPHY-network scale, the number of herbicide treatments significantly decreased ($p<0.001$). There was no significant evolution of the quantity of glyphosate sprayed in cropping systems using this herbicide ($p=0.11$). But the number of cropping systems using glyphosate decreased: 68% of the cropping systems used products containing glyphosate at the Initial Point versus only 49% in Final Point. The number of insecticide treatments was also stable, remaining at around 2.2 over the 10 years for the cropping systems using

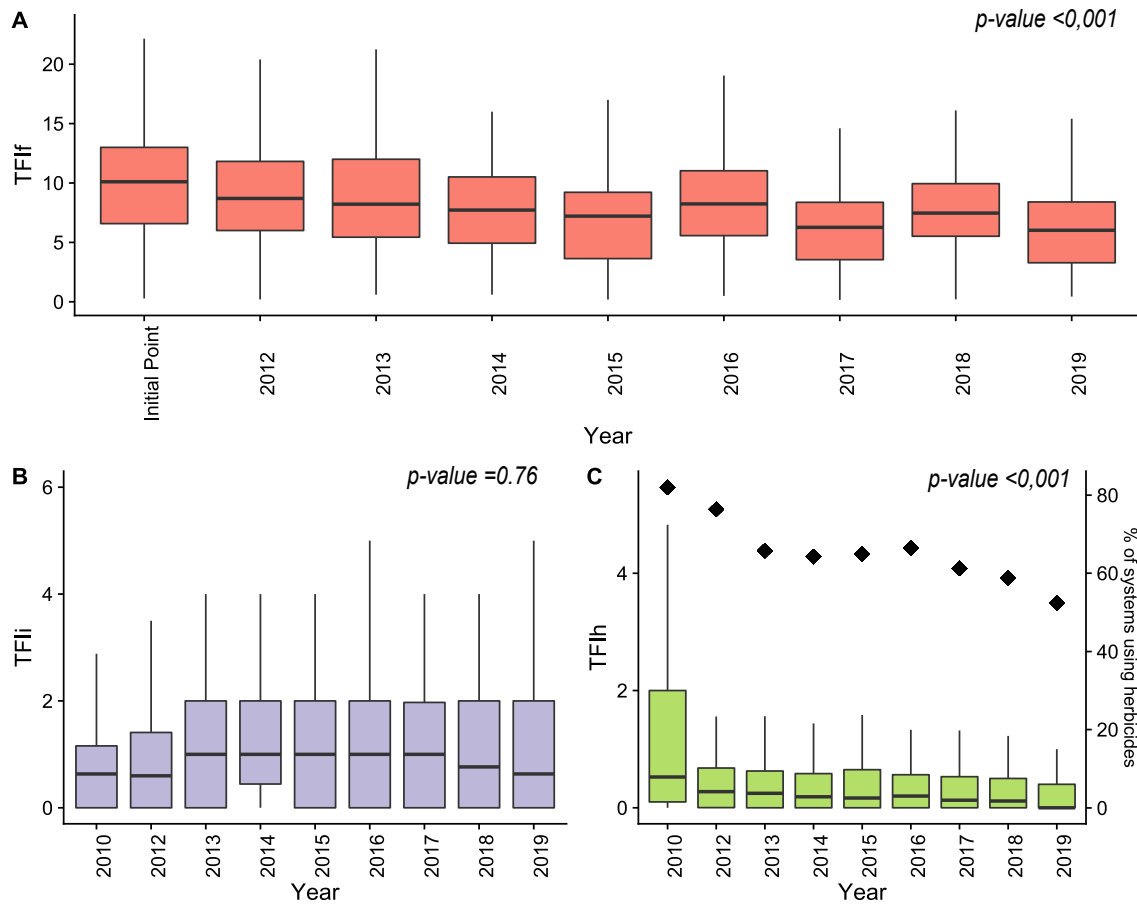


Figure 3.4 Evolution of the partial TFI over the 10 years of the study. (A.) Evolution of the fungicide TFI (TFI_f). (B.) Evolution of the insecticide TFI (TFI_i). (C.) Box plot (left axis) representing the evolution of herbicide TFI (TFI_h) and point plot (right axis) representing the evolution of the percentage of systems using herbicides. Outliers are not represented. Whiskers display the 5th and 95th percentiles. Horizontal bars indicate the first, median and third quartiles. The p-value correspond to the results of the linear model (see Eq(2)).

insecticides. The evolution of the number of fungicide treatments showed no significant change over the 10 years ($p=0.9$, see Figure B.4). High inter- and intra-annual variability was observed (from 1 or 2 treatments to 29 treatments). The evolution of the number of products containing CMR decreased over the 10 years ($p<0.001$, see Figure B.5). The mean number of CMR products used per farming system was 7.8 ± 4.8 at the Initial Point and 1.3 ± 2.1 at the Final Point.

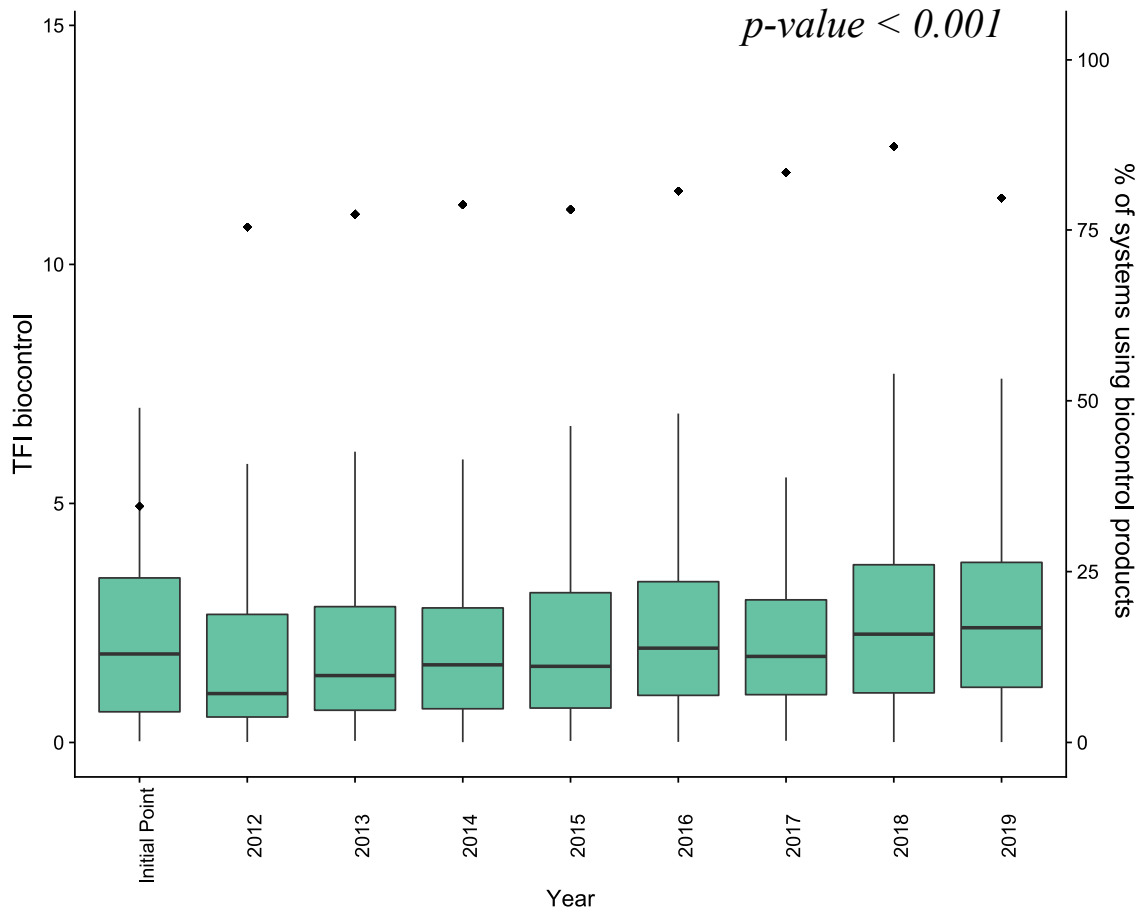


Figure 3.5 Evolution of biocontrol use within the DEPHY network over the 10 years of the study. Box plot (left axis) representing the evolution of the $TFI_{biocontrol}$ and point plot (right axis) representing the percentage of systems using biocontrol products. Outliers are not represented. Whiskers display the 5th and 95th percentiles. Horizontal bars indicate the first, median and third quartiles. The p-value correspond to the results of the linear model (see Eq(2)).

3.3.2 Dose adjustments

The TFI_f per treatment decreased significantly between 2010 and 2019 ($p < 0.001$) (Figure 3.6A). This decrease corresponded to a 39% reduction. An early change was observable between 2010 and 2012 with a 13% reduction. Separating the TFI_f per treatment into phenological periods (Figure 3.6B) showed that the average TFI_f per treatment decreased significantly for each period ($p < 0.001$). In 2010, the TFI_f per treatment was around 1 for the three periods analysed, meaning that winegrowers applied pesticides at the full recommended dose. After 2010, a decrease was observed for all three periods. A sharp, quick decrease in the TFI_f can be observed during pre-flowering (April-May) and ripening (August) of 50% and 47%, respectively. However, between flowering and fruit set, a highly sensitive period, the TFI_f per treatment showed a slighter decrease (-30%) and remained higher than in pre-flowering or ripening periods (around 0.75) from 2012 to 2019.

The average TFI_i per treatment decreased from 0.87 ± 0.25 at the Initial Point to 0.77 ± 0.29 in 2019 ($p < 0.001$, see Figure B.6). The herbicide use per treatment decreased from 0.40 ± 0.27 mean in 2010 to 0.27 ± 0.25 in 2019 for the cropping systems using herbicides ($p < 0.001$, see Figure B.7).

3.4 Yield evolution

A significant 19% yield reduction was observed over the 10 years at the overall DEPHY-network level ($p < 0.05$) (Figure 3.7, Table B.2, Table B.3). The average yield in the network was $62.8 \pm 22 \text{ hL.ha}^{-1}$ at the Initial Point and $51.2 \pm 21 \text{ hL.ha}^{-1}$ in 2019.

A high diversity of trajectories was observed depending on the winegrowing region. In Bouches-du-Rhône, Bordeaux, Champagne, Côte-du-Rhône, Languedoc, Gaillac the linear model and the t-test showed no significant yield evolution. In Bouches-du-Rhône, for example, the mean yield stayed around 50 hL.ha^{-1} over the 10 years. The difference between Initial Point and Final Point showed a significant difference in Gaillac. In Bugey-Savoie, Burgundy, Provence and Loire Valley the linear model also showed a significant yield decrease.

The analysis of the differences between the Initial Point and the Final Point showed a significant yield decrease in Provence and Bugey-Savoie. In the regions of Provence, Bugey-Savoie, decreases in yields over the 10 years were 39.6% and 39.4%, respectively.

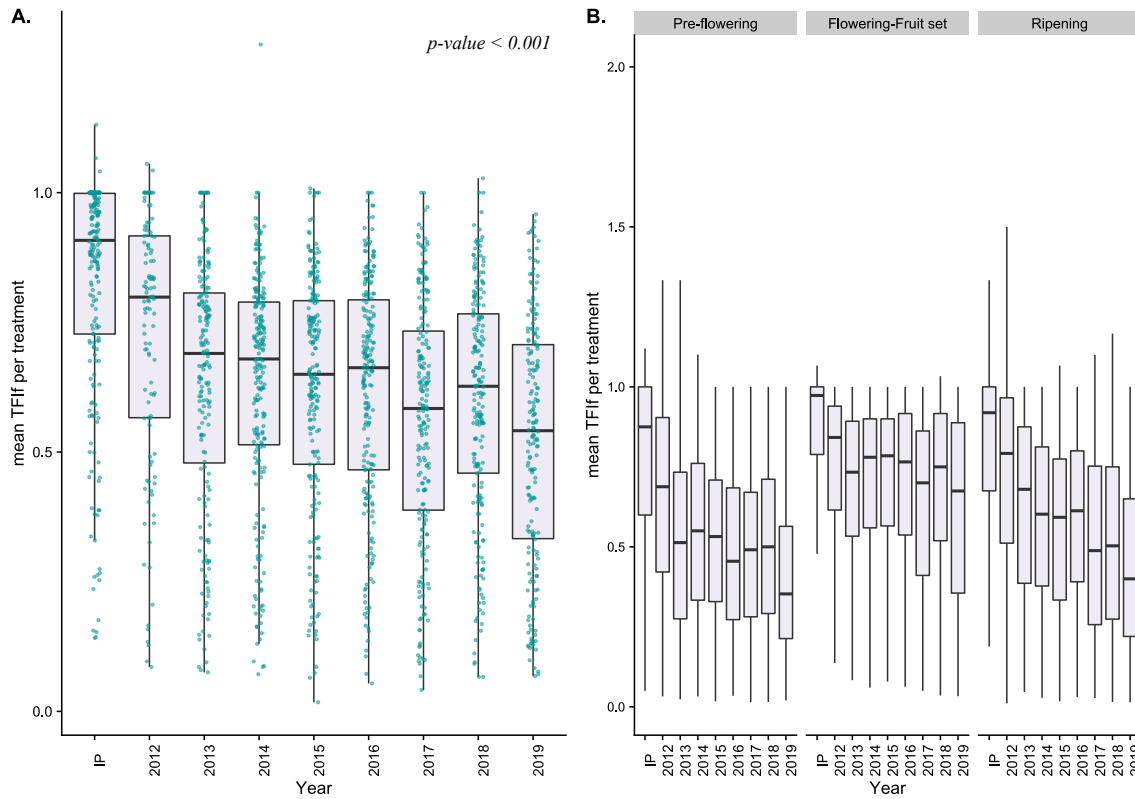


Figure 3.6 Evolution of fungicide use over the 10 years of the study. (A) Box plot representing the TFI per treatment over the whole crop cycle. (B) Box plot of the TFI per treatment split into three distinct phenological periods: 1) Pre-flowering, 2) Around flowering and fruit set, and 3) Ripening. Outliers are not represented. Whiskers display the 5th and 95th percentiles and the horizontal bars indicate the first quartile, median and third quartiles. The p-value correspond to the results of the linear model (see Eq(2)).

4 Discussion

In this study, we aimed to describe and analyse the trajectories of pesticide use in demonstration vineyards involved in pesticide reduction. We showed that the TFI decreased over the 10-year period within the DEPHY network, with a reduction rate of around 33%. The TFI decrease was driven by the fungicide reduction. The decrease was regular and progressive from the point when vineyards joined the network, although there was high inter- and intra-annual variability. This high variability is related to a large range of pesticide use trajectories, which can be explained partly by the inter-region diversity and year effects.

We observed TFI spikes in two specific years: 2016 and 2018. In 2016, climate conditions increased downy mildew pressure in Champagne and Alsace (north-eastern France) and in Provence (south-eastern France), leading to higher pesticide use (Simonovici, 2019).

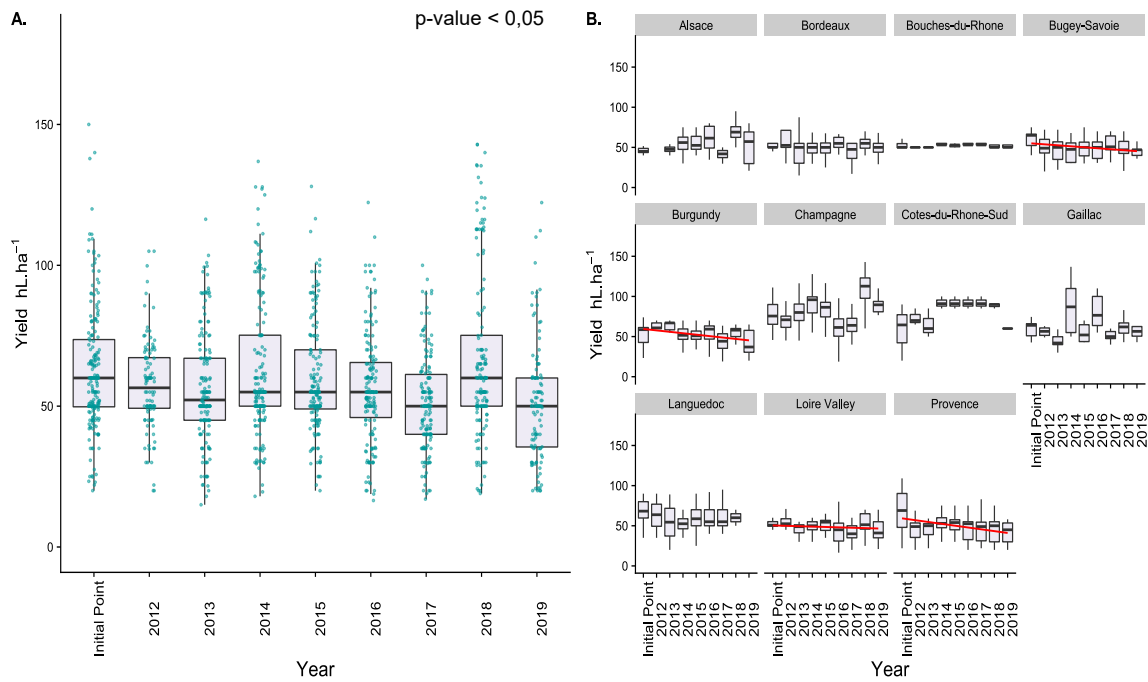


Figure 3.7 (A) Evolution of the yield over the 10 years of the study. (B) Evolution of the yield over 10 years by winegrowing region. Outliers are not represented. Whiskers display the 5th and 95th percentiles and the horizontal bars indicate the first quartile, median and third quartiles. The p-value correspond to the results of the linear model (see Eq(2)).

In 2018, a rainy spring leading to high downy mildew pressure was observed all across France, with the exception of Burgundy, Champagne and Alsace (IFV 2018). The year effect had a huge impact on phytosanitary practices. Differing climate conditions from one winegrowing region to another lead to variability in practices implemented over time and space (Mailly et al., 2017).

At the winegrowing region level, a range of TFI trajectories among regions were also identified. Regions such as Charente, Bordeaux showed a high and progressive decrease in the TFI while Languedoc and Gaillac had relatively stable ones. Other regions showed a decrease in pesticide use, but the evolution was not regular. A rupture in the TFI evolution was observed when vineyards joined the network in Provence and Bouches-du-Rhone. This rupture appeared following analysis of the difference between the Initial Point and the Final Point. This rupture implies that winegrowers quickly implemented technical levers.

With regard to the rate of pesticide reduction, the highest TFI reduction rate could be noted for winegrowing regions joining the network where pesticide use is high, such as Charente and Bordeaux. Meanwhile, the TFI reduction was limited in Provence and

Languedoc, regions that joined the DEPHY network with the lowest average TFI values.

Our results showed that the TFI reduction was driven by fungicide reduction. In this study, we identified significant but limited changes in the insecticide strategy. This limit is undoubtedly related to the government-mandated treatments to control the leafhopper vector of Flavescence Dorée. The number of mandatory treatments – from one to three – depends on the winegrowing region. Regions such as Gaillac, Languedoc and Charente must deal with high pest pressure that often requires three treatments (Simonovici, 2019). To control other pests like grape moths, the levers implemented are usually the use of biocontrol techniques such as mating disruption, microbial products, biological control with the release of natural enemies, etc. (Pertot et al., 2017). However, the TFI associated with grape moths is very low (less than one treatment on average), and is not a priority compared to fungicide reduction.

Fungicide reduction is an important issue because fungicides are the main pesticides used in terms of quantity and number of interventions in vineyards (accounting for over 80% of the TFI). A significant decrease in the TFI_f was observed for the cropping systems analysed for this study. This TFI_f decrease was due mainly to reduced doses, which improved efficiency according to the ESR framework (Hill and MacRae, 1996), whereas no change in the number of fungicide treatments was observed. Winegrowers adjusted their fungicide doses depending on the grapevine sensitivity. They tended to apply full doses during the sensitive phenological stages (*e.g.* flowering period) whereas they reduced the dose before and after the flowering period. A decision support system can further refine dosage choices: studies have quantified the potential pesticide reduction associated with their use and revealed a 50% reduction in fungicide (Delière et al., 2015). Decision support systems differ considerably with regard to the knowledge they provide and how easy they are to use. Deeper analysis is required to investigate the learning process associated with the implementation of dose reduction tools and whether some of them are more effective than others. It is commonly accepted that decision support systems and indicators more generally provide descriptive elements to support action, but a learning curve to understand indicator functions is reported by Toffolini et al. (2016). This learning curve is particularly important during a transition (Deffontaines et al., 2020; Barbier and Lemery, 2000). Other elements of reasoning for fungicide treatments have been shown by Mailly et al. (2017) and Chen et al. (2019, 2020); furthermore, these studies highlighted that delaying the first application of fungicide was a major strategy to reduce TFI. However, dose reduction strategies are often preferred over delaying the first treatment when winegrowers use contact products such as copper or sulphur. These strategies are favoured by the development of organic farming, strategies that do not use CMR products or the progress of resistance problems with many synthetic products.

This variable was not studied, but will need to be explored through further analysis. Other explanatory variables, relative to the context of the farming system and underlying pesticide use, could be used. For example, some variables such as grape varieties, targeted yield or planting density were not available in the database, but such information could significantly impact pesticide use. We were not able to investigate such questions. The dose reduction can be combined with efficiency gains related to equipment choices (sprayer type and adjustments). In 2017, a survey among winegrowers involved in the DEPHY network showed that equipment choice, and especially sprayers, was an important lever for pesticide reduction (cited in 26% of surveys). In some cases, farmers must invest in new equipment, which represents a significant investment. It would have been interesting to study the implementation of such equipment, but the database did not allow for easy investigation of this aspect.

Substitutions, as defined by Hill and MacRae (1996), were also observed. Indeed, an increase in the $TFI_{biocontrol}$ was observed during the 10 years of the study and the rate of cropping systems using biocontrol products improved rapidly, from around 30% of the cropping systems at the Initial Point to almost 75% in 2012. Biocontrol strategies largely revolved around sulphur products.

The analysis of fungicide use dynamics showed that strategies of changes based on efficiency gains were quick to be implemented (from 2010 and 2012) with substantial results. Biocontrol was introduced more gradually, unlike the TFI per treatment, which began to fall immediately after vineyards joined the network. However, it should be noted that biocontrol methods are less effective than synthetic pesticides (Laurent, 2021). Sulphur products, which account for the majority of biocontrol products, are more leachable and less effective. Hill and MacRae (1996) showed that efficiency and substitution, like sulphur introduction, are the first steps of change towards an agroecological transition. Thus, it would be interesting to look at the trajectories followed by the cropping systems that specifically converted to organic farming over the 10 years analysed in this study. The decrease in the use of CMR products confirms the substitution of products that are harmful for human health and environment for more environmental friendly products.

Other indicators can be used to qualify pesticide use, such as the number of unit doses (NUD) or the quantity of active ingredient (QAI). The QAI corresponds to the sum of the weight of active substances contained in the applied products according to the dose (Ecophyto, 2019). The NUD is obtained by calculating the ratio between the QAI and the recommended dose. The biocontrol NUD cannot be calculated and there are no NUD references by region (Ecophyto, 2019). The NUD indicator is less known and thus less accessible to farmers. Looking at the evolution of the QAI shows bias because the new

registered substances have a lower weight than the old substances. The QAI can vary greatly because it combines very different active substances in terms of application doses (Sanson and Joulin, 2018). This indicator does not take into account the properties, nor the toxicity of the active substances. The QAI does not really reflect the farmer's practices (Guichard, 2010). These two indicators are mainly interesting on a sector-wide scale (Guichard, 2010). We based our study on the TFI because it is the official indicator used by the DEPHY network and the farmers. TFI is an indicator that drives change within the DEPHY network.

Herbicide reduction was the second way to reduce the TFI. The TFI_h decreased over the 10 years of the study, especially between the Initial Point and 2012. Reduced herbicide use seems to be one of the first levers activated to reduce pesticide inputs. For weed control, the existing levers are based on efficiency gains or redesign. In fact, chemical weeding can be maintained or stopped. When stopped it must be replaced by manual or mechanical methods. A reduction of the TFI_h per treatment was observed: modularity in herbicide reduction efforts can be achieved using differentiated treatments i) between row and inter-row compartments and ii) between inter-rows. Thus, herbicide reduction is only possible in some areas of the plot. In the DEPHY network, numerous winegrowers stopped herbicide use entirely on the entire area involved in the network. Jacquet et al. (2019) found that such a change lead to an increase in workload, from 1 to 2 field interventions with herbicides to 4 to 6 field interventions for manual and mechanical weeding. This increase implies a heavier workload during a critical period, e.g. spring (Merot and Wery, 2017) that could be a source of lock-in for pesticide use. Mechanical weeding also implies purchasing new equipment and learning how to use it. Herbicide reduction suggested that changes implemented in the DEPHY network involved deeper changes to practices than those required for fungicide reduction. It is highly probable that repercussions on other performances could be observed. Jacquet et al. (2019) showed that mechanical weeding could cause a 5% to 20% yield loss and increase work time from 8h/ha to 11h/ha. These changes imply economic impacts (equipment investment and labour costs). Further study on trade-offs between performances is needed. It would be interesting to verify if cropping systems that continued to use herbicides could absorb these repercussions or if they are locked in.

One important aspect of performance to assess in the case of technical change is yield. A significant decrease in yield was observed (-19%). This decrease seems highly dependent on the winegrowing region and the specific production context. Yield can be impacted by many factors. Climate events (frost, hail, etc.) can cause major damage in vineyards. More recently, studies highlighted the fact that grapevine trunk diseases could cause vine dieback (Gramaje et al., 2018; Mondello et al., 2018). A longitudinal study of yields from

1900 to 2016 showed that most French departments experienced yield stagnation, and perhaps even a decline, across 79% of all viticulture cropping areas (Schauberger et al., 2018). Thus, in this study, it is difficult to attribute the decrease in yield performance observed in the network to changes in practices related to the decrease in pesticide use. Studies have shown that the transition of cropping systems to organic agriculture leads to significant yield reductions (Merot and Smits, 2020). The yield decrease can be explained by new processes that are undertaken, but not mastered, such as mechanical weeding below the row, which can reach the stock stumps and thus impact productivity (Jacquet et al., 2019) or the introduction of sulphur- and copper-based treatments (Merot et al., 2020). Further analysis is needed to answer this question.

Besides the analysis of TFI absolute values, we showed that the TFI of the cropping systems engaged in the network differed from the national trends (Simonovici, 2019). In fact, the DEPHY network went further in its approach to pesticide reduction. The evolution of the normalised TFI from the DEPHY network showed a potential progress margin for the French vineyard system of 30% in 2016. This reduction is worthwhile as long as yield is not impacted. However, it is difficult to imagine that all French winegrowers would be ready to change their practices and to the same degree. Innovative practice implementation is highly correlated with financial investment, complexity of implementation, workload and availability of technical resources such as equipment (Deffontaines et al., 2020). Moreover, there are many psychological and social factors underlying farmers' intentions to adopt practices, which results in huge differences in implementation (Bonke et al., 2021).

In this study, we showed that the DEPHY network provided good support to farmers that are willing to reduce pesticide use. Thus, the DEPHY network was an effective driving force for the implementation of new levers. Advisors play a key role in supporting changes. Like farmers, they must also change their practices (Cerf et al., 2010). The DEPHY network also helps advisors stay abreast of changes in their field to support farmers in the agroecological transition. With this study, we were able to verify the effectiveness of some of the technical levers mobilised, even if some of them cannot be fully traced. A more detailed study on the crop management system must be carried out to explore change mechanisms and trade-offs made between performance factors. Some performance considerations such as profit are not available in the AGROSYST database. It is important to point out that changes to practices and system redesign require taking a financial risk (Boulanger-Fassier, 2008) and that one possible lever is to adjust selling prices. Individual and collective support could be one way to encourage the implementation of practices to achieve a sustainable reduction of the TFI through knowledge acquisition. DEPHY is an opportunity to learn and enrich both knowledge and knowledge indicators (Toffolini et al., 2016).

5 Conclusion

We showed that the TFI decreased over 10 years within the DEPHY network, with an overall reduction rate of around 33%. The first levers identified are mostly based on efficiency and substitution. Such results could be used to improve farm stakeholders' support towards agroecological transition. However, it is essential to assess changes from a social point of view and to take into account socio-economic indicators such as labour intensiveness and health risks.

Chapitre 4

Pesticide use trajectories during agroecological transitions in vineyards: The case of the French DEPHY network

Contenu du chapitre : Dans ce chapitre 4 pour compléter la première analyse globale des IFT réalisée dans le chapitre 3, nous avons caractérisé la diversité des trajectoires de individuelles d'utilisation des pesticides à partir de la base de données entre deux niveaux d'IFT à savoir IFT entrée dans le réseau et IFT atteint en 2019. Cette diversité a ensuite été regroupée en types de trajectoires. Entre. Les trajectoires d'IFT ont été décrits par plusieurs critères informant sur : leur forme, leur régularité et leur variabilité autour de la pente moyenne. A partir des données de 161 systèmes de culture, nous avons mis en place une méthode permettant de renseigner les trois aspects de la transition l'état initial, l'état de la transition (sens et intensité) et la trajectoire définie par Ross et al. (2008). Nous avons construit 6 indicateurs à partir de l'IFT permettant de renseigner ces trois aspects en nous inspirant de la méthode développée par Martin et al. (2017) qui évaluent la vulnérabilité des exploitations d'élevage laitier à travers le temps via la mise en place d'un modèle linéaire en utilisant les données brutes qui permet d'extraire différents indicateurs. Nous avons par la suite identifié les différences de leviers implémentés entre les différents types identifiés.

Résultats principaux :

- Trois types de trajectoires ont été identifiés se différenciant principalement par le niveau initial d'utilisation des pesticides et le pourcentage de réduction de l'IFT. Le point initial indiquent la marge de manœuvre des viticulteur·ice·s dans leur réduction de l'utilisation des pesticides.
- Les trois types de trajectoires sont identifiés dans presque tous les bassins viticoles étudiés. Les indicateurs utilisés pour construire les types ont permis de s'extraire du fort effet bassin viticole.
- Les leviers identifiés entre les types sont similaires mais les types se distinguent par les différences de combinaison et d'intensité de leur mise en œuvre.
- Les différences de point initial, point final et intensité de changement laisse indiquer une continuité entre les trois types de trajectoires.

Ce chapitre est rédigé sous la forme d'un article scientifique accepté avec révisions majeurs dans la revue « Agricultural System ». Il a été resoumis le 24/08/2022.

Fouillet, E., Delière L., Flori A., Rapidel, B., Merot A., under review Pesticide use trajectories during agroecological transitions in vineyards: The case of the French DEPHY network. Agricultural System.

Abstract

CONTEXT: Winegrowers apply large quantities of pesticides to their vineyards to reduce high cryptogamic pressure. But these practices must change to lower pesticide use and improve viticulture sustainability. Different options for curbing pesticide use exist, and they can be progressively implemented following a specific temporal scheme in each cropping system. Some change trajectories can be more efficient than others in limiting pesticide applications. Combining trajectory studies and typology may be helpful in characterizing how farmers change their practices and in summarizing the various cropping system trajectories possible when transitioning towards pesticide use reduction.

OBJECTIVE: The aims of this study were i) to identify different types of pesticide use trajectories, and ii) to understand the options implemented by winegrowers to reduce their pesticide use.

METHODS: We analysed data from 161 farming systems in the DEPHY farm network in 12 French winegrowing regions over a 10-year period. Pesticide use was assessed with the treatment frequency index (TFI). We characterized the TFI trajectory of each farming system with six indicators and built a typology of TFI trajectories. We then analysed several indicators such as the use of biocontrol products and the dose sprayed to identify some of the management options chosen to achieve these pesticide use trajectories.

RESULTS AND CONCLUSIONS: Three clusters were identified and characterized in terms of pesticide use strategy. The first cluster represented farms with an initial point close to the regional average and which did not experience a significant TFI reduction (-13%). The second cluster comprised farms with a low TFI when entering the network that were able to further reduce their TFI over time (-48%). The last cluster represented farms with a high initial TFI and a high reduction (-63%). All clusters managed to reduce their pesticide use by combining several technical levers at different intensities. Some differences in the levers between clusters were observed. Cluster 2 farms are in the process of converting to organic farming and using the associated levers such as biocontrol and mechanical weeding.

SIGNIFICANCE: The changes implemented by cluster indicate a varying degree of progress in the transition towards pesticide use reduction. The initial point was identified as having a strong influence on the end result. The more intensively the technical levers were combined, the more difficult it was to reduce pesticide use. The DEPHY network supported winegrowers in their reduction of pesticides who managed to reduce their pesticide use by 13% to 63%.

Keywords: typology, treatment frequency index, Efficiency, Substitution, Redesign

1 Introduction

The dominant agricultural model is being challenged by the rise of societal debates on the environmental and health consequences of current intensive agricultural practices (Aubertot et al., 2005; Wilson and Tisdell, 2001; Mailly et al., 2017). To support and stimulate the transition towards low pesticide inputs, some countries have created public policies. In 2008 the French government launched its national ECOPHYTO plan with the aim of cutting pesticide use in half and ending the use of glyphosate by 2025 (Barzman and Dachbrodt-Saaydeh, 2011). Within the ECOPHYTO plan, a network of French demonstration farms, the DEPHY farm network, was created to promote and assess practices implemented to reduce pesticide use. Technical changes can be particularly complex and challenging for winegrowers (Merot et al., 2019). The DEPHY farm network presents an interesting opportunity to understand and characterize the way farmers transition towards low-pesticide systems.

Lamine and Bellon (2009) have identified two different transition processes used by farms shifting to organic farming: i) an abrupt, direct and reversible transition or ii) a transition implemented through a progressive and continuous process of adaptation. These two transitions differ in the speed of change and the degree of modification to farm practices. Thus, the implementation of new practices is more or less gradual and can involve profound technical changes (Chantre and Cardona, 2014; Lamine, 2011; Padel et al., 2020; Toffolini et al., 2017b).

During a transition towards pesticide use reduction, minor and major changes can be implemented (Sutherland et al., 2012). Minor changes are associated with a progressive transition while major changes are linked to a more abrupt and direct transition (Lamine and Bellon, 2009). Minor changes are made incrementally and are seen as an alteration of activities of the system that does not change the overall direction or goals of the farming system in the short term (e.g. gradual intensification of production). In contrast, major changes involve a shift in the trajectory of the system and are often linked to a trigger event (*e.g.* retirement, labour availability, subsidies, available land etc.). Trigger events are considered as the farmer’s realization that “the change is necessary to meet farm management objectives, and/or exploit new opportunities” (Sutherland et al., 2012). Major changes result in a significant reorientation of farm activities and resource management (e.g. conversion to organic farming). The work of Sutherland et al. (2012) was based on Wilson’s transition theory (Wilson, 2008), who studied the path during

transition as a succession of linear periods. The linear period determines the possibility of a system going in one direction but being interrupted by nodal points, which can be compared to trigger event. The existence of nodal points (or pivotal points) during the transition will cause a change in the transitional direction, implying a shift in the transition process. According to Wilson (2007), transitions are temporally non-linear, spatially heterogeneous, structure-agency inconsistent and therefore unpredictable.

The concept of trajectory is used to study transition processes between the initial and final states. In the literature, the notion of trajectory has been expressed in different ways (Brédart and Stassart, 2017). The trajectory method was used to identify the drivers of change and predict farm evolution (García-Martínez et al., 2009) to build the evolutionary model (Moulin et al., 2008) or to assess the management strategy (Dupré et al., 2017). Trajectory studies may help to characterize how farmers change as well as the factors and background of these changes (Cerf et al., 2010). Trajectory studies are carried out at different levels (organizational, technical, commercial, etc.) and can be linked to learning processes (Barbier and Lemery, 2000; Cerf et al., 2010). According to Ross et al. (2008), the transition process can be described according to three elements. The first element is the agent of change, *i.e.* what triggers change (public policies, psychosocial factors, etc.). The second element corresponds to the effect of change, *i.e.* the difference between the initial state and the final state. The last element is the mechanism of change, which corresponds to the path taken between states, *i.e.* the trajectory from one state to another. Trajectory is here considered to be the path followed by a system during its transition from an initial state to a final state through intermediate states (Merot et al., 2019). Thus, a transition can be characterized by the initial point, the effect of the transition (direction and intensity), and the trajectory.

Studying a vineyard or a cropping system trajectory involves the use of indicators. The selected indicators determine how the object of study is viewed. In the case of changes in practices, some studies have used the ESR framework established by Hill and MacRae (1996) to characterize the change implemented (Chantre et al., 2015; Merot et al., 2019) or calculated technical scores (Dupré et al., 2017). These indicators can be used to visualize the trajectory sequentially. Chantre et al. (2015) analyse trajectories through “agronomic coherence phases” to explain the transition process. However, the division into phases has its limits because it does not show what happens within these phases (Brédart and Stassart, 2017).

Transitions towards pesticide use reduction are distinct from farm to farm. Different solutions exist to implement change; for example, there are many levers to reduce pesticides in vineyards (use of biocontrol products, dose reduction or soil tillage to replace chemical

weeding, etc.) (Jeuffroy et al., 2022). The chosen solutions can depend, for example, on the priority, the production mode and the specific farm context (Darnhofer et al., 2010a). The technical changes made by farmers when transitioning towards a low-input system differs from one farm to another (Merot et al., 2019), even if different pathways can lead to the same final point (Deffontaines et al., 2020).

To understand and summarize farm diversity during an agroecological transition, the notion of farm typology is often used (Teixeira et al., 2018). Building a typology is a way to simplify and group a variety of farm cases into fewer types to better understand this diversity (Alvarez et al., 2018; Landais et al., 1988). Typology can condense and summarize a large, heterogeneous dataset to identify patterns and describe or even compare these patterns (Alvarez et al., 2018; Cortez-Arriola et al., 2015; Köbrich et al., 2003). Typologies are a first step to understanding the transition process because they are used to assess and explain the differences in behaviour of a farming system undergoing a major change. This paper aims to understand and synthesize the diversity of individual farms' pesticide use trajectories within the DEPHY network in a way that reflects the long-term dynamic of change in pesticide use reduction. We assumed that different strategies of pesticide use reduction exist, depending on the levers implemented, their combination and the speed of their implementation. But these strategies are difficult to identify given the diversity of production contexts among the different winegrowing regions.

A method is needed to be able to characterize the process of change and consider the trajectory over the long term. The method must overcome the diversity of the production context by identifying indicators derived from the individual trajectory and which are used to assess the dynamic. To describe the diversity of transitions, we developed a typological method of pesticide use trajectory based on the calculation of indicators linked to the change in TFI. We consider these trajectories as mathematical trajectories to differentiate them from the mechanisms underlying the transition process that could be identified by survey. We also described the different technical changes identified by Fouillet et al. (2022) for each type of pesticide use trajectory to identify which levers can be implemented to reduce pesticide use.

2 Materials and Methods

2.1 Vineyard system

Grapevine is a perennial plant, often planted in monoculture, which faces strong pest and disease pressures. Several threats can cause major damage, thus impacting the qualitative and quantitative characteristics of grapevine production (Fermaud et al., 2016). Pesticide applications remain the most effective way to control pest and diseases. In 2019, the average TFI for French vineyards was 12.4, with an average of 18 treatments per year (Simonovici and Caray, 2021), whereas the average TFI for wheat (a major annual crop in France) was 4.9 in 2017 (Crisan, 2019). Among pesticides, fungicides represent around 80% of pesticide use in vineyards. Most of these treatments aim to control downy mildew (*Plasmopara viticola*) and powdery mildew (*Erysiphe necator*). Insecticides account for less than 15% of pesticide treatments and are sprayed to control European grapevine moth (*Lobesia botrana*) and the leafhopper vector of Flavescence dorée (*Scaphoideus titanus*). Depending on the region and year, treatments to prevent Flavescence dorée can be compulsory by law. Herbicides represent the remaining 5% of pesticide use (Mailly et al., 2017) but are still applied on 72% of vineyards (Simonovici and Caray, 2021) on the inter-row or/and under the vine row. Pathogen development is highly correlated to the climatic conditions of the vineyard (humidity, rainfall and wind) (Mailly et al., 2017). This relationship leads to a range of practices between and within winegrowing regions.

2.2 DEPHY network and AGROSYST database

The DEPHY network was created in 2010 with the aim of demonstrating the capacity of farms voluntarily enrolled in the network to reduce their pesticide use. The DEPHY network includes more than 4000 farms and covers all French production sectors. The vineyard sector is represented by 280 farms that joined the network between 2010 and 2012 and an additional 270 farms that joined in 2016. The vineyards involved in the DEPHY network are divided into 49 groups across the main French winegrowing regions. Each group is composed of around a dozen winegrowers and is facilitated by a network engineer who supports the winegrowers in their efforts to reduce pesticide use with individual assistance and collective projects. The network engineer collected information on the phytosanitary strategy for each farm every year and entered the data into a database (AGROSYST Information System). Each phytosanitary intervention is recorded in the database with the dose and the name of the product.

To encourage data analysis, the AGROSYST database was created to compile information about the farming system: farm context (e.g. agricultural area, farm equipment), agricultural interventions (all information on treatments: applied dose and product sprayed, etc.) and agronomic indicators such as yield. Other performance indicators available in the database (e.g. number of carcinogenic, mutagenic or toxic for reproduction (CMR) products used or the quantity of sulphur and copper applied) have been calculated using the raw data. When a farm joins the network, a diagnostic is performed with the farmer to collect information on its “initial point” based on the previous three years. Farming system details are then collected every year.

Only vineyards with more than 6 years of data were evaluated for this study. We selected a total of 161 farms that are distributed across 11 major French winegrowing regions: Alsace, Bordeaux, Bouches-du-Rhône, Bugey-Savoie, Champagne, Burgundy, Charente, Côtes-du-Rhône, Gaillac, Provence and Loire Valley.

2.3 TFI calculation

We assessed pesticide use by using the treatment frequency index (TFI, (Pingault et al., 2008)). TFI is the main indicator used within the DEPHY network to monitor pesticide use. TFI refers to the applied dose relative to the full registered and recommended dose while integrating the consumption of plant protection products (Brunet et al., 2008; Fouillet et al., 2022). Different methods to calculate the TFI exist and differ regarding the full registered dose, either established by product or by targeted pest or disease. The TFI used in our study corresponds to the applied dose expressed as a fraction of the dose recommended to control specific targeted pests or diseases and by the proportion of sprayed area (see Equation 4.1).

$$TFI = \sum_p \frac{Dose\_sprayed_p}{Dose\_recommended_p} \times \frac{Area\_sprayed_p}{Area\_total_p} \quad (4.1)$$

Equation 4.1 : Calculation of the TFI (Pingault et al., 2008) for a given year at the farming system scale. The dose sprayed per product corresponds to Doses_prayed ; the recommended dose for a product P for the target pest is Dose_recommended; Area_sprayed represents the surface area where the product was applied and Area_total is the total surface of the field where the treatment was sprayed (Pingault et al., 2008)

The recommended doses per product and per targeted pest/disease were extracted from the e-phy database published by the French Ministry of Agriculture (Ministère de

l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021). The e-phy database for 2020 was used for all 10 years of the study in order not to take into account the variations of the dose regulations during this period. The variables *dose_sprayed*, *area_sprayed*, *area_total* and the product name were directly available from the AGROSYST database. For 3% of the treatments, we were not able to identify the product in the official database. As proposed in Fouillet et al. (2022), for these treatments we assigned a TFI of 1, which stands for a full dose applied to a given area. The TFI for a growing season corresponds to the sum of the TFI per treatment for all interventions performed during that growing season (see Equation 4.1). Partial TFIs were differentiated: fungicide TFI (TFI_f), herbicide TFI (TFI_h) and insecticide/acaricide TFI (TFI_i). We were also able to calculate the TFI biocontrol. The e-phy database compiles the list of biocontrol products (macroorganisms, microorganisms, natural substances, pheromones, elicitors). We excluded these products from the TFI and calculated the $TFI_{biocontrol}$ separately. $TFI_{biocontrol}$ was calculated following the principle of Equation 4.1.

For farms which entered the DEPHY network in 2010, the initial TFI was calculated using the data from 2008, 2009 and 2010. For the farms which entered in 2011, the calculation was made using the 2009, 2010 and 2011 data. The final point was calculated using data from 2017, 2018 and 2019 to be consistent with the initial point calculation and to limit the year effect. To eliminate the winegrowing region effect, we also calculated a normalized TFI at the entry of the network. The indicator *normalized_TFI* reflects the intensity of pesticide reduction compared to other vineyards in the same winegrowing region. We use the database from the French Ministerial Statistical Service for Agriculture to have a representative view of cropping practices in the different French winegrowing regions. The surveys are conducted every three years at the field scale on a representative sample of 4000 farms. We used the mean TFI per winegrowing region data from 2010. All the variables used to calculate the TFI are summarized in Table C.1.

2.4 Typology construction

To characterize the type of pesticide use trajectories within the DEPHY network, six indicators were calculated using the TFI for each farm. These indicators can be used to describe the transition process. Some of the calculated indicators were adapted from the method of Martin et al. (2017) used by Bouttes et al. (2018) and Perrin et al. (2020). This method took into account the trends in farm performances: i) the slope of a linear model reveals the general trend (increase, decrease or stagnation), ii) the range of the residuals to evaluate the robustness and variability of the measurement and iii) the sum of squared deviations estimates the overall variability of the farming system. In our case study, we first characterized the initial and “final” state of the transition and extracted the two following indicators:

- the initial TFI (*norm_TFI*) corresponds to the ratio between the calculated TFI and the average TFI from 2010 provided by the French Ministerial Statistical Service for Agriculture data;
- the final TFI (*final_TFI*): the mean of the last three years (2017, 2018, 2019).

We used a linear model to characterize the pesticide use trajectory over the 10-year period. For each cropping system, several indicators were extracted:

- the slope (*slope*) was used to characterize the path taken from the initial TFI to the final TFI;
- the sum of squared deviations (*SSD*) to characterize the variability around the slope;
- the maximum variation (*max_variability*): the maximum residuals having the largest absolute value were extracted to indicate the variability of the TFI over the 10-year study period.

Trajectories are not necessarily linear and regular, and ruptures can occur (Wilson, 2007). In order to qualify these ruptures, two-piecewise continuous linear regressions were conducted for each farm. Two-piecewise linear models are a common nonlinear model which assume the existence of a breakpoint at the junction of two line segments. The location of the breakpoint was considered as a model parameter and the most relevant value was found by maximum likelihood. The slopes of the lines before and after the “best” hypothetical breakpoint were compared. The slope change is used to evaluate if the farming system was experiencing a break during the pesticide reduction process.

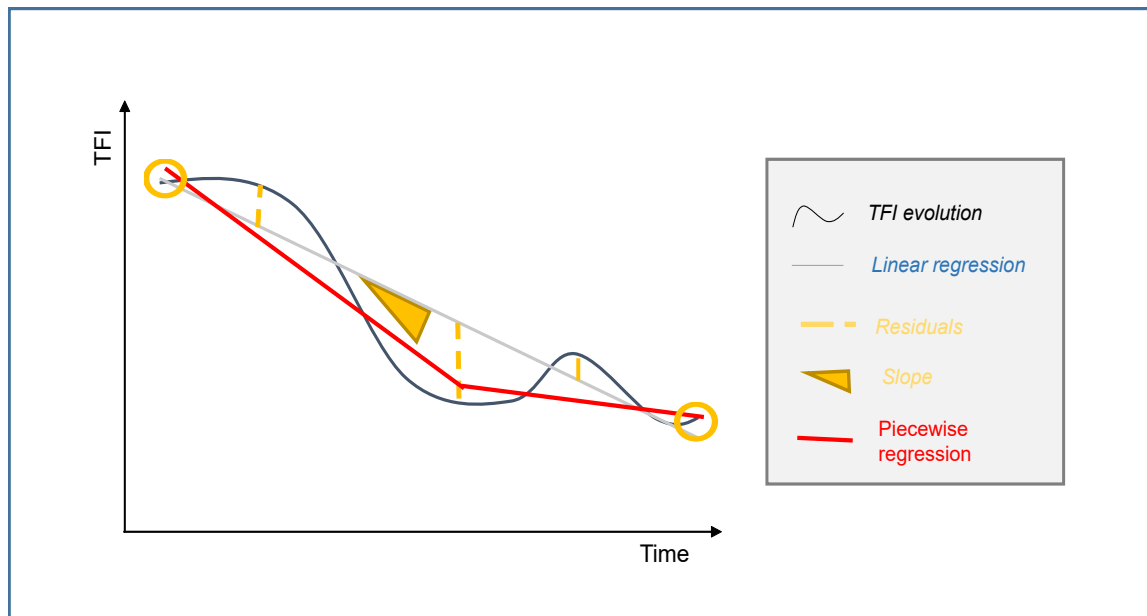


Figure 4.1 Overview of the indicators calculated to set up the pesticide use trajectory typology inspired by the methodology from Martin et al. (2017). The slope was obtained with the linear regression over time based on the raw measurement, and the maximal residual of the regression was extracted. The piecewise regression was used to identify the existence of a transitional rupture. The initial TFI and final TFI were also extracted.

2.5 Phytosanitary strategies

To identify the change in the phytosanitary strategy implemented to reduce pesticide use, we looked at the management practices used by the DEPHY farmers highlighted in the study by (Fouillet et al., 2022). The list of the data we used for the study are summarized in the Table C.2. All the indicators used to characterize the phytosanitary practices were available in the AGROSYST database. The different management practices studied are the type of product used, the applied dose per treatment, the use of chemical herbicide and the production mode.

Type of product used

First, we focused on the use of biocontrol products. The list of biocontrol products authorized by the Ministry of Agriculture includes 4 categories: macroorganisms (insects, mites, etc.), microorganisms (bacteria, viruses), chemical mediators (pheromones and elicitors) and natural substances (biocontrol products are composed of substances present in the natural environment and can be of plant, animal or mineral origin). To characterize the use of biocontrol products, we used several indicators:

- Whether or not a biocontrol product was used

- The biocontrol share ($\text{TFI}_{\text{biocontrol}}$ over total TFI)
- The sulphur quantity applied. Sulphur products are considered by French regulations as biocontrol products. In organic vineyards, sulphur is mostly used to control powdery mildew.
- The use of mating disruption (biocontrol product) against the leafhopper vector of Flavescence dorée

We then focused on the use of copper products. Copper products are not considered to be a biocontrol product but are authorized and mostly used in organic farming against downy mildew. Indicators used to characterize copper products used were:

- Whether or not a copper product was used
- The quantity of copper sprayed

The number of carcinogenic, mutagenic or toxic for reproduction (CMR) products sprayed was also characterized.

Applied dose per treatment (fungicides, herbicides, insecticides). The dose sprayed indicates if a dose was adapted to the current situation with a more or less complex decision making process (for fungicide and insecticides products). An herbicide dose reduction indicates a change in the weeded strip under the row or the stop of the weeding in the inter-row; these change

Use of chemical herbicides. Even if herbicide represent a small part of the TFI, stopping the use of herbicide product implies organisational change (e.g. increase in work time, increase of the cost (Jacquet et al., 2019)).

The production mode (conventional farming, organic farming or farming system in conversion) was also available in the database. We looked at the conversion to organic farming because it implies the implementation of several levers.

Data on behavioural levers (e.g. use of decision support systems) are not available in the database; the indicators used are mainly quantitative indicators linked to the use of phytosanitary treatments.

2.6 Statistical analysis and data processing

The data were processed with R software v. 3.6.2 (Team, 2019) and Rstudio v. 1.3.1093 (Team, 2020) with the *tidyverse* package (Wickham et al., 2019) and the *broom* package (Robinson and Hayes, 2020). The graphics were made using the *ggplot2* package (Wickham, 2016).

2.6.1 Building the typology

The typology was based on the indicators presented in section 2.4. A principal component analysis (PCA) followed by a hierarchical cluster analysis (HCA) were performed using FactoMineR (Lê et al., 2008). We performed the PCA with the six indicators to identify the relationships between the variables. The missing values represented only 0.6% of the data, which is why the missing values were replaced by the mean of the variable.

The farm trajectory typology was then produced using an HCA on the coordinates on the PCA axes with an eigenvalue greater than 1 (Kaiser criterion). We used the Euclidean distance computed on the factorial coordinate of the individuals. We identified the optimum number of clusters based on the largest relative loss of inertia using Ward's method.

2.6.2 Characterization of the different clusters of pesticide use trajectory

In order to compare the indicators used to set up the typology between clusters, we used a one-way ANOVA and Tukey test for numeric and continuous indicators with normal distribution of the errors. A non-parametric test (Kruskall-Wallis) and Wilcoxon test were used for non-normal distribution.

We assessed changes in the phytosanitary strategy indicators by comparing the initial and final points between and within clusters. For indicators computed as proportions, we used a Pearson's chi-squared test to test the change in indicators between the initial and final point between and within clusters. To test the evolution of numeric indicators between the initial and final points, we used a t-test. P-values are mentioned throughout the results section.

2.6.3 Characterization of changes with the Efficiency, Substitution, Redesign framework

We described the technical changes and production modes using the Efficiency, Substitution, Redesign (ESR) framework (Hill and MacRae, 1996; Pretty et al., 2018). The ESR framework distinguishes three different strategies: the first (E, efficiency) mainly seeks to optimize resources, the second (S, substitution) is mostly based on the substitution of one or more system elements and the third (R, redesign) generally focuses on reorganizing the production system. The redesign strategy is associated with both technical levers and the production mode (organic farming).

3 Results

3.1 Typology of pesticide use trajectory

3.1.1 Classification quality

The dataset used for the classification contained 161 farms. The first two components of the PCA combined 67.91% of the variance. The first PCA component, which accounts for 40.77% of the total variance, expresses the strong positive correlation between the normalized TFI upon entry in the network and the SSD. The variable slope and the slope change are also associated with this component. The second component, which explains 27.14% of the variance, is associated with three variables: *final_TFI*, *max_variability* and *slope_change*. The HCA was based on the first 2 components of the PCA.

3.1.2 Typology

Three clusters of 75, 53 and 33 farms were identified. The affiliation with one cluster significantly affected the level reached by the six quantitative indicators (Table C.3). The three types are present in almost every winegrowing region and every group (see Figure C.1 and Figure C.2) but in different proportions. Farms belonging to cluster 2 were dominant in the Bouches-du-Rhône, Provence and Alsace. In Charente and Côtes-du-Rhône, there were no farms in cluster 3. Farms belonging to cluster 1 were mainly in the Loire Valley, Charente and Côtes-du-Rhône.

The three different types of pesticide use trajectories are easily differentiated (Figure 4.21). The first type, cluster 1, corresponds to farms with lower pesticide use than cluster 3 when entering the DEPHY network and which did not decrease their TFI. The second type, cluster 2, also corresponds to farms with lower initial pesticide use upon

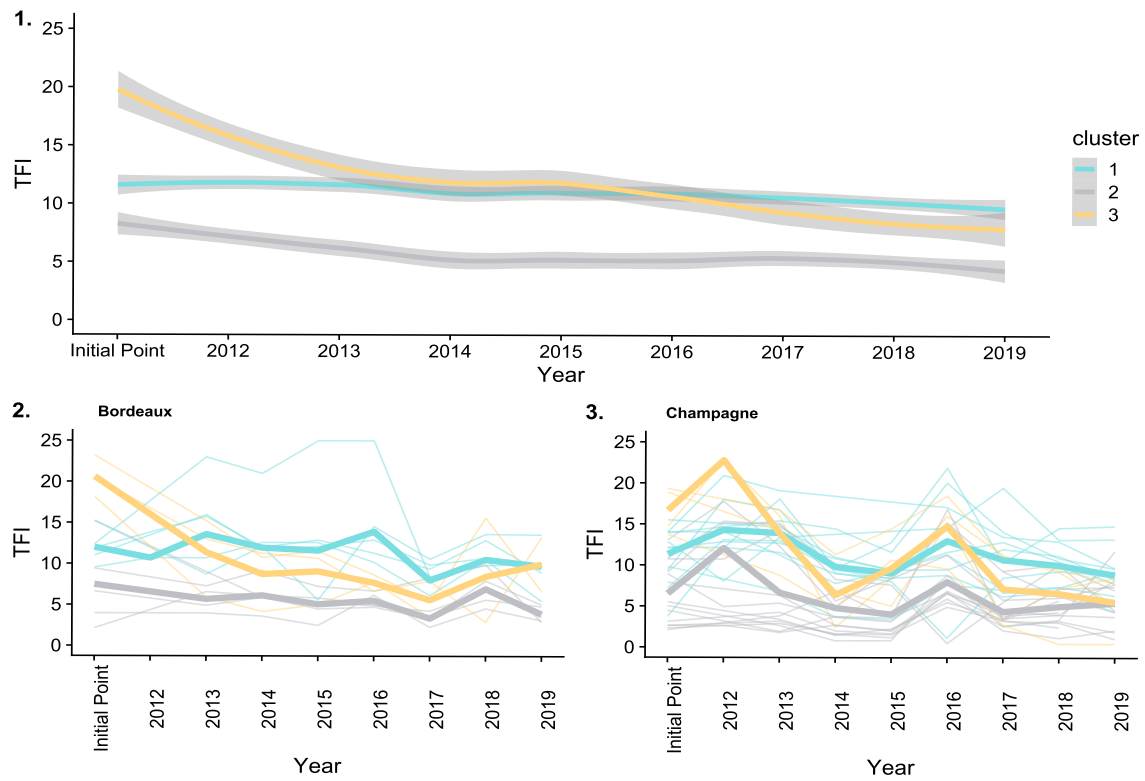


Figure 4.2 Change in the TFI per cluster (1.) Mean pesticide use trajectory per cluster. (2.) Change in the TFI per cluster in Bordeaux. The bold lines correspond to the average trajectories by type. The thin lines correspond to the individual trajectories. (3.) Change in the TFI per cluster in Champagne. The bold lines correspond to the average trajectories by type. The thin lines correspond to the individual trajectories. The changes in the TFI for the other winegrowing regions are available in Figure C.3. Cluster 1 is represented by the blue line, cluster 2 by the grey line and cluster 3 by the yellow line.

entering the network than cluster 3 and which decreased their TFI over the 10-year period. The last type, cluster 3, corresponds to farms with the highest level of pesticide use at the initial point among the three clusters and which achieved a substantial pesticide reduction over the 10-year period.

When looking at TFI changes according to winegrowing regions, the same trends are observed even in different regions. For example, for Bordeaux and Champagne (Figure 4.22 and Figure 4.23), the mean trajectories show similar trends.

3.1.3 Characteristics of the six TFI trajectory indicators for the three clusters

Cluster 1 farms presented a mean normalized TFI that was similar to the national standards (0.89). The mean TFI at the initial point was 11.6 and the mean final TFI was 9.7, which corresponds to a decrease of 1.9 TFI points. Farms in this cluster had the smallest TFI reduction (-16.4%). The mean slope is -0.23 TFI points per year. The farming systems in cluster 1 had the smallest maximum variability (0.37) and a mean SSD of 14.47. A total of 30.6% of farms in this cluster experienced a break in their trajectories. The median year of TFI slope change for these farms was 2015, with a positive mean increase of 0.68. This increase indicates a slowdown in the TFI decrease process. Cluster 2 farms were characterized by the smallest normalized initial TFI (0.52), meaning that before entering in the network, these farms were already applying around half the quantity of pesticides than other farms in the region. In the network, these farms still reduced their TFI by 48.7% with an initial TFI of 8.2 and a final TFI of 4.2, which corresponds to a decrease of 4 TFI points. The mean slope is -0.32. The cluster 2 farms also had the highest variability (0.86) but a low SSD (17.8). A total of 24% of these farms experienced a break in their trajectories during the 10-year period. The mean slope change was -1, indicating an acceleration in the process of pesticide use reduction. The median year of TFI slope change was 2013.

Cluster 3 farms had the highest initial TFI, higher than the national trends (1.53). The mean TFI at the initial point was 20.8 and the mean final TFI was 7.7, which corresponds to a decrease of 13.1 TFI points. The farms in this cluster had the highest TFI reduction rate (-63%) and the highest slope (-1.38). A large variability was observed: the SSD was highest for cluster 3 with a mean of 113 and the mean maximum of variability was 0.42. A total of 30% of the farms in cluster 3 experienced a break in their trajectories. A mean slope change of -1.7 was observed, indicating an acceleration in the process of pesticide use reduction. The median year of the slope change was 2014.

The initial TFI, slope change and SSD were significantly similar for clusters 1 and 2 (Figure 4.3). The slope break was significantly similar for clusters 2 and 3. Maximum variability was significantly similar for clusters 1 and 3. The final point distribution was significantly different among the three clusters.

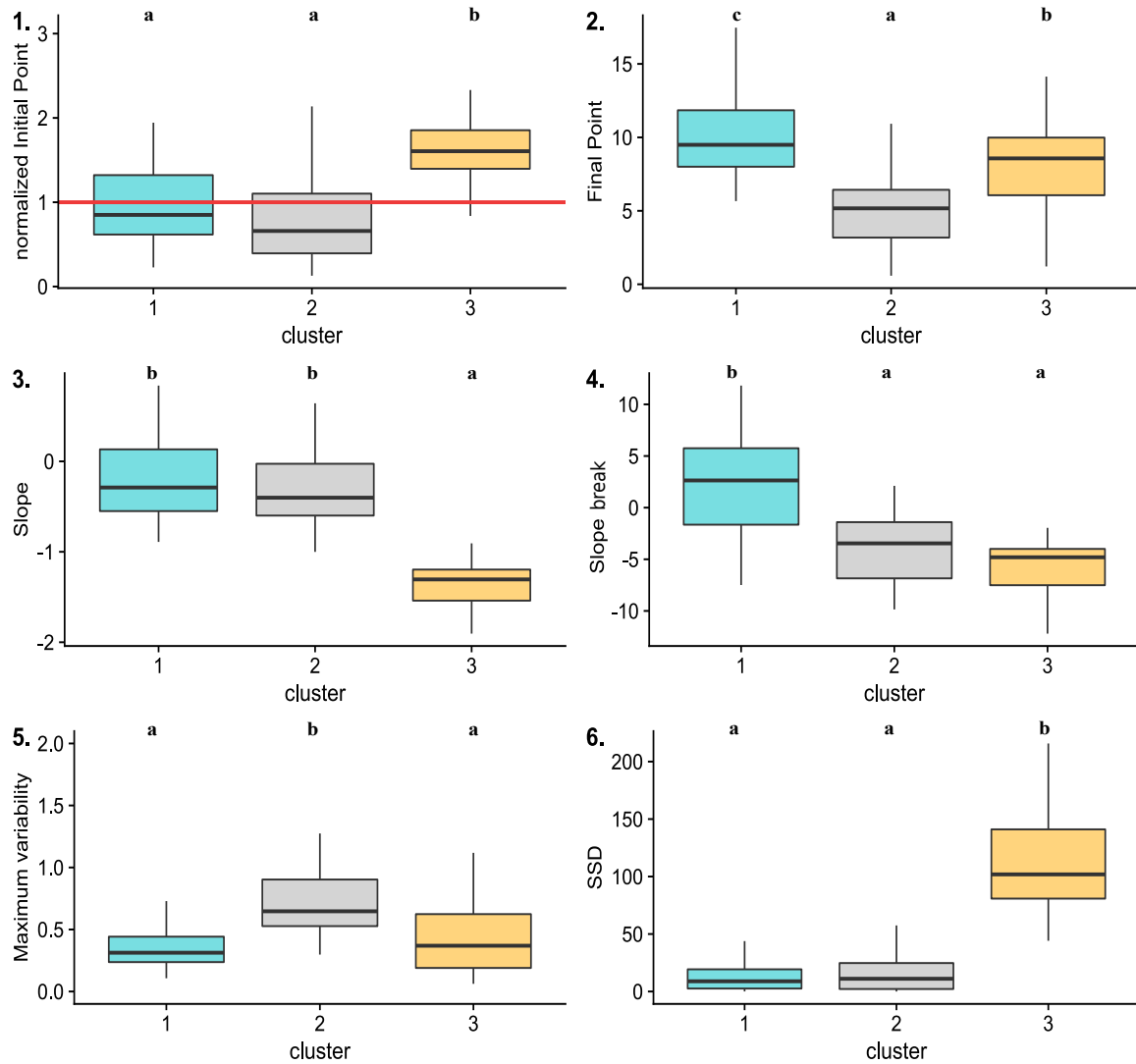


Figure 4.3 Distribution of the calculated indicators per cluster. (1.) Initial point, (2.) Final point, (3.) Slope, (4.) Slope break, (5.) Maximum variability, (6.) Sum square deviation (SSD). The horizontal black lines across the boxes represent the median. The end of the boxes represents the first and third quartiles; the whiskers indicate the minimum and maximum values. For a given indicator, distributions per cluster are significantly different if associated with a different letter (Wilcoxon test, $p < 0.05$ or Tukey test, p -value < 0.05).

3.2 Levers implemented within clusters

3.2.1 Disease control

The t-test showed a significant difference between the TFI at the initial and final points for the three clusters (t-test, $p < 0.001$, Table 4.2). The percentage of decrease, calculated between the initial point and the final point, was -16.4% for cluster 1, -49.7% for cluster 2 and -63% for cluster 3. The same trends are observed for the TFI_f as all clusters significantly reduced their fungicide use from the initial to the final point (t-test, $p < 0.05$, Table 4.2). The reduction of the fungicide dose applied per treatment was significantly different between the initial and final points within the 3 clusters (t-test, $p < 0.001$, Figure 4.5B). A significant fungicide dose reduction from 11.6% from the initial point to 2019 was observed within cluster 1, -42.8% for cluster 2 and -43.6% for cluster 3. At the initial point, the proportion of farms using biocontrol products was significantly different among the clusters (Pearson's chi-squared test, $p < 0.05$, Table 4.1). Cluster 2 had the highest proportion of farming systems using biocontrol products at the initial point (79.25%). An average 80% of the farms in the three clusters used biocontrol products at the final point (Figure 4.5A). The $TFI_{biocontrol}$ product increased significantly for cluster 2 over the 10-year period (t-test, $p < 0.01$). The number of farms using biocontrol increased over the 10-year period for clusters 1 and 3 (Pearson's chi-squared test, $p < 0.05$). The biocontrol rate increased significantly over the 10-year period (t-test, $p < 0.05$): +74.5% in cluster 2 and +115% for cluster 3. The change in cluster 1 (+32.3%) was not significant. The proportion of farms using copper and sulphur products was not significantly different between clusters at the initial point or at the final point (Pearson's chi-squared test, $p > 0.05$). Additionally, the change in the number of farms using copper and sulphur was similar between the initial and final points for the three clusters (Pearson's chi-squared test, $p > 0.05$). The quantity of copper products was stable over the 10 years for the 3 clusters (t-test, $p > 0.05$). The quantity of sulphur applied increased for cluster 2 between initial and final point (t-test, $p < 0.01$, Figure 4.5F). The proportion of farms using CMR products was significantly different among clusters both at the initial point and when tested at the final point (Pearson's chi-squared test, $p < 0.01$ for the initial and final points, Table 4.2). Regarding the change between the initial and final points, the highest rate of decrease of CMR product use was for the cluster 2 farms: at the final point, only 13% of the farms were using CMR products (Figure 4.5F). Cluster 3 had the highest proportion of farms using CMR products at the initial and final points. The mean number of CMR products used decreased significantly over the 10-year period for all 3 clusters (t-test, $p < 0.001$). Cluster 3 farms had the highest number of CMR products used at the initial point (10.4). At the final point, cluster 3 farms had the highest number of CMR

products used (3.1), similar to cluster 1 (2.9).

Table 4.1 Change in the technical levers between initial and final points. Pearson's chi-squared test was conducted between the initial and final points within and between clusters. NS: $p > 0.05$; *: $p < 0.1$; **: $p < 0.01$; ***: $p < 0.001$

		Cluster 1 (n = 75)			Cluster 2 (n=53)			Cluster 3 (n=33)			Comparison between clusters (Chi2)	
		Initial Point	Final Point	Chi2	Initial Point	Final Point	Chi2	Initial Point	Final Point	Chi2	IP	FP
Type of farming system	% of farms in conventional farming	100%	98.5%	NS	59.2%	44.4%	NS	100%	90.6%	NS	***	***
	% of farms in conversion	0%	1.49		4.1%	4.44%		0%	3.1%			
	% of farms in organic farming	0%	0%		36.7%	55.16%		0%	6.3%			
Phytosanitary strategy Fungal pressure	% of farms using biocontrol products	65.33%	81.33%	**	79.25%	83.02%	NS	63.64%	75.79%	*	*	NS
	% of farms using sulphur products	60%	70.67%	NS	77.36%	81.13%	NS	66.67%	72.73%	NS	NS	NS
	% of farms using copper products	74.7%	77.3%	NS	90.6%	86.8%	NS	81.8%	87.9%	NS	NS	NS
	% of farms using CMR products	86.7%	52%	***	58.5%	13%	***	97%	54.5%	***	***	***
Phytosanitary strategy Insect pressure	% of systems using insecticides products	44%	48%	NS	35.84%	24.53%	NS	63.64%	51.52%	NS	*	**
	% of farms using mating disruption	4%	34.67%	***	7.55%	77.36%	***	6.1%	45.45%	***	NS	***
Phytosanitary strategy Weed pressure	% of farms using herbicides	81.33%	64%	*	54.72%	16.98%	***	87.88%	72.2%	**	***	NS

Table 4.2 Change in the technical levers over time. T-tests were conducted to assess whether the reduction was significant. NS: $p > 0.05$; *: $p < 0.1$; **: $p < 0.01$; ***: $p < 0.001$

		Type 1 (n=75)	Type 2 (n=53)	Type 3 (n=33)
Pesticide strategy	Change in the mean TFI	-14.7% ***	-40.7% ***	-60.1% ***
	Change in the TFI _{biocontrol}	+4% NS	+46.6% **	-7% NS
	Change in the biocontrol share	+ 32.3% NS	+74.5 ***	+115% ***
	Change in the number of CMR products	-65.8% ***	-90.2% ***	-70.2% ***
Pesticide strategy – Fungicidal pressure	Change in the sulphur quantity sprayed	+26.4% NS	+59.5% **	+77.6% NS
	Change in the copper quantity sprayed	+15.05% NS	+52.56% NS	-13.8% NS
	Change in the TFI _f	-7.3% **	-44.4% **	-57.7% *
	Change in the fungicide dose applied per treatment	-23.8% ***	-42.8% ***	-43.6% ***
Pesticide strategy –Insecticidal pressure	Change in the TFI _i	-21% NS	-2.5% NS	-10% NS
	Change in the insecticidal dose applied per treatment	-11.6 % *	+10% NS	-13.6% **
Pesticide strategy – Herbicidal pressure	Change in the TFI _h (including TFI = 0)	-24% NS	-0.77% **	-80% ***
	Change in the herbicide dose applied per treatment	-20.6% *	+7.4% NS	-55.7% ***

3.2.2 Weed control

The change in the TFl_h between the initial and final points was significantly different for clusters 2 and 3, indicating a significant reduction in the use of herbicidal products (t-test, $p < 0.05$, Table 4.2). The change between the initial and final points in the proportion of farms using herbicides was significantly different within the three clusters (Pearson's chi-squared test, $p < 0.05$, Table 4.1, Figure 4.5C). The proportion of farms among clusters using herbicides was similar at the initial point (Pearson's chi-squared test, $p\text{-value} = 0.12$) but significantly different at the final point (Pearson's chi-squared test, $p\text{-value} < 0.001$). A significant decrease in the applied dose was observed for the three clusters between the initial and final points (t-test, $p < 0.01$, Table 4.2). Farms from cluster 1 managed to reduce their dose applications by 70%, from a mean dose of 0.61 to a mean dose of 0.19.

3.2.3 Pest control

Regarding the change in insecticidal management, a non-significant decrease in the TFl_i was observed in all clusters (t-test, $p > 0.05$, Table 4.2). However, a significant decrease in the TFl_i per treatment was observed for cluster 1 and cluster 3 (t-test, $p < 0.05$). The proportion of farms using insecticidal products was significantly different among clusters at both the initial and final points (Pearson's chi-squared test, $p < 0.05$, Table 4.1, Fig. 5D). The proportion of farms from clusters 1 and 2 using insecticidal products decreased by 19% and 46.8%, respectively. The proportion of farms using mating disruption significantly increased over the 10-year period in all three clusters (Pearson's chi-squared test, $p < 0.001$). In 2010, the proportion of farms using mating disruption was

similar among clusters (Pearson's chi-squared test, $p=0.12$) but was significantly different at the final point (Pearson's chi-squared test, $p<0.001$).

3.2.4 Production modes

The proportion of production modes (conventional farming, organic farming or in conversion) between clusters was significantly different at the initial and final points (Pearson's chi-squared test, $p<0.001$, Table 4.1, Figure 4.4) At the initial point, 100% of the farms in clusters 1 and 3 had a conventional farming system. At the final point, a large majority of the farms had conventional farming systems in cluster 3 (90.6%) and cluster 1 (98.5%). For the cluster 2 farms, a higher proportion of farms had an organic farming system (36.7% at the initial point) compared to clusters 1 and 3 (0% for both). Some 36.7% of the farming systems had already converted to organic farming at the initial point. In cluster 2, farming systems in conversion to organic farming appeared as soon as they entered the network. For cluster 3, conversions towards organic farming started in 2016 and represented 6.3% of the cluster. The proportion of farming systems in conversion to organic farming in 2019 at the final point was 1.49% for cluster 1 and 3.1% for cluster 3. Cluster 1 did not include any farms with organic farming systems at the final point. However, these proportions were similar at the initial and final points within each cluster.

3.3 Change intensity

Looking at each type, we observed that cluster 1 corresponded to farms that were already using pesticides efficiently when they entered the network: their normalized TFI was lower than 1 at the initial point. It seems that these farms did not implement new levers, and a large majority of them continued using CMR products and herbicides Figure 4.4. However, a progressive transition towards reducing herbicide, insecticide and fungicide doses was observed. These farms moved towards greater efficiency and substitution. When we looked at cluster 2 farms, we noticed that they were already well advanced in terms of efficient pesticide use (Figure 4.6). In all, 36.7% of farms were engaged in organic farming at the initial point and 55.2% at the final point. A few farms were already using CMR and herbicidal products (58.5%). A high dose reduction of TFI_f was observed and associated with an increase in efficiency. The reduction in the sprayed fungicide dose with no decrease in the quantity of copper products used demonstrated efficiency-based strategies. At the final point, a large majority of the farms were using mating disruption and biocontrol products. These changes were related to the large of the farms in organic farming or in conversion to organic farming. The technical levers associated with this mode of production were the use of copper and

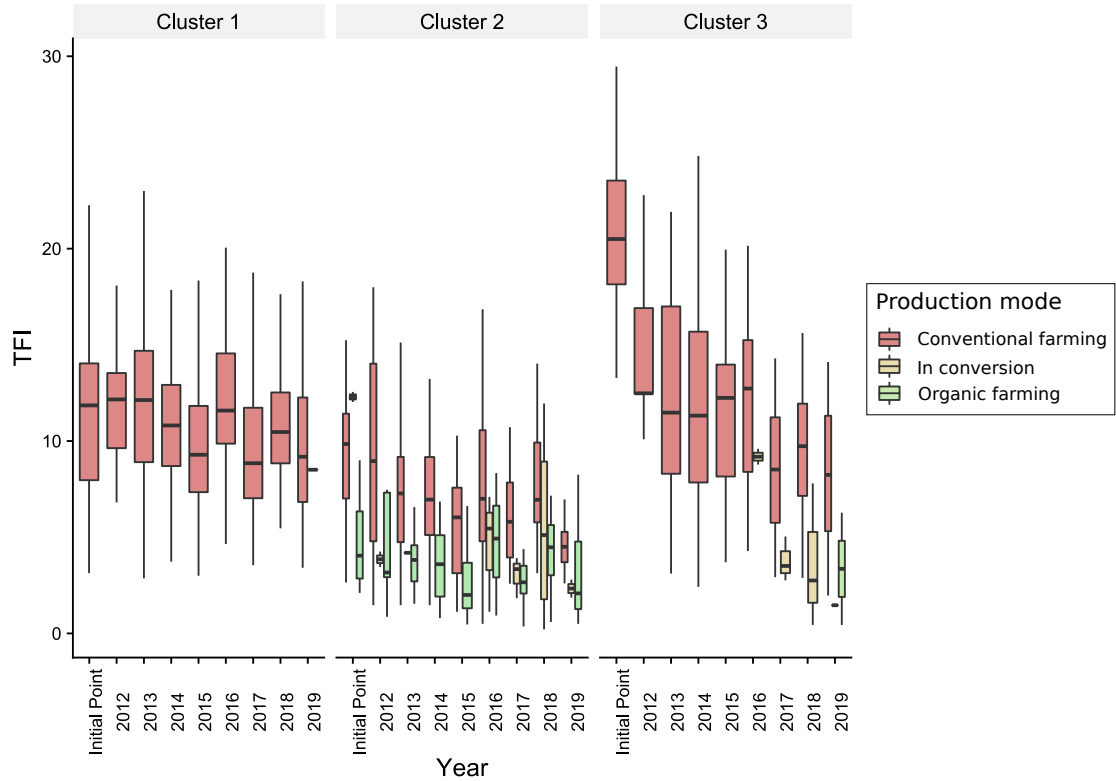


Figure 4.4 Change in the TFI by cluster and production mode. Outliers are not represented. Whiskers display the 5th and 95th percentiles. Horizontal bars indicate the first quartile, median and third quartile.

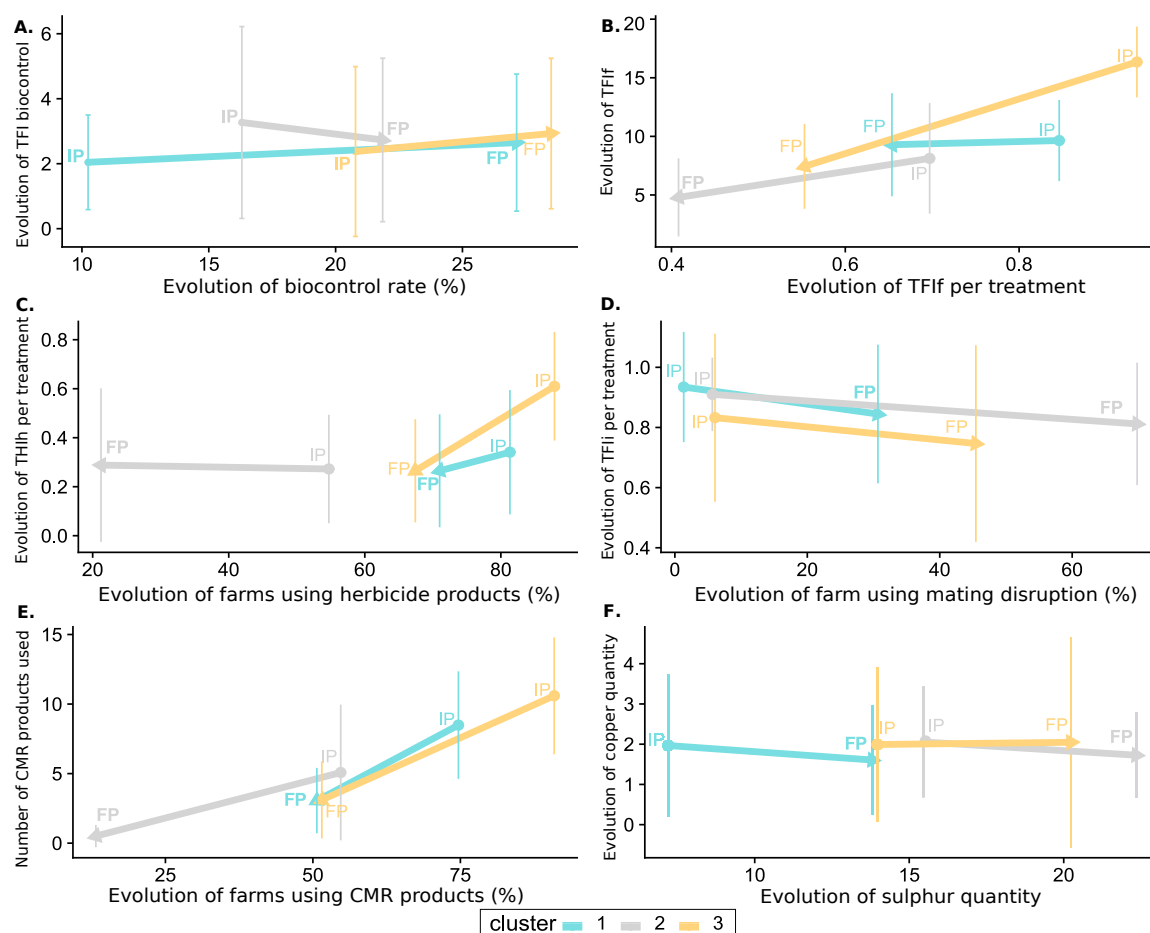


Figure 4.5 (A.) Change in the biocontrol rate based on the $TFI_{biocontrol}$ between the initial point (IP) and final point (FP) for each cluster. (B.) Change in the fungicide dose based on the TFI_f change between the IP and FP for each cluster (C.) Change in the TFI_h and the percentage of farms using herbicide products between the IP and FP for each cluster. (D.) Change in the percentage of farms using mating disruption depending on the mean TFI_i per treatment between the IP and FP for each cluster. (E.) Change in the percentage of farms using carcinogenic, mutagenic, or toxic for reproduction (CMR) products based on the number of CMRs used between the IP and FP for each cluster. (F.) Change in the applied sulphur quantity based on the applied copper quantity between the IP and FP for each cluster.

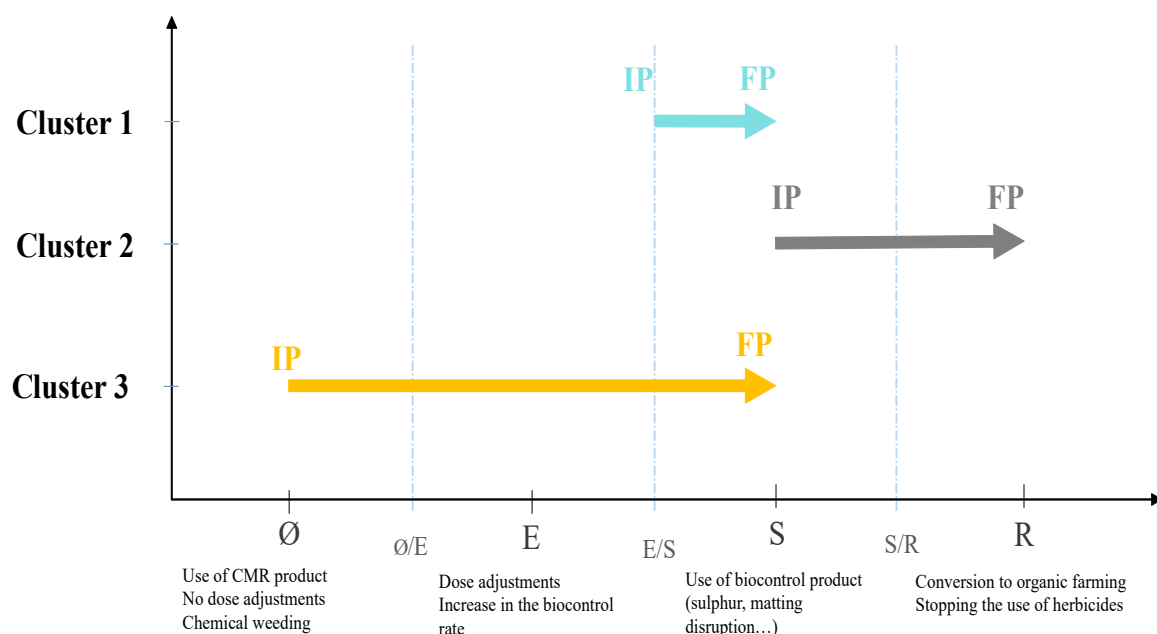


Figure 4.6 Summary of changes observed between the initial point (IP) and final point (FP) for each cluster based on the Efficiency, Substitution, Redesign (ESR) framework (Hill and MacRae, 1996). The phytosanitary strategies of each cluster are positioned on an ESR gradient, which also includes Ø (corresponding to an absence of phytosanitary strategy reasoning). Practices corresponding to each strategy were associated with each letter (Ø, E, S, R). We also distinguish the transition between each strategy (Ø/E, E/S, etc.).

sulphur, the cessation of systemic products and the implementation of soil tillage when farms stopped using herbicides. Cluster 3 farms entered the DEPHY network with a high consumption of pesticide products and experienced the highest TFI decrease (Figure 4.6). Looking at the changes occurring over the 10-year study period, we observed a high dose reduction affecting all phytosanitary treatments (insecticides, fungicides and herbicides). The reduction of the TFI_h and the slight reduction of the number of farms using herbicides indicated a decrease in the weeded strip (only under the row) rather than a total cessation of herbicide use as observed in cluster 2. The biocontrol rate over the global TFI increased while the TFI biocontrol remained stable. These changes indicate a reduction of the TFI without substituting biocontrol products. All these elements indicate substantial efficiency gains and substitution in these farms. In summary, the pesticide reduction strategies for cluster 1 and cluster 3 were mainly based on efficiency and substitution and differed in their initial levels of pesticide use when entering the network. Cluster 2 farms undertook deeper changes, moving towards more redesign-based changes.

4 Discussion

This paper aimed to characterize and understand the various pesticide use trajectories within the DEPHY network. The method used allowed us to identify three types of pesticide use trajectories. The three types are significantly differentiated by their initial TFI, the path taken (slope, decrease, variability, rupture) and their final TFI. The farms were categorized into the different types and are found across all winegrowing regions. The typology developed was both robust and exceeded the winegrowing region effect, a factor that can impact pesticide use intensity (Fouillet et al., 2022). This means that the three types of trajectories identified were the result of the winegrowers' own strategies rather than the consequences of the particularities of the winegrowing region.

All three trajectory types showed a significant reduction in pesticide use, but the reduction differed in intensity. The farming systems in cluster 1 experienced the smallest TFI decrease (-14.7%). Farming systems from cluster 2 managed to reduce their TFI by 40.7%, while the cluster 3 farming systems experienced the highest TFI decrease of 68.8%.

The differences in TFI reductions between clusters can be explained by the potential for improvement expressed at the initial point. Indeed, the farming systems from the three clusters differed in terms of the initial point. We observed that cluster 3 farms entered the DEPHY network with a high normalized TFI, indicating pesticide use that exceeded the national average. Cluster 1 and 2 farming systems both started with a low initial TFI compared to the national average TFI value. However, their pesticide use reduction was different. We can assume that these clusters differed in terms of technical levers implemented before and after the farms entered the DEPHY network. Thus, the initial point appears to be a key point of the transition towards a low-input farming system. Ross et al. (2008) formalized that the path taken strongly depends on the initial state. Merot and Smits (2020) showed by using a typology of technical changes for vineyards in conversion to organic farming that the path taken by farms was also highly dependent on the initial state. Our results suggest that it is easier for systems starting with a high TFI to reduce their TFI than for those starting with a low TFI to achieve further decreases.

Slope breaks, reflecting a rapid evolution in the TFI trajectory, were observed in farms from all clusters. Clusters 2 and 3 both experienced an acceleration in the pesticide use reduction process during the studied time period which appeared more quickly for cluster 2. This high and rapid TFI decrease was linked to the implementation of several levers that allowed for a faster TFI decrease. A total of 30.6% of the farms from cluster 1 experienced a considerable increase in the TFI between 2014 and 2015. This increase can be linked to higher pest and disease pressure in a given year. Whatever the direction of

the change in the trajectory, the year of change is specific to each farming system.

The three clusters were also characterized by the variability around the slope, which provided information about the specific farming system's sensitivity and adaptation to abiotic and biotic hazards over time (Martin et al., 2017). These variabilities were partly linked to the adaptation of treatments to pest and disease pressure. The year effect on pesticide use was substantial (Mailly et al., 2017). An increase in the TFI was observed in 2016 and again in 2018 when winegrowers contended with severe infestations of downy mildew (Fouillet et al., 2022). Differences in climatic conditions also lead to variability in practices over time and space (Mailly et al., 2017). The highest variability around the slope was observed for cluster 2 farms. Cluster 1 corresponded to the farms with the smallest maximal variability and SSD. For clusters 2 and 3, we observed a high dose reduction of fungicide treatments indicating that winegrowers in these clusters adapted their pesticide treatments depending on the period or pest and disease pressure (Fouillet et al., 2022). Thus, we can assume that winegrowers who adapted their pesticide treatment according to pest and disease pressure experienced a higher variability of pesticide use. TFI increases were higher in years with high pressure, while decreases were greater in years with low pressure. Unlike cluster 1 farms, the cluster 2 farms managed to adapt their phytosanitary practices according to the climatic conditions and pest and disease pressures.

In our study, we considered an initial TFI (the year of entry into the network) and final TFI. The initial and final TFI are arbitrary because farmers may have started to reduce their pesticide use before entering the network and continued to implement technical levers after the final point. Unlike the conversion to organic farming, the reduction of pesticide use does not have a specific legal compliance period (Lamine et al., 2009). The speed and intensity of change was therefore different for each farmer. Practices can more easily be readjusted from one year to the next, such as when they are adapted to disease risks. Based on the example of the cluster 1 farms for which we did not observe major changes, changes were mainly based on efficiency and substitution. Thus change at a slow speed and low intensity was observed in farms already using pesticides efficiently before entering the DEPHY network. At the initial point, it seems that cluster 1 and 2 farms had already begun transitioning towards reducing their pesticide use based on their initial TFI and management strategies. Meanwhile, cluster 3 farms started with a high initial TFI, and the analysis of their pesticide strategies at the initial point indicated limited adjustments of phytosanitary treatments. However, the high TFI decrease indicated that entering the DEPHY network was associated with a trigger event (Sutherland et al., 2012) for the cluster 3 winegrowers. Entering the network seemed to have less impact for farms in cluster 1, while farms in clusters 2 and 3 managed to quickly reduce their TFI.

However, entering the DEPHY network allowed cluster 1 winegrowers to maintain a low TFI throughout the 10-year period.

Furthermore, the typology allowed us to characterize differences in technical changes that were implemented. In fact, clusters of TFI trajectories differed in terms of technical lever implementation and the intensity of change (Figure 4.4 and Figure 4.5). Winegrowers managed to reduce their pesticide use by combining these different technical levers. The difference in terms of TFI reduction between clusters can be explained by the initial point as discussed previously as well as by the intensity of the changes implemented. The levers mobilized by all farms – dose reduction and use of non-CMR products – constituted a first step in reducing pesticides. These changes mostly centred on efficiency and substitution. Other levers were, however, mobilized in clusters 2 and 3, such as mating disruption. They resulted in a decrease in the TFI_i (see Figure 4.5). Other levers, such as stopping herbicidal product applications, were distinctive for cluster 2, which saw the lowest pesticide use at the final point. The implementation of mechanical weeding indicated a higher intensity of change: the more herbicides were stopped, the more the TFI decreased. Within cluster 2, a majority of farms had a production method associated with organic agriculture whose control of cryptogamic diseases relied mainly on the use of copper and sulphur. While organic farming practices in vineyards are seen as a way of reducing pesticide use, they lead to an increase in the application of other products such as copper and sulphur (Merot and Wery, 2017). However, the intensive use of these substances can be controversial (*e.g.* there is some debate on the ecotoxicity of copper). A study by Karimi et al. (2020) showed that the maximum authorized yearly dose of copper in France (6 kg/ha) had no significant impact on the soil quality function. Regardless, reducing the use of these products requires the implementation of deeper change such as preventive measures (Jeuffroy et al., 2022). We found that the main levers implemented by the winegrowers were not disruptive practices. We observed that the more intensively these levers were implemented and combined, the more the TFI decreased. And the more these levers were implemented and combined, the more difficult it was to reduce TFI.

Looking at the difference of initial point, the change intensity and the final point, we can assume that there was a kind of continuity between the TFI trajectories. By starting with a high pesticide use and experiencing a high TFI decrease by implementing changes of low intensity (cluster 3 TFI trajectory), winegrowers had two possible pathways: i) a low pesticide use reduction linked to the implementation and adaptation of technical levers mainly based on efficiency and substitution (cluster 1 TFI trajectory) or ii) achieving a greater pesticide use reduction by implementing levers associated to redesign strategy (cluster 2). We also wondered if the trajectory from cluster 2 could even be the continuity of cluster 1 trajectory. While it was easy to reduce the TFI by implementing simple levers

such as dose reduction or the use of biocontrol, to reduce the TFI sustainably, clusters 1 and 3 had to implement deeper changes.

The three types of trajectories showed a connection to knowledge and learning. Trajectories of changes are not simply due to a willingness to adopt a new practice – they also depend on farmers’ knowledge and efforts to learn (Sutherland et al., 2012). In terms of implementation, several studies showed that knowledge of change was acquired progressively in connection with a learning process (Chantre, 2014; Chantre et al., 2015; Coquil et al., 2014). Some practices require special equipment, new skills and specific knowledge (Blesh and Wolf, 2014; Salembier et al., 2020). For example, mechanical weeding is more complex than chemical weeding. This practice requires new knowledge about the state of the soil, vegetation and suitable equipment (Garcia et al., 2018). In terms of risks taken, mechanical weeding increases the costs of production and labour time (Jacquet et al., 2019). Changes in management strategy combined with technical changes increase the complexity of the farming operations (Aouadi et al., 2021). Obstacles related to the farm context (*e.g.* farm size, commercialization mode) also impact the technical changes. Thus farmers need support from advisors or a peer group when implementing new practices and a system redesign aimed at pesticide reduction (Darré, 1985; Guichard et al., 2017). Advisory services provided by the network engineer in the DEPHY farm network played a key role in reducing TFI. In fact, the collectives and advisors were change agents (Ansaloni and Fouilleux, 2006; Cerf et al., 2010). Advisors supported and organized the learning process and knowledge capitalization (de Tourdonnet et al., 2015).

Finally, we showed that the initial point indicated a potential of improvement available to winegrowers. To help winegrowers reduce their pesticide use, qualifying their initial point is a necessary step. Doing so can allow advisors to better guide winegrowers towards the levers they need to implement by identifying the levers they are already using and the levers which can be intensified. Whatever the trajectory type considered, this study showed that a deep redesign is complex to implement and implies taking risks that impact all performances (*e.g.* yield loss) and the organization of farm operations (Aouadi et al., 2021; Jacquet et al., 2022). The implementation process is a key issue to support farmers in their change process. For farms wishing to engage in an agroecological transition, our results show that the support offered within the framework of the DEPHY network allowed farms to either reduce their TFI or maintain a lower TFI than the average. Nevertheless, these results show that the levers implemented and the changes made do not permit farmers to completely stop using pesticides. Other changes and innovations seem necessary to achieve this objective. The AGROSYST database does not allow for research on learning-related issues. However, this database has generated “big data” on farms moving towards pesticide use reduction, and the information it gathers makes it

a unique source worldwide (Lamichhane et al., 2019). The difference in pedoclimatic contexts and geographical situations showed the feasibility of the ECOPHYTO objectives at a national scale and the potential of TFI reduction for the whole sector. The data provided by the database give users information on how the pesticide reduction impacts crop yields and the economy (Lechenet et al., 2014, 2016, 2017). Fouillet et al. (2022) showed the regional specificities of the TFI changes in the DEPHY farm network from the initial point to 2019. The typology used in this study allowed us to go beyond winegrowing region specificities and to gain knowledge in terms of genericity. This method makes it possible to see the general pesticide use trajectory of farms to better support farmers in their transition process.

5 Conclusion

The method constructed in this study allowed us to identify three pesticide use trajectories. The trajectories differed in terms of the types and intensity of changes implemented during the vineyard transition towards low-pesticide cropping systems. Winegrowers managed to reduce their TFI by combining technical levers with different intensities between types. We observed that levers used by farmers resulting in a pesticide use reduction were mainly based on efficiency (*e.g.* reducing fungicide dose) and substitution (use of biocontrol products). The same levers that were implemented in all types but with differences in terms of intensity explain the difference of pesticide use reduction. We found that the lower the TFI and the more intensively these levers were combined, the more difficult it was to reduce. The pesticide use reduction depended on the initial point and the levers implemented. These indicators should be taken into account by advisors when supporting winegrowers in their pesticide use reduction. The types identified provide a solid foundation for further in-depth studies of the transition away from pesticide-intensive cropping systems to more precisely identify the levers implemented and their implementation over time.

Chapitre 5

How do environmental and socio–economical performances covary during the pesticide use reduction process?

Contenu du chapitre :

Ce chapitre analyse la dynamique des performances au cours du processus de réduction de l'utilisation des pesticides et vise à identifier d'éventuels co-variations entre ces performances. Les questions autour des compromis entre performances posent des enjeux cognitifs et méthodologiques. En effet, il existe encore peu de connaissances scientifiques sur l'impact des changements de pratiques sur le temps long à l'échelle du système de production.

Les méthodes scientifiques permettant l'analyse dynamique des systèmes de production sont peu nombreuses. Nous avons utilisé le modèle PLS-PM (Partial Least Square - Path Model) pour évaluer le compromis entre les performances environnementales, techniques, socio-économiques et de productivité au cours du processus de réduction de l'utilisation des pesticides. Le modèle a été construit sur la base des connaissances existantes sur les processus de transition et la réduction de l'utilisation des pesticides dans les vignobles. Pour prendre en compte la dynamique du changement, nous avons considéré la valeur initiale et la pente extraite du modèle linéaire pour chaque variable. Cette étude se base sur les données de 161 systèmes de culture étudiés au cours du Chapitre 5.

Résultats principaux :

- Le modèle construit a été validé et aucune corrélation significative n'a été identifiée entre la réduction de l'utilisation des pesticides (TFI) et les performances économiques (coûts d'exploitation et consommation de carburant) et techniques (temps de travail mécanique) et la productivité (rendement).
- La réduction de l'utilisation des fongicides et des herbicides n'a pas d'effet significatif sur l'évolution des rendements.
- La stratégie initiale de désherbage a un impact sur l'évolution de la stratégie de désherbage.
- L'arrêt des herbicides n'a pas eu d'effet sur le temps de travail mécanique ni sur les coûts.

Ce chapitre est rédigé sous la forme d'un article qui sera soumis dans la revue *Journal of Cleaner Production*. La construction de la méthode et l'analyse des résultats ont été fait avec l'aide de Anne Merot, Aurélie Metay, Clément Rigal, Marie Gosme, Nathalie Smits.

Abstract

Grapevine is a crop facing high pest and disease pressure. Pesticide use remains to this day the most efficient method to obtain satisfactory yields in terms of quality and quantity. To reduce pesticide use, a diversity of levers exists with different intensities of change and are implemented at different spatial and temporal scales. Meanwhile, winegrowers need to maintain an economically viable agricultural production. These multiple objectives are sources of possible conflicts and lead to compromises. To understand the dynamics of different performances, it is thus necessary to analyse how these performances covary and clarify the shape of the relations between them: trade-offs, synergies or others. These relationships are likely to evolve with time, probably over several years as vineyards are perennials. Moreover, it is necessary to work at farming system level to evaluate economic and organizational performance. Use of the Agrosyst database. We used Partial Least Square – Path Model (PLS-PM) to assess the relationships between environmental, technical, socio-economic and productivity performances during the pesticide use reduction process. The model was constructed based on existing knowledge on transition processes and pesticide use reduction in vineyards. To take into account the dynamic of change, we considered the initial value and the extracted slope from linear model for each variable. The constructed model was validated and no significant correlation between pesticide use reduction (TFI) and economic (operating costs and fuel consumption), technical performances (mechanical worktime) or productivity (yield). Interestingly, we didn't observe any effect of the fungicide use reduction on the yield. The initial strategy of weed control strategy impacts the evolution of the weed control strategy ($\beta = 0.18$). The stop of herbicide had no effect on mechanical worktime nor costs. Our results are encouraging in terms of maintaining both agronomic and economic performances in a context of pesticide use reduction.

Keywords : pesticide use reduction, trade-off, TFI, yield, dynamic, vineyard

1 Introduction

The negative effects of pesticide use on environment and human health is considered a public concern (Aulagnier and Goulet, 2017). Pesticide use reduction is therefore a major issue to increase agricultural sustainability. Transition towards low pesticide-based systems are needed. The wine sector is also concerned by debates about pesticide use. It is one of the most intensive agricultural sectors in terms of pesticide use (Urruty et al., 2016b) as vineyard is a crop facing a strong pest and disease pressure. In 2019, the average Treatment Frequency Index (TFI, Pingault et al. (2008)) for the French vineyards, was from 12,4 with 18 treatments. 81% of the TFI is represented by fungicide treatments (Simonovici and Caray, 2021). As a comparison, wheat average TFI for wheat (a major annual crop in France) was 4.9 in 2017 (Crisan, 2019). The use of pesticides products remains to this day the most efficient solution for winegrowers to obtain satisfactory yields in term of quality and quantity (Fermaud et al., 2016). Winegrowers need to change their practices to be less dependent on the use of pesticides and reduce their negative environmental impacts.

To reduce pesticide use, several technical levers exist that have variable impacts on the farming system organization (*e.g.* increase of the working time, complexification of the work). Hill and MacRae (1996) classified the intensity of changes implemented through the use of the ESR framework (Efficiency, Substitution, Redesign). Increasing inputs' efficiency represents the first step to reduce pesticide use (reduction of the dose) (Hill and MacRae, 1996). It corresponds to the reduction of inputs by optimizing the dose and frequency of the treatment (Fouillet et al., 2022). The second step, Substitution (S) corresponds to the replacement of chemical products with non-chemical pest control products or by a chemical treatment with a lower environmental impact. The last step, Redesign correspond to more complex changes at the farming system scale. For each of these three steps, a diversity of levers exists but all are partial. A combination of these levers is usually necessary to achieve an effective reduction in pesticide use due to the partial effect of technical levers (Jeuffroy et al., 2022).

As technical levers are implemented at different spatial scales and intensities, they have different impacts in terms of farm organisation and working time. Thus on an operational level, doses can be adapted for each treatment intervention taking into account the vine sensitivity and fungi pressure. Farmers can also choose to substitute synthetic products with copper or sulphur based products on one plot, several plost or the whole farm. This tactical decision potentially impacts potentially work organization as copper or sulphur-based products are more leachable. Their use implies more interventions per season

and more work (Merot et al., 2019). On a more strategic scale, replacing herbicide by mechanical weeding required investments. New equipments are needed to till, inter-weed or mown (Merot et al., 2019). The consequences of changes are therefore technical but also organizational and economical.

To sustainably reduce their pesticide use, winegrowers need to change their practices while maintaining an economically viable agricultural production during the whole process of transition. The pesticide use reduction process implies a change in the farmers' objectives, which is no longer only to maximize yields (Jacquet et al., 2022). The existence of multiple objectives on environmental and economic performances, are sources of conflict and will lead to compromises (Klapwijk et al., 2014). Indeed, competition between activities can occur at the farming system level (Delecourt et al., 2019). For example, increase of working time and costs as well as productivity decrease have been observed when winegrowers implement mechanical weeding to replace chemical weeding (Jacquet et al., 2019).

To understand the pesticide use reduction process and then better support winegrowers during their transition, it is thus necessary to acquire knowledge on the covariations between the performances. To identify and understand potential trade-off between performances, researchers design and assess low-input cropping systems (*de novo* design, Meynard et al. (2012)). Within the experimental DEPHY-Network for example, some experimental plots with low pesticide use were designed (Métral et al., 2018; Thiollet-Scholtus et al., 2019). The new designed systems are then assessed through the use of tools and indicators (*e.g.* multi-criteria evaluation) and the impact of the new technical strategies on environmental, economic, technical and agronomic performances was quantified (Métral et al., 2018; Thiollet-Scholtus et al., 2019). However, it is necessary to take into account the real production situations, different from the experimental situation (Jacquet and Jouan, 2022).

Numerous studies have proposed methods for multi-criteria assessment of the farming systems sustainability since the 2000 (Soulé et al., 2021). Two types of methods can be distinguished in practice: the conventional methods focusing on farming system assessment (Repar et al., 2017) and Life Cycle Assessment (LCA) focusing on the product and covering a wider domain that just what happen in the field (input fabrication and waste disposal). Among these methods we have not found a method proposing a dynamic view on the farming systems during their transition towards lower pesticide-based systems. In fact, these assessment tools targeted the assessment of static and productivist farming systems and assessing the efficiency of the new set up technical strategy are efficient (Aouadi et al., 2019).

To identify and understand the dynamic co-variation between performances during pesticide use reduction process, it is necessary to work at the production system scale in order to take into account the economic and labour evaluation. The production of knowledge on the evolution of performances during the process of pesticide reduction can make it possible to anticipate certain obstacles, in particular yield loss, which is a major locking to change practices (Chèze et al., 2020). This paper aimed at identifying and understanding the effect of pesticide use reduction process on the productivity and socio-economic performances over the long time (10 years). We hypothesized that, during a pesticide use reduction, yields decrease and manual and mechanical working times increase. To explore these potential trade-offs over time we used a Partial Least Square - Path Modelling including dynamic indicators.

2 Materials and Methods

2.1 DEPHY Network and AGROSYST Database

In France, the DEPHY network was created in 2010 with the aim of demonstrate the capacity of farms to reduce their pesticide use. Farmers voluntarily participate in the network. 280 vineyards were engaged between 2010 and 2012 and another 270 vineyards joined in 2016. Vineyards are distributed across the 12 main French winegrowing regions (Alsace, Bordeaux, Bouches-du-Rhône, Bugey-Savoie, Burgundy, Champagne, Charente, Côtes-du-Rhône, Gaillac, Languedoc, Loire-Valley, Provence). Winegrowers are divided into groups facilitated by network advisors. Network advisors guide farmers during their progress toward pesticide reduction. Data on practices and performances of cropping systems, collected every year by network advisor, are gathered in the AGROSYST database.

Information is available for each year as soon as a farm participates to the network.

The AGROSYST database provides information on pesticide use and agronomic indicators such as yield. Some performance indicators (*e.g.* time of use of equipment, operating cost) were also calculated by the AGROSYST Team. We studied 161 cropping systems for which we had at least 6 years of data without missing information for the variables studied.

2.2 Knowledge gained previously on the DEPHY Network and potential covariations on performances

These cropping systems had already been studied in a previous work (Fouillet et al., 2022). It was shown an average pesticide reduction of 33% on the whole network based on TFI analysis (Fouillet et al., 2022). A diversity of TFI trajectories was observed and summarized in three types (Fouillet et al., *in progress* Chapitre 4). These three types differed by the TFI level at the engagement in the DEPHY network (Initial TFI). The higher the initial TFI was, more important was the TFI reduction between 2010 and 2019. The TFI reduction was explained mainly by the fungicide reduction and at the margin by herbicide reduction during the 10-year time extend of the study (Fouillet et al., *in progress*, Chapitre 3). Three major levers were identified to achieve fungicide reduction: dose reduction, decrease in the number of treatments, partial or total substitution of synthetic products by copper-based products and biocontrol (including sulphur). We can assume that a dose reduction and the reduction of the number of treatments directly reduces the production costs. The decrease of the number of treatments impacts also the mechanical work and all associated impacts (fuel consumption, mechanical costs, labour). A contrario, the fact that winegrowers resort to biocontrol and copper based products could increase the number of treatments. Indeed, copper and sulphur are more leachable and not systemic. Their use requires more regular interventions (every 8 days in average instead of every 14 days) and increase interventions before and after rain (Merot et al., 2019). If the treatments are not performed at the right time, damages on berries and yield losses can be observed (Merot and Smits, 2020). The herbicide TFI reduction was associated to the stop of herbicide on a part or the totality of the vineyard (few inter-rows, all inter-rows, under the rows) (Fouillet et al., 2022). Chemical weeding can be replaced by mechanical weeding or mowing that are completely different techniques involving new material (undervine weeder, cover crop, mower...) and more interventions. This change can increase the fuel consumption, the production costs and labour. An unsuitable weed management can lead to a higher concurrence for water and nitrogen and a decrease in yield potential (Merot, 2022; Celette and Gary, 2013).

2.3 Individual analysis of the performances

2.3.1 Performance variables

Seven variables were selected. They are calculated by the Agrosyst team on the Agrosyst data. These variables let to characterize the evolution of disease and weed control strategy, productivity, labour and costs over the 10 years of the study.

- Disease and weed control strategy:

Treatment Frequency Index : The level of pesticide use was estimated by calculating TFI. TFI is the main indicator used within the DEPHY Network to assess the pesticide use evolution. We calculated TFI with the recommended dose established for each product for any targeted pest or disease. The TFI was calculated with the applied dose expressed as a fraction of the dose recommend to control specific targeted pests or diseases and by the proportion of sprayed area (Equation 5.1, Fouillet et al. (2022); Pingault et al. (2008)).

$$TFI = \sum_p \frac{Dose\_sprayed_p}{Dose\_recommended_p} \times \frac{Area\_sprayed_p}{Area\_total_p} \quad (5.1)$$

Equation 5.1 : Calculation of the TFI (Pingault et al., 2008) for a given year at the farming system scale. The dose sprayed per product corresponds to Doses_sprayed; the recommended dose for a product P for the target pest is Dose_recommended; Area_sprayed represents the surface area where the product was applied and Area_total is the total surface of the field where the treatment was sprayed (Pingault et al., 2008)

We differentiated three partial TFI taking into account one target only: fungicide TFI (TFI_f), insecticide and acaricide TFI (TFI_i) and herbicide TFI (TFI_h).

- Mechanical work intensity:

Mechanical working time (hour.ha⁻¹) : This indicator is calculated for each operation, taking into account the time spent using the equipment and the number of people mobilized to carry out this operation. Mechanical working time is calculated for the season (from the previous harvest to the harvest of the current season).

Fuel consumption (L.ha⁻¹): The fuel consumption is the quantity of fuel used for all the interventions that mobilize a combination of tools. It is calculated for each of the interventions that mobilize a combination of tools based on references

from the Bureau Commun du Machinisme Agricole (BCMA). The calculated fuel consumption is part of the mechanization costs.

- Costs

Operational cost ($\text{€}.\text{ha}^{-1}$) : This indicator corresponds to expenses related to the purchase of inputs (seeds and plants, mineral and organic fertilizers, seed and plant treatment, irrigation and phytosanitary products, biological control products, other inputs). In order to calculate these operational expenses, the prices of the inputs given by the users are used. In case of absence of information on the price of an input, AGROSYST uses the price present in its reference frame (from AGROSYST) for the considered campaign.

Tractor labour cost ($\text{€}.\text{ha}^{-1}$) : The tractor labour costs are calculated from the time of use of the equipment. We consider that one hour of tractor operator costs 18 euros. This value was determined by the AGROSYST Team.

- Productivity

Yield ($\text{hL}.\text{ha}^{-1}$) : Reported yield was collected each year. Yield values are declared by winegrowers.

2.4 Statistical analysis performed on performance variables

The general evolution over time of each performance was assessed using a linear mixed-effects models (Equation 5.2). We assumed that each raw variable X varied over time and by wine-growing region. Wine-growing region was integrated as a fixed effect to collect the slope and intercept coefficients and cropping systems followed over the time was integrated as a random effect.

$$\text{mod} = \text{lmer}(X \sim \text{Year} * \text{Winegrowing Region} + (1 + \text{Year} | \text{cropping system})) \quad (5.2)$$

Equation 5.2 : Linear models used to visualise the evolution of a variable X over the 10 years of the study taking into account the winegrowing region effect (Winegrowing Region). The cropping system effect followed over time is integrated as a random effect. The equation is formulated using the language of the lme4 package of the R software.

A t-test between Initial Point and 2019 was performed to precise if a significant difference existed between initial point and final point.

2.5 Co-variation analysis of the performance variables

2.5.1 Calculated variables indicating on the dynamics of the performances

To analyse the covariations between performances during pesticide reduction, we are not interesting in the individual raw variables presented above but by their evolution over the time of the study and their initial value at the entry in the network. To assess the evolution of variables over time, we used dynamic indicators inspired from the methods of Martin et al. (2017) and Fouillet et al., (*in progress*). We extracted the slope of the linear model of each raw variable as a function of the time to reveal the general evolution between initial and final value (increase, decrease or stagnation) (see Figure 5.1). Initial Point was also extracted for some variable. The variable corresponding to slope extraction were named $Evo\_<variable\ name>$ and initial point $Ini\_<variable\ name>$. All calculated variables of the evolution of the raw variables are available in Table 5.1. Finally, we calculated 9 variables indicating of performances evolution.

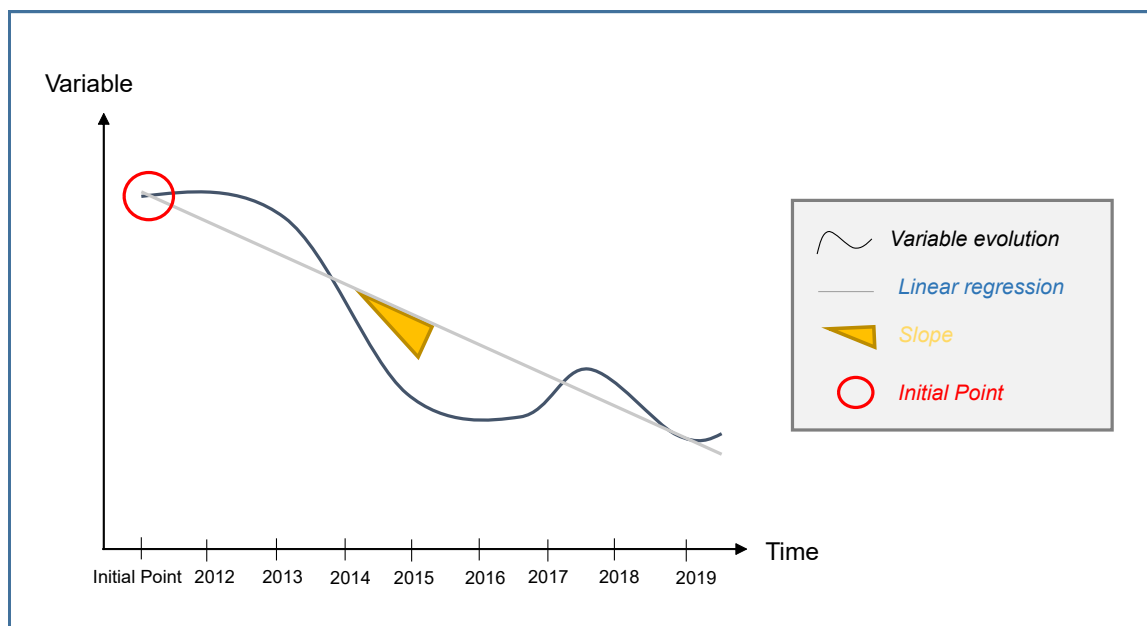


Figure 5.1 Indicators used to characterize the dynamic of the selected performances

Table 5.1 Description of the latent variables (LVs) and the associated manifest variables (MVs)

Latent variable	Manifest variable	Meaning	Original variable	Unit of the transformed variable
Initial diseases control strategy	Ini_TFI _f	Normalized TFI _f at the initial point	TFI _f	∅
Initial weeds control strategy	Ini_TFI _h	TFI _h at the initial point of the TFI _h	TFI _h	∅
Evolution diseases control strategy	Evo_TFI _f	Extracted slope of the TFI _f	TFI _f	∅
Evolution weeds control strategy	Evo_TFI _h	Extracted slope of the TFI _h	TFI _h	∅
Evolution of productivity	Evo_Yield	Extracted slope of the yield	Yield	hL.ha ⁻¹
Evolution of mechanical work intensity	Evo_FuelConsumption	Extracted slope of the fuel consumption evolution	Fuel consumption	L.ha ⁻¹
	Evo_MechanicalWork	Extracted slope of the mechanical work evolution	Mechanical work	hour.ha ⁻¹
Evolution of costs	Evo_TractorCost	Extracted slope of the tractor cost evolution	Tractor cost	€ .ha ⁻¹
	Evo_OperatingCost	Extracted slope of the operating cost evolution	Operating cost	€ .ha ⁻¹

2.5.2 Co variation analysis: Partial Least Square - Path Modelling (PLS-PM) method

Method definition

Path modelling (PLS-PM) is a method used to explore the multiple relationships between various variables and to quantify the respective weights associated to these relationships (Tenenhaus et al., 2005). PLS-PM has been mainly used until now in social sciences and in ecological. More recently, this method was also performed or in agronomic studies (Quinio et al., 2017). Path models are built using unobservable variables, named latent variable (LV), and observable variables, named manifest variable (MV). A LV is an unobservable variable (or construct variable) described by one or several MV that are observable variables. PLS-PM is constituted of two sub-models: 1) The inner model and 2) the outer model (Sanchez, 2013). The inner model is the structural model taking into account the relationships between LVs. The outer model, corresponding to the measurement model, describes the relationships between the LV and a set of MVs. The group of MVs associated to a LV is defined as a block. MVs must be positively correlated to their LV (Vinzi et al., 2010). The correlation between LV and their MVs was estimated by using the loading (λ) (Sanchez, 2013). The strength and direction of the relationship between LVs and MVs was estimated with the path coefficient (β) obtain from regression. Thus a negative value of β indicates a negative correlation whereas a positive β value indicates a positive correlation. β is only considered when λ informs on a significant correlation.

Model construction

Path model was built in a reflexive way meaning that we assumed that MVs caused by their respective LVs (Baxter, 2009). Partial least square path modelling (PLS-PM) was used to model the relationships between the 9 calculated variables presented above and indicating on the performance evolutions. These variables constituted the set of MV s in the model. The latent variables and the associated manifest variables are summarized in the Table 5.1.

We used the path model to test the hypothesis that pesticide use reduction impacted the other performances of the farming system. The hypothesis made to construct the model are based on the existing knowledge on pesticide use reduction process in vineyard system. Detailed hypotheses used to build the model are presented in Table 5.2. Hypotheses used to build the model were also based on the existing knowledge on the transition pathway towards pesticide use reduction (Chantre, 2014; Martin et al., 2017; Merot et al., 2019).

We chose to focus on the evolution of fungicide and herbicide use as these are the two

for which a significant decrease has been observed by Fouillet et al. (2022). By using the same dataset, no significant evolution was observed for insecticides. Furthermore, insecticide products represent a small part of the total TFI (14%, Simonovici and Caray (2021)) and the majority of the insecticide treatments are mandatory treatments against the leafhopper vector of the Flavescence dorée (*Scaphoideus titanus*).

The elaboration of the model started by setting up two latent variables representing the initial state of diseases control (cryptogammic diseases) and initial state of weed control. Indeed, initial state during pesticide use reduction process indicates the room for improvement of winegrowers in term of pesticide use reduction (Merot et al., 2019; Ross et al., 2008). As the region impacts the pest and disease pressure (Fouillet et al., 2022; Mailly et al., 2017; Simonovici, 2019), we normalized the TFI_f by using the data provided by the French Ministry of Agriculture (Simonovici, 2019; Simonovici and Caray, 2021). The other LVs described the evolution of performances.

Model quality assessment

The quality of the constructed path model was assessed in two steps. First, we verified homogeneity and unidimensionality of the blocks and then the cross loadings. The unidimensionality of each block is verified when MVs linked to LV are positively correlated (Sanchez, 2013). Blocks were homogenous meaning that we assumed to measure the same unique underlying concept in each block (Vinzi et al., 2010).

Then, we checked the loadings, the correlation between a latent variable and its manifest variables (Vinzi et al., 2010). We verified if the shared variance between a MV and its LVs was larger than with other blocks with cross-loadings. Finally, the cross-loadings were checked to ensure that the loadings (λ) between the MVs and their respective LVs were higher than their loadings with the other LVs implemented in the model.

Model validation

The model robustness was validated with the Goodness of Fit (GoF) index and a bootstrapping procedure (x 1000). To validate the model, a GoF value around 0.4 is acceptable (see Grace et al. (2016) ; Puech et al. (2015); Quinio et al. (2017)). The PLS-PM was conducted with R-software v. 3.6.2 (Team, 2019) using the package *plspm* (Sanchez et al., 2015).

3 Results

3.1 General trends

TFI_f and TFI_h were significantly reduced over the 10-years period studied according to the linear model ($p < 0.05$, Figure 5.2). The TFI_f varied from 10.6 ± 4.9 to 7 ± 5.4 between initial and 2019. A mean reduction from 34% of the TFI_f was observed between initial state and 2019. The t-test indicates a significant difference between initial point and 2019 for the TFI_f ($p\text{-value} < 0.001$). Regarding the herbicide use, the TFI_h varied from 1.2 ± 1.5 to 0.5 ± 0.9 between initial and 2019. The difference between initial point and 2019 is significant (t-test, $p\text{-value} < 0.001$). The mean reduction was from 58.3% for TFI_h . In total, 27% of the cropping systems used herbicides product when entering the network and 43% in 2019.

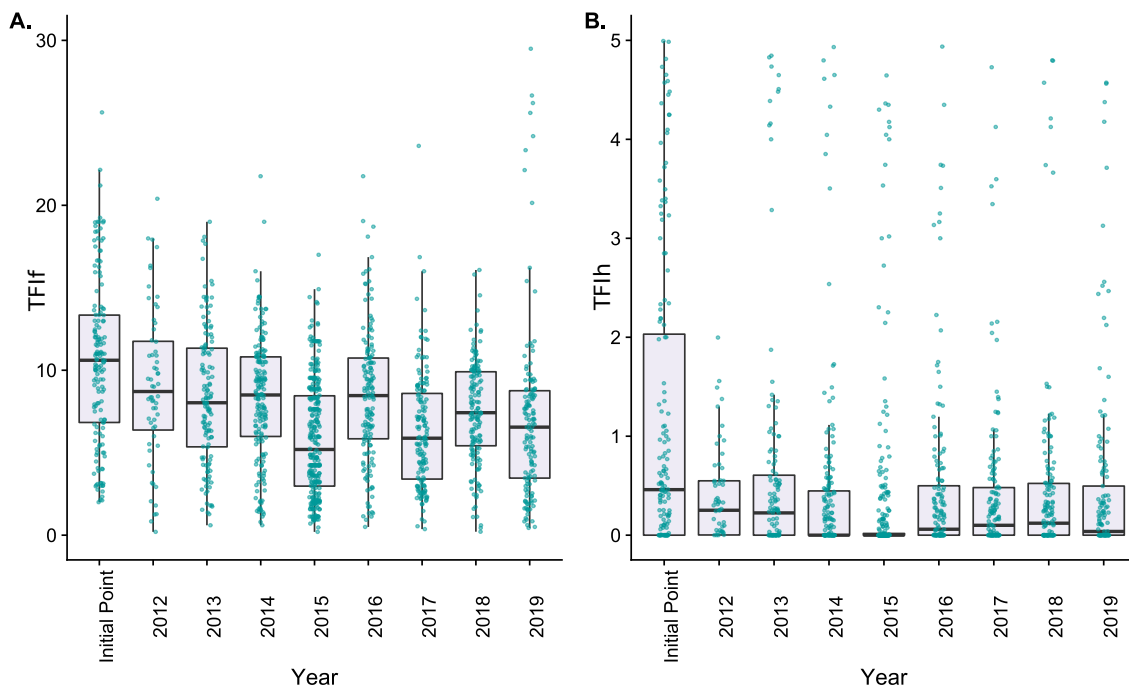


Figure 5.2 Evolution of pesticide use across the 10 years of the study. (A.) Evolution of TFI_f . (B.) Evolution of TFI_h

Both test, linear model and t-test, showed a significant decrease from 46% of the operational costs ($p\text{-value}<0.01$, Figure 5.3). The operational costs varied from 648.2 $\text{€}.\text{ha}^{-1}$ to 349.9 $\text{€}.\text{ha}^{-1}$ between initial and 2019.

No significant evolution of the mechanical working time, fuel consumption and tractor costs over the period with linear model and t-test ($p>0.05$) was observed. The mechanical working time varied from 26.6 ± 17.3 to 21.6 ± 28 $\text{hour}.\text{ha}^{-1}$ between initial and 2019 and the fuel consumption from 247 ± 132 $\text{L}.\text{ha}^{-1}$ to 286 ± 288 $\text{L}.\text{ha}^{-1}$. No significant changes in yield were observed according to the linear model ($p>0.05$, Figure 5.4). The yield varied from 63.4 ± 22.3 $\text{hL}.\text{ha}^{-1}$ to 65.7 ± 23.9 $\text{hL}.\text{ha}^{-1}$ between initial and 2019.

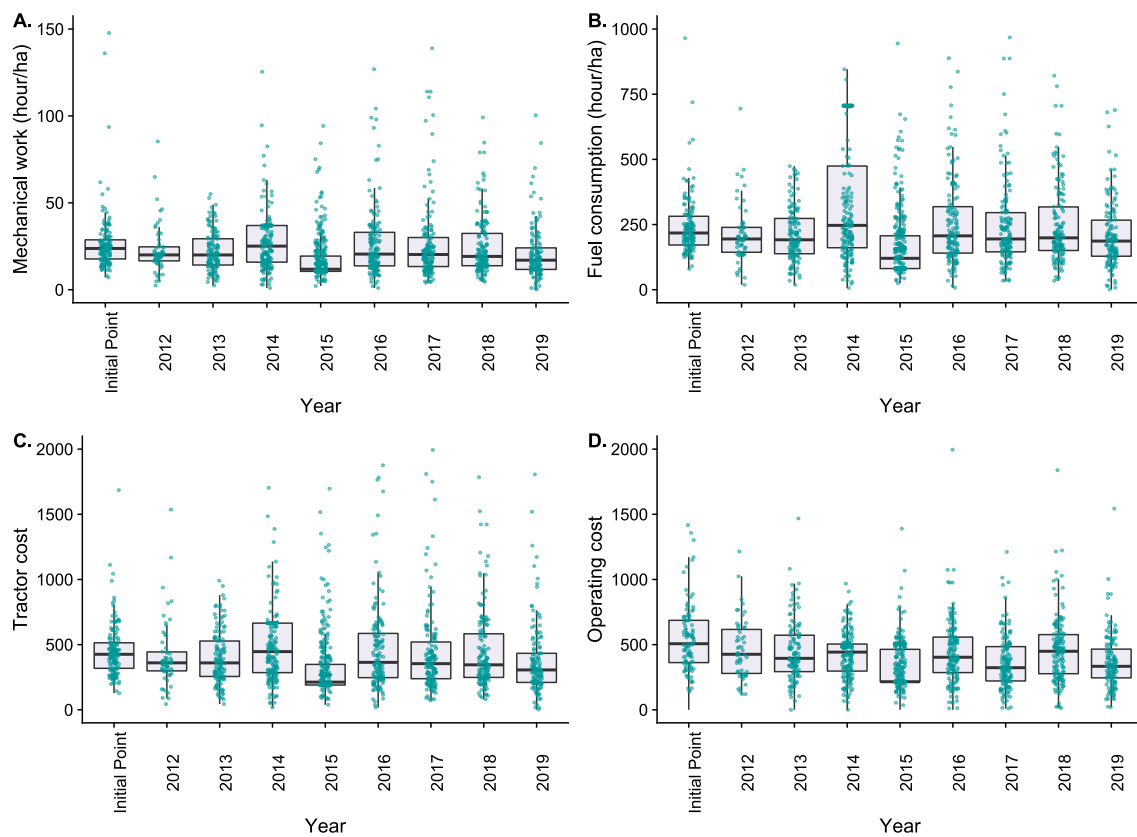


Figure 5.3 Evolution of the economic and working time performances over the ten years of the study. (A.) Evolution of mechanical working time ($\text{hour}.\text{ha}^{-1}$). (B.) Evolution of the fuel consumption ($\text{hour}.\text{ha}^{-1}$). (C.) Evolution of the tractor cost ($\text{€}.\text{ha}^{-1}$). (D.) Evolution of the operational cost ($\text{€}.\text{ha}^{-1}$).

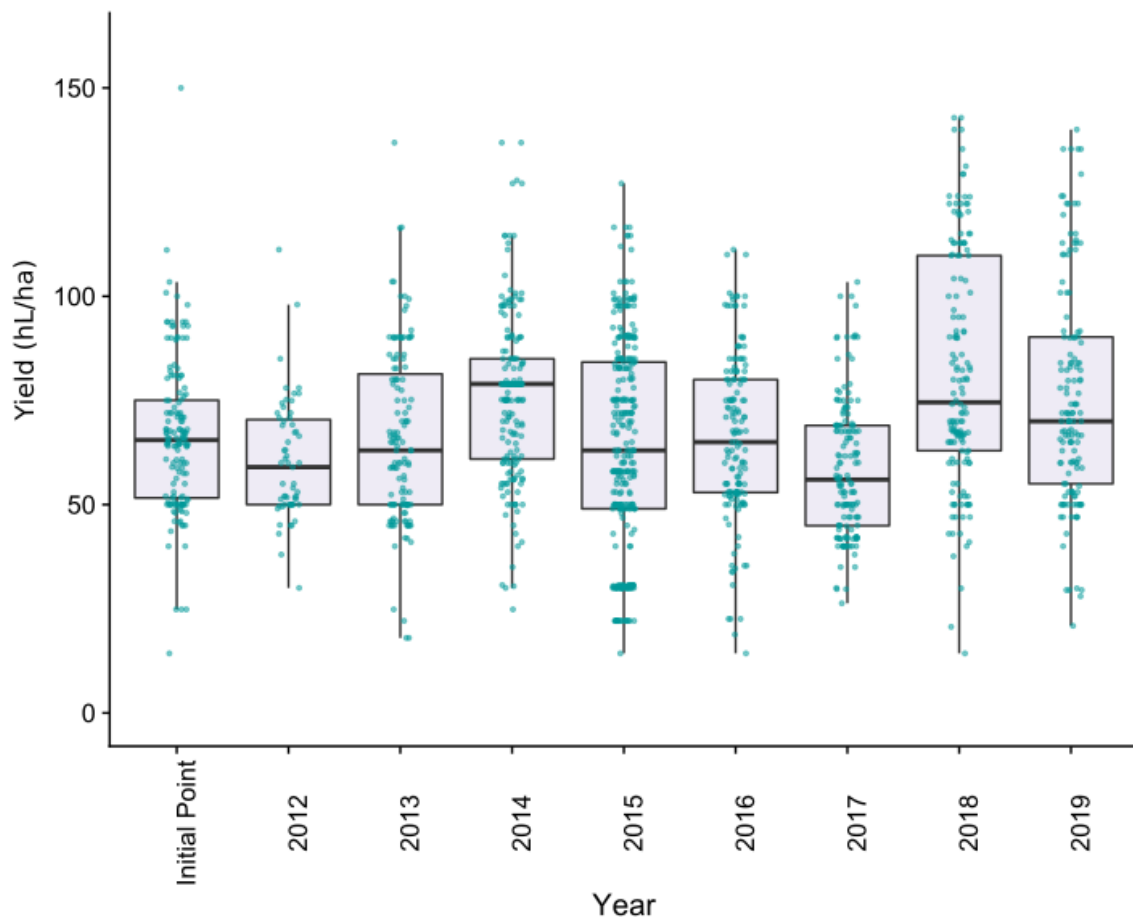


Figure 5.4 Evolution of the yield over the ten years of the study

3.2 PLS-PM

The path model (Figure 5.5) was validated as blocks were unidimensional and cross-loading validation (see supplementary data 1). Also, the Goodness of Fit of the complete model was acceptable ($\text{GoF} = 0.44$) to validate the model. The bootstrap procedure indicates that only two of the 11 path coefficients (β) were significant (Figure 5.5) : the link between initial weed control and evolution of weed control and the link between the evolution of work intensity on the evolution of the costs.

We observed a low positive effect of initial weeds control on the evolution on the weeds control ($\beta = 0.18$). Impact of initial disease control strategy on the evolution of disease strategy was negative but non-significant ($\beta = -0.52$, $p\text{-value} > 0.05$).

No significant impact of the weed control strategy and disease control was observed on the productivity. The initial weed control strategy and the evolution of the weed control strategy had a non-significant negative impact on the productivity ($\beta = -0.06$ and

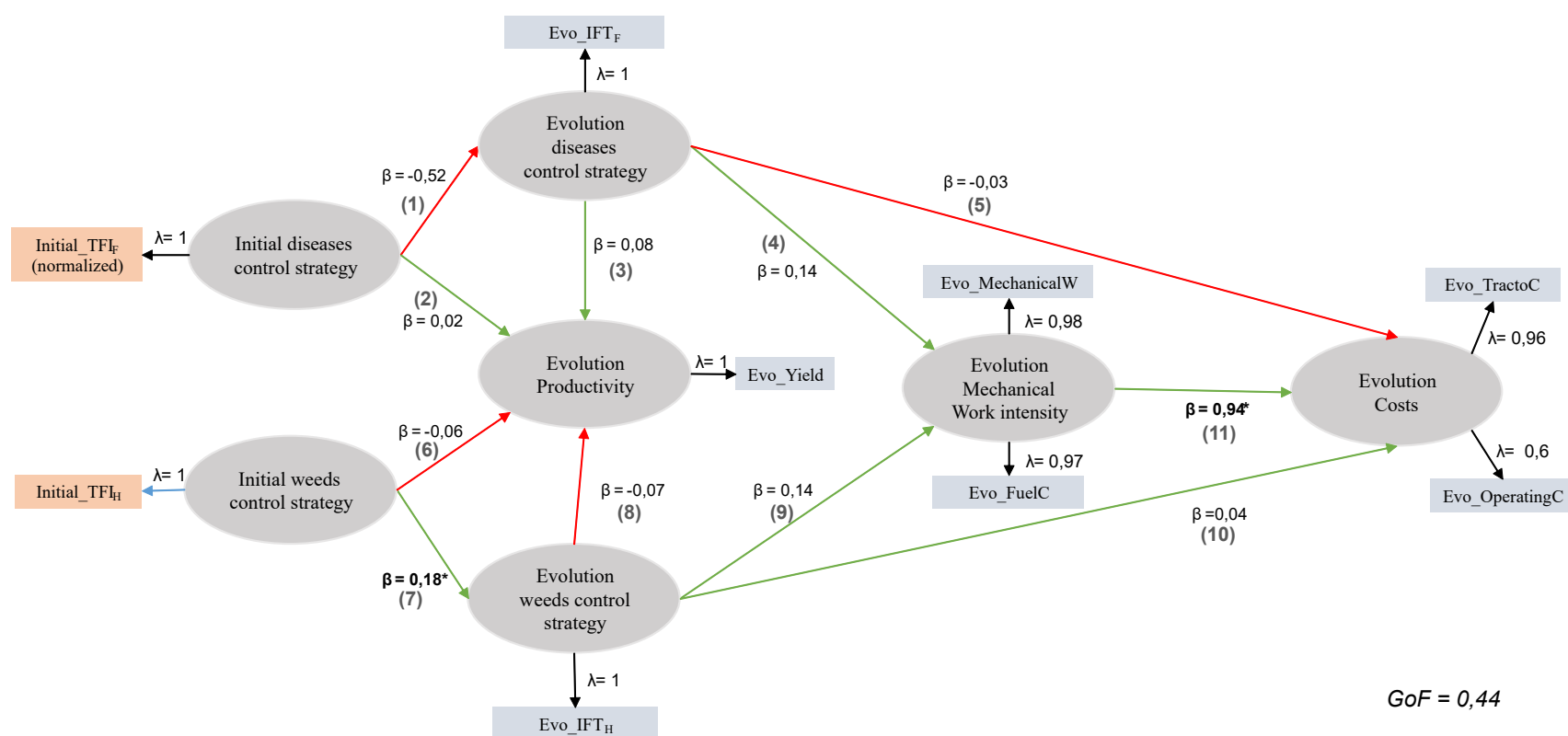
$\beta = -0.07$). The hypothesis of a yield reduction due to an herbicide decrease or stop of herbicide use is not validate. The same finding is observed concerning the initial and evolution of disease control strategy as a non-significant positive impact on productivity was observed. Therefore, the hypothesis of yield decrease due to a fungicide reduction was not validated.

A strong and positive effect of the evolution of the work intensity on the evolution of the costs was observed ($\beta = 0.94$, $p\text{-value} < 0.05$).

The hypothesis of mechanical increase due to a change of weed control strategy was not valid as the positive correlation observed was not significant ($\beta = 0.14$, $p\text{-value} > 0.05$). The same finding was observed concerning the evolution of disease control strategy on the evolution of mechanical work intensity.

Evolution of cost non-significant correlation between evolution of disease evolution strategy ($\beta = 0.04$, $p\text{-value} > 0.05$) and weed control strategy ($\beta = -0.03$, $p\text{-value} > 0.05$) on the evolution of cost.

Figure 5.5 The complete path model with latent variables (LV, grey ovals) and manifest variables (MV, rectangles). Path coefficient (β) were computed from regressions and estimated strength and direction (red arrow = negative; green arrow = positive) of relationships between the LVs. Loading (λ) estimated the correlation between an MV and its respective LV. Stars indicate that the path coefficient (β) were significantly different from 0 based on 95% percentile confidence intervals calculated using 1000 bootstrap samples. Meaning of the variables are detailed in Table 5.1 and the numbers in parentheses correspond to the model construction assumptions described in Table 5.2



4 Discussion

This article aimed at characterizing the co-variations between the different performances of the cropping system during the pesticide use reduction process. We used a national database, AGROSYST database, providing a large quantity of information over a long time period (10 years). We were able to build and validate a statistical method (PLS-PM) taking into account the dynamic of the pesticide use reduction process.

Firstly, we observed that despite the existence of a decrease in TFI_f from 58% and TFI_h from 34%, most performances remained stable over the 10 years of the study. A significant decrease of 46% of the operational costs was observed. The other variables, mechanical worktime, tractor cost, fuel consumption and yield showed no significant evolution over time. Interestingly, no impact of the pesticide use reduction was observed on economic and socio-technical performances. In particular, we did not observe any impact of the fungicide use reduction on the yield .

4.1 Impact of pesticide use reduction on productivity evolution

The hypothesis of a yield reduction during pesticide use reduction was not validated. In particular, we did not observe any impact of the fungicide use reduction on the yield. Therefore, we assume that pest and disease has been controlled despite the fungicide use reduction whatever the initial state of pesticide use when entering the network. Other studies working on the AGROSYST database on arable crop systems demonstrated that a reduction in pesticide use did not impact productivity or the economy (Lechenet et al., 2014, 2017). Lechenet et al. (2017) identified that farmers could reduce their pesticide use from 42% without a negative impact on the profitability and the productivity on arable crops.

We identified that pesticide use reduction from 34% did not impact the productivity. However, yield in vineyard system is complex and highly variable at inter- and intra-region scales and a strong regional effect (Fouillet et al., 2022; Mailly et al., 2017; Merot, 2022). Several studies have already shown that yield in organic farming are lower than on conventional farming (de Ponti et al., 2012; Seufert et al., 2012). Merot and Smits (2020) also showed that during conversion to organic farming, yields breakdown before reaching back the level observed in conventional farming. Another indicator such as the yield achievement ratio (ratio between the reported yield and the target yield) could have been used in order to explicitly integrate the production target and to avoid the strong

Table 5.2 Hypothesis used to construct the PLS-PM model

Hypothesis №	Relationships between latent variables (LVs)	Hypothesis	References
(1)	Initial diseases control strategy → Evolution of diseases control strategy	The initial disease control strategy expressed a potential of pesticide reduction. It is easier to highly decrease pesticide use when the initial diseases control strategy mainly relies on the use of systemic products compared to other products (copper/sulphur or biocontrol)	Fouillet et al. (2022)
(2)	Initial diseases control strategy → Evolution of productivity	Productivity depends highly on disease control. Powdery and downy mildews can cause important yield losses in absence of pesticide use or adapted phytosanitary strategy. Depending on initial control, the evolution of productivity in case of pesticide use reduction will vary differently: - With a high disease pressure and a high initial diseases control, a yield decrease is expected, - With a low pressure, a yield stability is expected	Fernaud et al. (2016); Merot and Smits (2020); Leroy et al. (2013)
(3)	Evolution of diseases control → Evolution of productivity	A better disease control let to limit the damages and consequent yield losses. During change of disease control strategy, yields breakdown has been observed before reaching back the initial level.	Merot and Smits (2020)
(4)	Evolution of diseases control strategy → Evolution of mechanical work intensity	Disease control strategies rely on the nature of the products used. The dose per treatment and the frequency of application. - In case of a dose per treatment decrease for the same nature of products, no impact on mechanical work intensity is expected, - In case of frequency increase for the same nature of products, the number of interventions is reduced and a decrease of mechanical work is expected, the number of interventions is reduced and a decrease of mechanical work intensity is expected. In fact, strategies of disease control did not only rely on systemic products use but also on copper, sulphur or biocontrol products. These new compounds in the products are more leachable and the frequency of application is more dependent on rainfalls. Applying copper, sulphur and biocontrol products increases the number of treatments most particularly on oceanic and northern wine growing regions.	Rouault et al. (2016); Merot et al. (2019)
(5)	Evolution of diseases control strategy → Evolution of costs	A change in diseases control strategy can impact costs. As mentioned in the previous hypothesis, disease control strategies rely on the nature of the products used, the dose per treatment and the frequency of application. - In case of a dose per treatment decrease for the same nature of products, the number of interventions is reduced and a decrease of costs is expected, - In case of frequency increase for the same nature of products, the number of interventions is reduced and a decrease of costs is expected. - In the case of a change in the nature of products, implication on the number of interventions and consequently the cost is expected. In fact, as written above, the substitution of synthetic products by copper, sulphur or biocontrol products whose number of treatments is lower and whose products are more leachable and whose number of treatments most particularly on oceanic and northern wine growing regions. An increase in the number of treatments causes an increase in the costs (fuel consumption, mechanical costs). Moreover biocontrol products are more expensive than synthetic products.	Merot et al. (2019); Leroy et al. (2013)
(6)	Initial weeds control strategy → Evolution of weeds control strategy	The initial weed control strategy will impact the potential of herbicide use reduction. It is easier to highly decrease the herbicide use when the initial weed control strategy highly relies on the systemic product use. In fact, the available levers to reduce herbicide use are limited to three options : - The substitution of synthetic herbicide by biocontrol herbicide with a partial effect, - The stop of herbicide use replaced by mechanical weeding involving new equipment, technicity, a higher number of interventions per season and more complex decision rules, - The stop of herbicide use replaced by associated vegetation mown according to various techniques (mowing, mulching, etc.). The implemented strategy can mix these options on the totality of the plot, or on inter-rows.	Fouillet et al. (2022); Delpeuch and Metay (2018)
(7)	Initial weeds control strategy → Evolution of productivity	The initial weed control strategy will impact the evolution of productivity. In fact, taking into account the levers to reduce herbicide that requires important changes (learning, change in equipments, change in the way of weed management), the herbicide use reduction in spring is important after implementing change. If the vine is grown without any water and nitrogen concentrate initially, a yield breakdown can be observed before reaching back the initial level.	Jacquet et al. (2019); Merot and Smits (2020); Ripoché et al. (2011)
(8)	Evolution of weeds control strategy → Evolution of productivity	The initial weed control strategy will impact the evolution of productivity. As mention in the previous hypothesis, the herbicide use reduction in spring at a critical stage for vine is important with the potential levers to reduce herbicide use. The implemented strategy can lead to a higher nitrogen and water competition. Water and nitrogen stresses can limit yields.	Jacquet et al. (2019); Merot (2022); Delpeuch and Metay (2018); Colette and Gary (2013)
(9)	Evolution of weeds control strategy → Evolution of mechanical work intensity	The evolution of weed control strategy related to the reduction of herbicide products may lead to an increase in the mechanical work time as mechanical tillage is the most common alternative for herbicide reduction	Jacquet et al. (2019); Merot et al. (2019)
(10)	Evolution of weeds control strategy → Evolution of costs	The 3 potential options to reduce herbicides cited in hypothesis 7 are all more expensive to implement. In particular more intervention are required even if the herbicide reduction reduce the cost of the herbicide products.	Jacquet et al. (2019); Merot et al. (2019)
(11)	Evolution mechanical work intensity → Evolution of costs	An increase in workload can leads to the hiring of new employees.	Merot et al. (2019)

wine-growing region effect. However, target yield is not available in the database. By using the yield evolution, we got rid of the wine-growing region effect.

4.2 Impact of pesticide use reduction on mechanical work intensity and costs evolution

Interestingly, no impact of the pesticide use reduction was observed on economic and socio-technical performances. No impact of the herbicide use reduction was observed on mechanical work and on cost evolution. An increase in mechanical work and costs following the switch to mechanical weeding was observed in several studies (Jacquet et al., 2021). Compensation can appear and mask the effects of the cessation of chemical herbicides on the other performances. For example, during winegrowers transition from chemical to mechanical, aid for investment in specific equipment can cover up to 40% of the value of the equipment (Jacquet et al., 2021).

By comparing the trade-off between agronomic, economic and ecological performances for conventional and organic farming, lower production costs have been observed in organic farming, which compensate the lower yield (Ostandie et al., 2022). This difference can be explained by the purchase of lower cost products (copper) with identical labor and equipment costs between conventional and organic.

4.3 Impact of the pesticide use reduction on costs evolution

Economic performances were assessed by using tractor labour costs and operational costs. No impact of pesticide use reduction on operational costs has been observed. Reducing pesticide use means reducing costs. However, the reduction in the use of pesticides can be achieved through the use of other products such as biocontrol. These products are generally more expensive than synthetic systemic products. Compensation phenomena can therefore appear between the reduction of synthetic product doses and the purchase of biocontrol products, for example. Significant decrease of operating cost education of the quantity of product used, purchase of biocontrol product. During pesticide use reduction, a significant decrease of the operating cost.

Reduction of pesticide use may reduce cost (Wilson and Tisdell, 2001; Bourguet and Guillemaud, 2016). In most of the studies, the economic performance is assessed by using the profitability with the net or gross margin. Margin is calculated by using the fixed total revenue from which are subtracted the input costs, mechanisation costs and labour costs (Aouadi et al., 2019). In the database, economic data such as gross and net margins were not available for vineyards systems. Indeed, economic performances are highly complex to

assess in viticulture system : diversity of marketing strategy or the high variability of yield at a spatial and temporal scale have high impact (Aouadi et al., 2019). However, price can be increased. A comparison between profit and yield could have been interesting as in their study Pedersen et al. (2012) showed that a major part of the studied farm applied pesticide to maximize yield rather than profit.

This database provided a large quantity of information and performances across the 10 years. We were able to calculate dynamic indicators to characterize the evolution of performances based on a linear model. The performances we used are integrated indicators (initial point and slope extraction to account for the dynamics). The set-up method used is efficient to analyse dynamic co-variations with the AGROSYST database. The indicators implemented by Martin et al. (2017) are a good tool to study the dynamics of raw variables (Dardonville et al., 2022, 2020). A model taking into account finer variables (risk of the operator depending on the toxicity, working condition and security...) could identify potential trade-offs, especially in terms of labor and costs. Delecourt et al. (2019) and (Duval et al., 2021) showed that work change happened during agroecological transition, not only in terms of field working time, but also in terms of human resource (workforce and skills). Farmers are facing a variety of work change during this process including work organization, competition between activities at the farming system scale and work security (Delecourt et al., 2019). Agroecological system favoured environmental and social dimensions including better working condition (for example higher number of permanent contracts was observed) (Dumont and Baret, 2017) but farmers have to manage trade-offs linked to their work condition.

This aspect on work-related variables points the need to better take into account socio-economic indicators such as nett margin or the number of worker. Socio-economic data mentioned are difficult to obtain from databases and require in-depth surveys to acquire these data. According to Jacquet et al. (2022), practices associated to intensive farming have been developed to enhance agricultural productivity. Consequently, most studies on innovative practices are focusing on their effect on yields. However, when farmers implement innovative practices, satisfaction indicators other than yields are taken into account (*e.g.* reduced working time) (Jacquet et al., 2022). One of the limitations of big data analysis is access to more specific variables. Multi-criteria analysis is a suitable method for these approaches. It would therefore be necessary to construct multi-criteria analyses that take into account the dynamics of the systems, thus relying on dynamic indicators instead of static ones. Temporal evolution allows to take into account fact that farmers are implementing and adapting their practices over a long time. Change is a multi-step process including period of learning and experimentation (Catalogna, 2018; Chantre and Cardona, 2014).

In our model, the environmental impact of pesticide use was assessed by using the TFI. TFI is the main indicator used within the ECOPHYTO plan to assess the pesticide use evolution of farming system (Guichard et al., 2017). Other indicators can be used to qualify the pesticide use such as the number of unit dose (NUD) or the quantity of active ingredient (QAI). More recent indicators have been created such as the Toxicity Risk Indicator (IRT, Mghirbi et al. (2015)) or Pesticide Load (Kudsk et al., 2018) and take into account the ecotoxicity of the sprayed product. According to Renaud-Gentié et al. (2019), the link between practices, input use and environmental performance is difficult to establish since this link also depends on emissions of polluting substances that are not only related to input use. However, TFI is an integrative indicator that allows to identify changes in phytosanitary strategies (Fouillet et al., 2022; Mailly et al., 2017).

5 Conclusion

This study aimed at characterizing the co-variations between the different performances of the cropping system during the pesticide use reduction process. We identified that there was no significant impact of pesticide reduction (fungicide and herbicide) on agronomic and socio-technical performance. We managed to create and validate a model taking into account the correlation between performances. The method takes into account the dynamic aspect necessary when studying change processes. The method used needs to be adjusted with the implementation of more refined indicators that give greater weight to socio-economic indicators.

DEPHY seems to be a good support to accompany the wine growers in their reduction of pesticide use as no co-variation between performances were observed during the reduction process.

However, a more detailed study seems necessary, taking into account economic and social performance in greater detail. The dimensions of work and organization are essential in the transition to low pesticide use systems. In depth analysis on of the major barrier to change is the production loss (Chèze et al., 2020).

Chapitre 6

Trajectoires de pratiques au cours du processus de réduction des pesticides

Contenu du chapitre : Ce chapitre 6 présente un travail d'analyse détaillée des trajectoires des changements mis en œuvre par les viticulteur·ice·s du réseau DEPHY. Alors que les chapitres précédents s'appuyaient sur la base de données Agrosyst, ce chapitre 6 s'appuie sur des données d'enquêtes réalisées d'avril 2021 à avril 2022 auprès de viticulteurs de plusieurs régions viticoles françaises. Il s'agissait d'expliquer la baisse de l'IFT à partir des changements implémentés au cours des dix dernières années. L'échantillonnage se basait largement sur la typologie de trajectoires d'IFT établie dans le chapitre 4. Les changements identifiés sont caractérisés en fonction de plusieurs critères (cibles, compartiment et mode d'action). L'étude de l'évolution des changements au cours du temps en fonction des critères permet d'identifier des grandes tendances de changements par cluster. Puis les trajectoires de combinaisons techniques (gestion des maladies cryptogamiques et gestion de l'herbe sous le rang et l'inter-rang) permettent d'identifier et d'analyser plus précisément les trajectoires individuelles de changements de pratiques.

Principaux résultats :

- Une diversité de leviers de réduction des pesticides a été identifiée et correspond à une majorité de changements au niveau des traitements phytosanitaires (réduction des doses, changements de produits).
- Le réseau DEPHY semble être un bon soutien aux changements de pratiques de viticulteur·ice·s, un très grand nombre de changements sont implémentés dès l'entrée dans le réseau.
- Des changements impactant plus fortement l'organisation de l'exploitation sont implémentés au fur et à mesure de la trajectoire principalement chez les viticulteur·ice·s ayant un faible IFT dès l'entrée dans le réseau.
- Des trajectoires de combinaisons techniques type sont identifiées et permettent la mise en lumière de freins rencontrés notamment dans les combinaisons techniques précédant la conversion à l'agriculture biologique.
- Finalement, il nous a été possible de reconstituer une trajectoire générique de baisse des produits phytosanitaires depuis le "tout" chimique jusqu'à un mode de conduite en Agriculture Biologique

Ce chapitre contient deux parties complémentaires, la première partie en anglais - (Chapitre 6a) présente les dynamiques générales identifiées par cluster. La deuxième partie (Chapitre 6b) étudie plus en détails les trajectoires de combinaison de pratiques prises par les viticulteur·ice·s. Il est prévu de valoriser ces résultats en un seul article.

Chapitre 6a

Analysis of technical trajectories associated to pesticide use reduction: lessons from the French DEPHY Network

Abstract

Reducing pesticide use is a key issue to enhance vineyard system sustainability that requires winegrowers to change their practices while facing several lockins. This study aimed at identifying the changes implemented to reduce pesticides. We hypothesized that i) the trajectories of changes implemented followed a dynamic mixing progressive technical changes and more rapid changes, ii) a diversity of technical changes can be observed and related to types of pesticide reduction trajectories. 36 detailed interviews were conducted to trace the changes winegrowers have implemented in their pesticide use reduction process since 2010. The farmers selected have been engaged for 10 years in a French farm network, the DEPHY-network, which aimed at promoting and assessing the implementation of new practices allowing the pesticide use reduction. The 36 farms were selected according to three criteria: i) the level of pesticide use reduction for the last 10 years (high, average or low Treatment Frequency Index decrease), ii) the geographic zones (Atlantic, North and Mediterranean zone) and iii) the production mode (organic or conventional). To sustainably reduce their pesticide use, winegrowers adapted some of their practices and implemented new ones. The changes were combined. We identified that farms mainly implemented changes based on substitution and efficiency of phytosanitary products (synthetic pesticide dose reduction, use of biocontrol product...). Only few changes identified were related to prophylaxis methods. We also demonstrated that DEPHY-

network has a high impact while supporting farmers in their pesticide use reduction as a high number of changes are implemented as soon as winegrowers entered the network or re-engaged after 5 years. A redesign mainly related to the cessation of herbicides was progressively observed during the pesticide use reduction process, especially for farms engaged in the DEPHY network with a low TFI. Changes related to redesign strategy came later in the change trajectory, once the levers related to efficiency and substitution were implemented.

Keywords : Change of practices, Trajectory, Transitional pathway, pesticide use, vineyard

1 Introduction

Pesticide use reduction is a major issue to enhance agricultural sustainability. Numerous studies have already demonstrated the negative impact of pesticides on environment and human health (Aubertot et al., 2005). Most particularly, vineyard sector is concerned by the societal debates about pesticide use reduction as it is one of the most intensive agricultural sector using pesticides (Urruty et al., 2016b). In France, the French authorities assessed regularly the pesticide use intensity with the Treatment Frequency Index (TFI, Pingault et al. (2008)). This indicator TFI takes into account the number of treatments and the dose applied relative to standard reference dose and let to compare farms in various contexts or evolution in time in pesticide use. Average TFI among the different French vineyards was of 12.4 in 2019 with an average of 18 treatments. As a comparison, for the wheat, the TFI was from 4.2 with an average of 4.9 treatments in 2017 (Crisan, 2019).

Public policies have been launched to support and stimulate farmers transition towards low input cropping systems, and particularly to reduce the dependence on pesticides. For example, in France, the ECOPHYTO plan was launched in 2010 with the aim of 50% reduction of pesticide use in 2025. Within this plan, the DEPHY-network, a network of demonstration farms, was created with the aim of promoting and assessing the implementation of new practices allowing pesticide use reduction. Pesticides remain at this day the most efficient solution to struggle against pest and diseases. In France, 80% of the pesticide used in vineyard are fungicides, 15% are insecticides and 5% are herbicides (Simonovici and Caray, 2021). Fungicides are mainly used to control downy mildew (*Plasmopara viticola*), powdery mildew (*Erysiphe necator*) and botrytis (*Botrytis cinereas*) which can impact the qualitative and quantitative characteristics of grapevine production if not controlled (Fermaud et al., 2016). Downy mildew and powdery mildew can cause up to 100% of yield loss if not controlled (Fermaud et al., 2016). Insecticides represent a small share of the TFI mostly due to the mandatory treatments to struggle against the leafhopper vector of Flavescence Dorée (from 1 to 3 mandatory treatments depending on the winegrowing region). It is thus sometimes not possible to reduce insecticide TFI in some winegrowing regions. Herbicides, which represent a minor share of the TFI, are used to control weeds, that can compete with grapevine for water and mineral resources and lower the yields (Celette et al., 2009; Celette and Gary, 2013).

To reach their objective of pesticide use reduction, farmers have to gradually change their practices (Gliessman, 2016; Meynard et al., 2012; Tuttonell, 2014). The technical levers used to reduce pesticides can be set up at different scales (plot, cropping system, farm or landscape scale). At the farm level, a large number of agroecological practices exists (Wezel et al., 2014). The existing agroecological levers for reducing pesticides are based on four modes of action (Aubertot et al., 2010) : i) action on the stock which corresponds to the reduction of pest and disease populations that cause contamination ii) avoidance, which consists at avoiding the concordance between the phase of contamination / attack of the pest and the period of sensitivity of the crop.; iii) attenuation to increase the competitiveness of the crop and to avoid favourable conditions to the development and spread of pests. For example, prophylactic or curative methods can be used (Attoumani-Ronceux et al., 2011). These three modes of action are implemented to minimize damages when the pest and the crop have already been in contact. The last mode of action is iv) catch-up solutions that is implemented when the previous three actions have not been effective enough and when disease symptoms, pests or weeds are already visible. To sustainably reduce the use of pesticides, these levers must be combined, at different spatial and time scale, due to their partial effect.

Technical changes can also be classified according to the intensity of change by using the ESR framework (Efficiency, Substitution and Redesign, Hill and MacRae (1996); Pretty et al. (2018); Wezel et al. (2014)). The first step of pesticide use reduction, efficiency (E), corresponds to resource optimization (making the treatment more efficient through dose reduction for example). The second step, substitution (S), corresponds to substitution of chemical inputs to favor those that have lower environmental impacts, like biocontrol products. The last step, redesign (R), corresponds to a whole cropping system reorganization, most often combining non chemical pest management practices. The more levers associated with redesign are implemented, the closer the farms get to low input use.

According to numerous authors, implementation of practices is often done step-by-step following a long process (Wilson, 2008; Sutherland et al., 2012; Chantre et al., 2015) and more often abruptly. Thus Lamine and Bellon (2009) identified two different types of transition processes followed by farmers during their conversion toward organic farming. The first transition process is an abrupt direct and irreversible transition followed by a stabilization phase. The second transition processes followed by farmers is a progressive and continuous process of adaptation. Whatever the type of transition, it always includes learning and experimentation process (Toffolini et al., 2017a).

However, farmers are struggling to reduce their pesticide use (Guichard et al., 2017; Hossard et al., 2017). Numerous studies showed the lock-ins and difficulties encountered

by farmers during the implementation of new practices (Mawois et al., 2019; Meynard et al., 2018; Vermunt et al., 2022). To better support farmers during their transition, it is important understand their trajectory by considering how practices are implemented (the order of implementation, the dynamic and intensity of changes) by farmers during the transition process (Lamine and Bellon, 2009; Toffolini et al., 2016; Dupré et al., 2017; Chantre et al., 2015; Sutherland et al., 2012). This comprehension can allow the understanding of how the technical strategies of farmers are changing (Yvoz et al., 2020). Thus the description of the long term evolution and the changes implemented at the farming system level help to understand the drivers and lock-ins of change encountered by the farmers during their transition towards agroecological transition (Mawois et al., 2019; Revoyron et al., 2022).

The aim of this article is to analyse the diversity of trajectory of technical changes during pesticide use reduction transition. We identified and characterized technical levers implemented by winegrowers over pesticide use reduction process and their impacts on pesticide use.

2 Materials and methods

2.1 Case study

2.1.1 DEPHY-Network and AGROSYST database

The DEPHY-network is a major initiative of the ECOPHYTO national plan. The ECOPHYTO plan was created in 2010 to promote and assess the implementation of practices to reduce pesticide use. The DEPHY farm network was created to demonstrate the capacity of farms to reduce their pesticide use. The farmers voluntarily participate in the network. DEPHY-farm includes 280 vineyards that joined the network between 2010 and 2012 and 270 that joined in 2016. Vineyards are grouped into 49 farm groups depending on their geographical localization. The 12 main French winegrowing regions are represented (Alsace, Bordeaux, Bouches-du-Rhône, Bugey-Savoie, Burgundy, Champagne, Charente, Côtes-du-Rhône, Gaillac, Languedoc, Loire-Valley, Provence). Network engineers coordinate each group. The network engineer's role is to guide winegrowers in their pesticide use reduction and to collect data on practices and performances of the cropping system every year within all network farms to be stored in the AGROSYST database.

2.1.2 Sampling and study area

The farms were selected from the AGROSYST database. Only the farms that entered the network between 2010 and 2012 were studied. 37 farms following a three-criteria grid sampling were surveyed. The criteria selected were: i) the geographic localisation, ii) the type of pesticide use trajectory, iii) the production mode. The first main criterion for sampling were the type of pesticide use trajectory. The repartition of the selected farms is presented in Figure 6a.1. The sampling allows the exploration of a diversity of production situations. Sampling was carried out with the help of Network Engineers.

- Clusters of Pesticide use trajectory :

We used the typology of pesticide use trajectory set up by Fouillet et al. (submitted) to select the farms. This work led to identify three clusters of TFI trajectories by using indicators to describe the pathway taken between 2010 and 2019 (see Fig. 1). The three clusters differed in terms of initial point, final point and TFI dynamic between initial and final point. Thus the first cluster corresponded to farms that entered the DEPHY-Network with a low TFI and that experienced a low TFI decrease (-16.4%). The second cluster corresponded to farms that started with a low TFI and that managed to reduce significantly their TFI (-48.7%). The third cluster represented farms with a high initial TFI and a high TFI reduction over the 10 years (-63%).

- Climatic zone :

Climatic conditions have a high impact on disease pressure and thus on phytosanitary practices (Fouillet et al., 2022; Mailly et al., 2017). The different climate conditions between winegrowing regions led to variability in practices over time and space (Mailly et al., 2017). In terms of pesticide use reduction, a regional effect has been observed within the DEPHY-Network (Fouillet et., *in progress*). We choose to conduct the survey in the three main geographic zones covered by vineyard, to identify eventual differences in terms of change implemented. The sample (Figure 6a.1) contains vineyards in the Mediterranean zone (Languedoc, Vaucluse, and Ardèche, 12 farms), in the Atlantic zone (Bordeaux and Loire Valley, 14 farms), and in the Northern zone (Champagne region, 10 farms). The hypothesis is that in southern France the downy mildew pressure is lower related to lower humidity in spring so as the weed pressure. In northern zone, vine density is high which increases the vine sensitivity to powdery and downy mildew.

- Mode of production :

We selected farms depending on their mode of production (organic farming or conventional farming). Organic agriculture is constrained by the label and the specifications which do not allow synthetic pesticides than in conventional agriculture. Thus the treatments to control diseases are based on copper and sulphur and weed control is largely mechanical. According to the database, Cluster 1 had only few farming systems in organic farming.

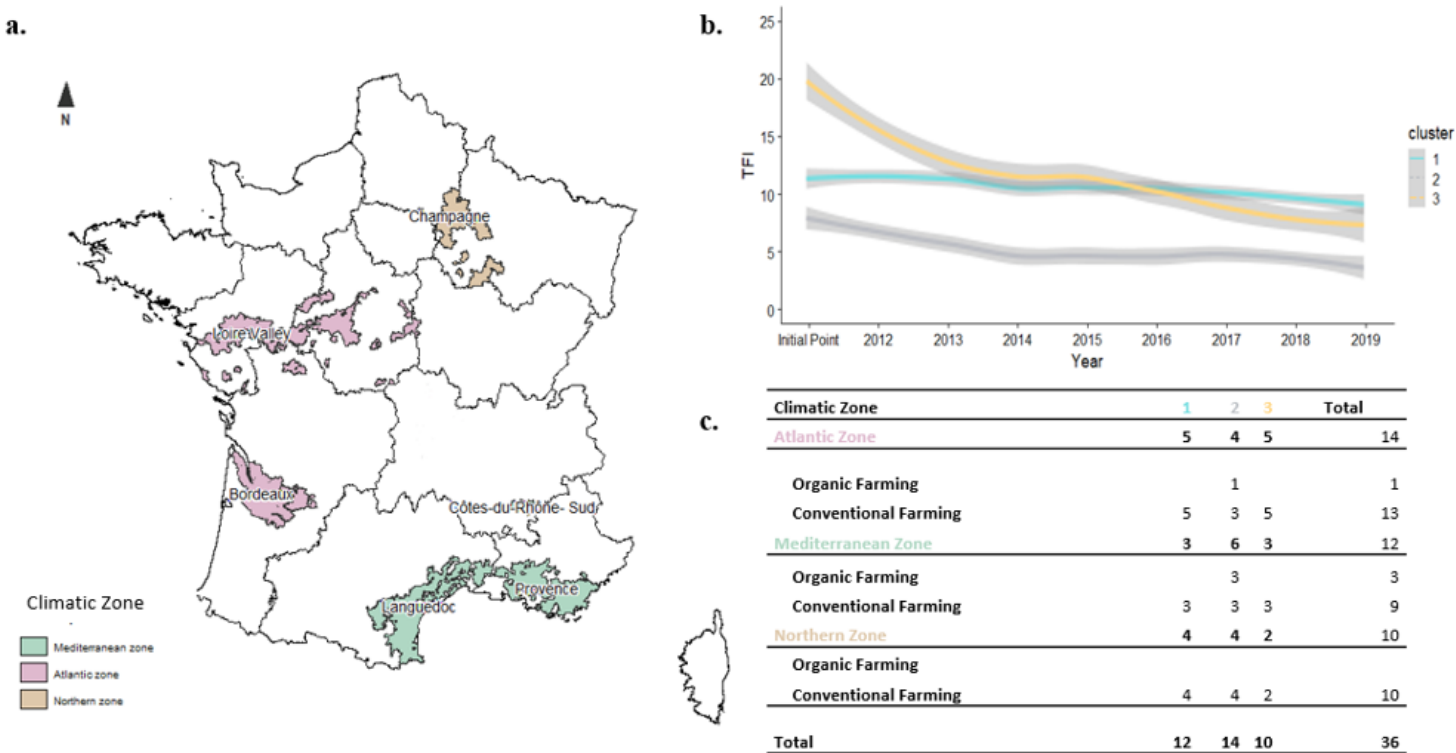


Figure 6a.1 Repartition of the surveyed farms sampled according 3 criteria. A. Geographical repartition of the study. B. Main evolution of the TFI depending on the 3 types identified by Fouillet et al. (submitted) C. Grid of sampling and number of farms surveyed crossing the three criteria identified from the AGROSYST database before the surveys

2.1.3 Interviews with the winegrowers

The AGROSYST database does not allow for a detailed identification of the changes implemented by the wine growers. The changes were therefore traced by surveys. Semi-structured interviews were carried out through one interview (with a minimum of 1,5 hours) from April 2021 to April 2022. Each interview focused on the evolution of the phytosanitary strategy linked to the farm environment performed by the winegrowers while being involved in the DEPHY-Network. This consisted to identify the changes they implemented during their implication within the DEPHY-network and when it occurred. Additional information was collected by phone or email after the surveys if necessary. The changes over 10 years have been traced using a time line. We identified the changes made for each technical operation since the entry into the DEPHY-Network (between 2010 and 2011). As some farmers had left the DEPHY-Network in 2020, we studied the trajectory of practices from the entry in the network up to 2019 for all surveyed farmers.

2.2 Data analysis

All changes in the practices were identified and characterized even if it did not concern directly the phytosanitary strategy.

2.2.1 Context of production

Data on context of production were collected and compared between geographic zone and cluster of TFI trajectory. Data on the vine area, labour, wine designation (Protected Designation of Origin or Protected Geographical Indication) and commercialisation mode were collected.. A range of selling prices (high, medium, low) was asked to the winegrowers in comparison with the prices in the region. The data are compiled by climate zone and cluster in Table 6a.2.

2.2.2 Initial Point

For each cropping system, the ‘Initial Point’ was defined as the average practices during the three years immediately preceding the year when farmers joined the DEPHY network. For the systems entering the network in 2010, the ‘Initial Point’ corresponded to years 2008–2010, while for the systems entering the network in 2011, the ‘Initial Point’ corresponded to years 2009–2011.

2.2.3 Changes characterization

A first step before performing the analysis was to build a table gathering all the levers identified and associated to these levers criteria. Thus each change was characterized according to three criteria (see Table 6a.1):

- Targeted pest : changes were characterized by the pests or diseases or weeds they are targeted for: fungicides, insecticides or herbicides. Some changes were categorized as ‘total’ if the targets were combined, as it was the case for changes linked to spraying adaptation. At last, changes associated with practices not directly linked to a target (for example changes in the pruning method) were considered in the category ‘others’.
- Compartment : Change linked to phytosanitary treatments against pest and diseases were gathered: dose reduction, change of product (use of biocontrol product instead of systemic product...) and spraying adaptation. Changes impacting the weed management under the row were distinguished from the impacting the inter-row management. We identified changes associated to agro-biodiversity management (*e.g.* planting of hedges to provide habitat for beneficial insects) and vineyard...
- Mode of action from Aubertot et al. (2010) : i) action on the stock which corresponds to the reduction of pest and disease populations that cause contamination

ii) avoidance, which consists at avoiding the concordance between the phase of contamination / attack of the pest and the period of sensitivity of the crop.; iii) attenuation to increase the competitiveness of the crop and to avoid favourable conditions to the development and spread of pests and (iv) catch-up solution are implemented when the previous three actions have not been effective enough and disease symptoms, pests or weeds are already visible .

168 **Table 6a.1** Example of levers identified and associated with the three criteria used “target”, “compartment” and “mode of action”. All the changes implemented and the associated characteristic (targeted pest, compartment and mode of action) are available in

N°	Lever	Targeted pest	Compartment	Mode of action
1	Dose reduction with DSS	Insecticide	Phytosanitary treatment against pest and disease	catch-up solution
2	Replacement of chemical products with biocontrol products	Fungicide	Phytosanitary treatment against pest and disease	catch-up solution
3	Mechanical weeding to replace chemical weeding	Herbicide	Row management	catch-up solution
4	Plantation of resistant variety	Fungicide	Vineyards	Attenuation
5	Optimization of sprayer settings	Total	Phytosanitary treatment	catch-up solution
6	Grazing with sheep	Herbicide	Inter-row management	catch-up solution
7	Installation of hedges around the plots	Other	Agrobiodiversity	Attenuation
8	Soft pruning	Other	Vineyards	Attenuation
...	...	...	...	...

Table 6a.2 Description of the context of the surveyed farms

	UAA (ha)	PDO	PDI	Yield objectives ($hLha^{-1}$)	Wine making	Economic share	Sale price
Cluster 1	76.1 ± 128	78.6%	8%	66 ± 13.2	Cooperative	95%	Medium
Cluster 2	37.5 ± 44	98%	2%	51 ± 13.8	Cooperative (30%) Cellar (70%)	100%	Medium-High
Cluster 3	29.5 ± 25	89%	11%	67.6 ± 13	Cooperative (50%) Cellar (50%)	89%	Low-Medium

3 Results and discussion

We first described the context of the surveyed farms and their TFI dynamics. The dynamics of change was assessed with the use of different criteria. On this basis, we explored the link between pesticide use reduction and change implementation.

3.1 Context of the surveyed farms

The sample of 36 farms surveyed presents a high diversity of production context. The cultivated areas vary from 2.6 ha to 48 ha. The mean UAA was 82 ha. Yield objectives vary from $35 hL.ha^{-1}$ to $90 hL.ha^{-1}$. The economic part of the vineyard represents for all the farms the most important part. The price ranges vary from low to high.

Within cluster 1, the farms had a high UAA with a high variability whatever the geographic zone (76 ± 128 ha). The wine was mainly made in cooperative cellars with an average selling price range compared to the general selling price of the region.

Within Cluster 2, the UAA of the farms were small or medium-sized (37.5 ± 44 ha). The wine designation PDO represented a majority or total share in all farms. Most of the wine was made in private cellars with a high sale price compared the price of the winegrowing region.

Within Cluster 3, the UAA of the farms were small or medium-sized (29.5 ± 25 ha). A large majority of farms were in PDO with high yield objectives. Half of them were in cooperatives while the other half had particular cellars. The sale price range was low to medium prices compared the price of the winegrowing region.

3.2 TFI dynamics per cluster

The evolution of the IFT for each cluster was traced from the AGROSYST database. When entering the network, the mean TFI for cluster 1 farms was from 14 ± 3.4 . We observed a pesticide use reduction of -33% between 2010 and 2019 to reach a mean TFI of 9.4 ± 2.3 . Increases were observed in 2016 (+33% compared to 2015) and 2018 (+25% compared to 2017). The farms in cluster 1 started with an initial TFI close to the national trend in average (TFI ratio 0.97).

Cluster 2 farms had a lower initial point in comparison with the national trends (TFI ratio 0.52). When entering the network, the mean TFI was 9.8 ± 3.3 . We observed a decrease of -48% during the 10 years. In 2019, the mean TFI was reduced to 5.1 ± 2.7 . TFI increases were observed in 2016 (+38%) and 2018 (+42%) like for cluster 1.

For the Cluster 3 farms, when entering the network, the mean TFI was 18.5 ± 3.8 , higher than for cluster 1 and 2. A high TFI decrease of -60% was observed between initial point and 2014. A TFI increase was observed from 25.3% between 2015 and 2016 before decreasing and stabilising in 2017. In 2019, the mean TFI was from 7.1 ± 3.1 .

All clusters reduced their pesticide use. The TFI dynamics observed for each cluster showed variability with high increase in 2016 and 2018. These pikes are linked to the geographic conditions, increasing the pest and diseases pressure. In fact, in 2016 and 2018, a high downy mildew pressure was observed (Simonovici, 2019). This pressure impacted more the farms of clusters 1 and 2.

3.3 General trends of changes implemented

In total, 64 different changes were identified in all farms surveyed. 37 changes were associated to phytosanitary treatments (58.7%), 9 changes to inter-row management (14.3%), 7 changes to row management, 5 to prophylaxis methods, 3 to farm organization and 2 to associated agrobiodiversity. Most of the changes were associated to fungicide management (37.5% of changes) and herbicide (23.4% of changes).

Some changes observe were linked to biodiversity management (bird and bat shelter or hedge planting). Some changes were related to supra-parcel scales (*e.g.* purchase of equipment to treat all parcels in one day).

34 changes among the 64 identified were observed in cluster 1, 53 in cluster 2, and 40 in cluster 3 (Figure 6a.3). The mean number of changes per farm observed over the 10 years was 7.2 ± 2.7 changes for the cluster 1 farms, 9 ± 3 changes for the cluster 2 farms and 10 ± 3 changes for the cluster 3 farms (Figure 6a.2A) which implemented the highest number

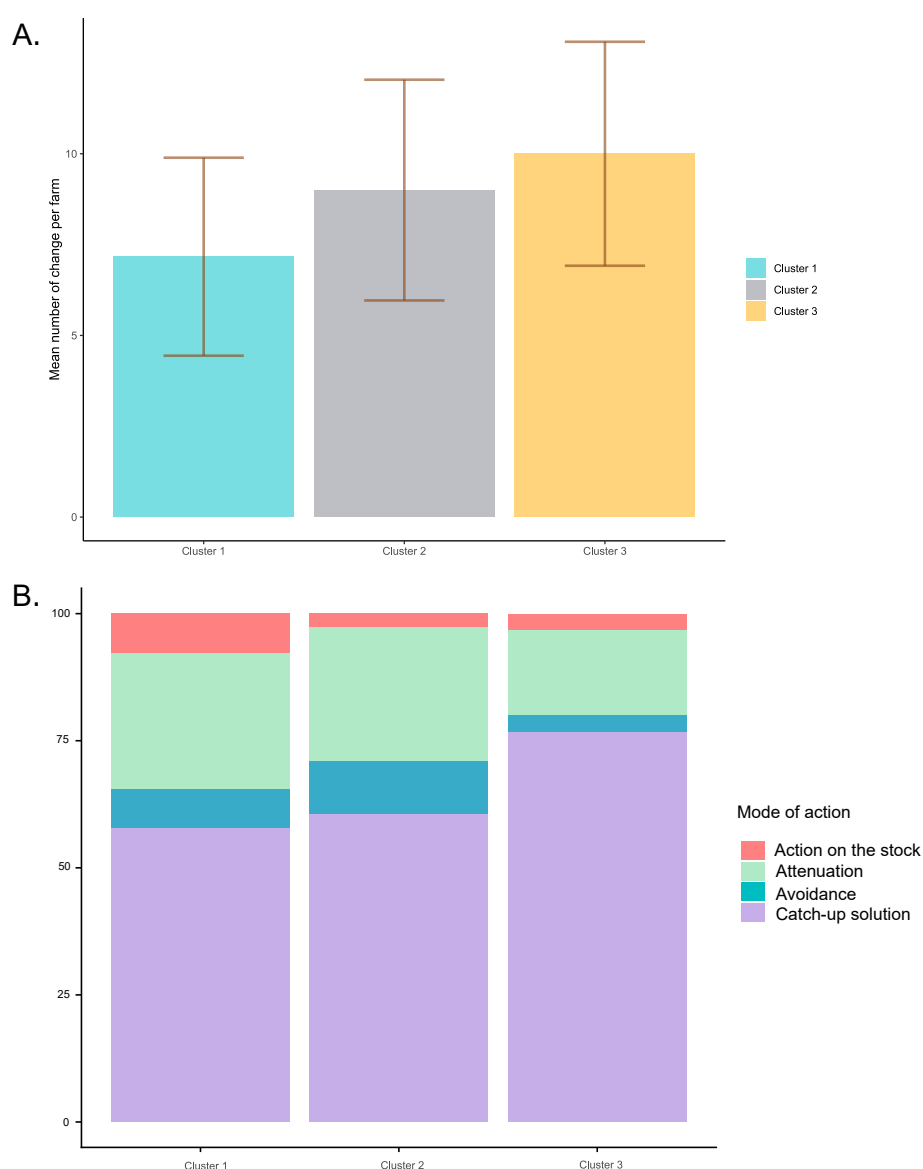


Figure 6a.2 Mean number of changes per farm and per cluster over the 10 years studied

of changes over the 10 years. The number of changes implemented was not significantly different between clusters ($p\text{-value} > 0.05$).

The levers that were the most implemented in all clusters were i) the replacement of chemical products with biocontrol products (observed within 90% of cluster 1 cropping system, 77% within cluster 2 cropping system and 64% within cluster 3 cropping system), ii) the mechanical weeding under the row to replace by chemical weeding (observed in 30% of cluster 1 cropping system, in 54% of cluster 2 cropping system and 36% of cluster 3 cropping system) and iii) dose reasoning (with or without the use of Decision Support System (DSS) (90% of cluster 1 cropping system, 84% of cluster 2 cropping system and 36% of cluster 3 cropping system). Some levers were identified in one cluster only. For

example, the use of lime against grape moths was implemented only in cluster 2 farms so as the use of herbicide biocontrol product. These levers are scarce and are mostly implemented on a single farm.

More than half of the changes implemented were linked to phytosanitary treatments against pests and diseases in each cluster. A majority of changes (not only phytosanitary treatments) impacted the fungicide management (53.7% for cluster 3, 45.7% for cluster 1 and 44.4% for cluster 2) (Figure 6a.3). The other important part of the implemented changes concerns the weed management: 19.5% for cluster 3, 20.4% for cluster 2 and 28.6% for cluster 1 (Figure 6a.3). Insecticide management was only marginally modified in each cluster. In cluster 2, more changes linked to ‘other’ were identified compared to cluster 1 et 3.

The analysis of the changes implemented according to the mode of action (Aubertot et al., 2010) showed that the majority of changes for all clusters were associated to catch-up solution (Figure 6a.2B). Attenuation solutions were mainly linked to inter-row management (26% for cluster 1 and 2 and 17% for cluster 3) (example). Avoidance was also observed but in a limited number of situations in the cluster 2 (11% against 8% cluster 1 and 3.3% in cluster 3).

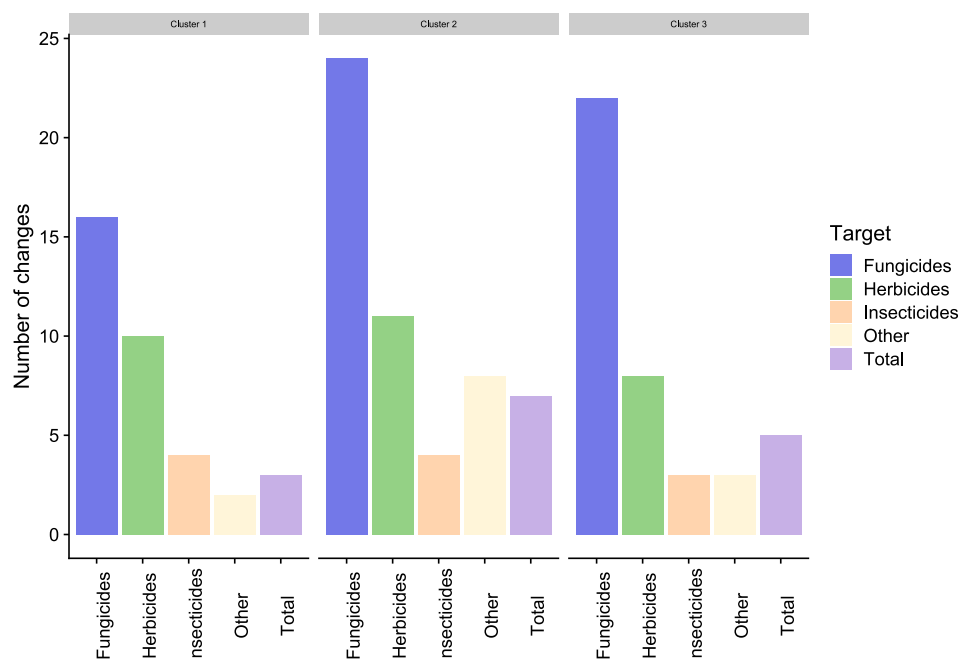


Figure 6a.3 Mean number of changes per farm and per cluster over the 10 years studied

3.4 Dynamic of change

Over the 10 years of the analysis, we identified three periods common for the three clusters (Figure 6a.4). These periods can be associated with the DEPHY-Network dynamic. When entering the network in 2010 (*period 1*), a high number of changes were implemented within each cluster. Between 2012 and 2015 (*period 2*), a low dynamic of changes was observed. In 2016 (*period 3*), an increase in the number of new levers implemented is observed within each cluster. In 2016, a re-engagement in the network takes place, farms re-engage, new farms join the network while others leave. This re-engagement phase led to a new dynamic within the network.

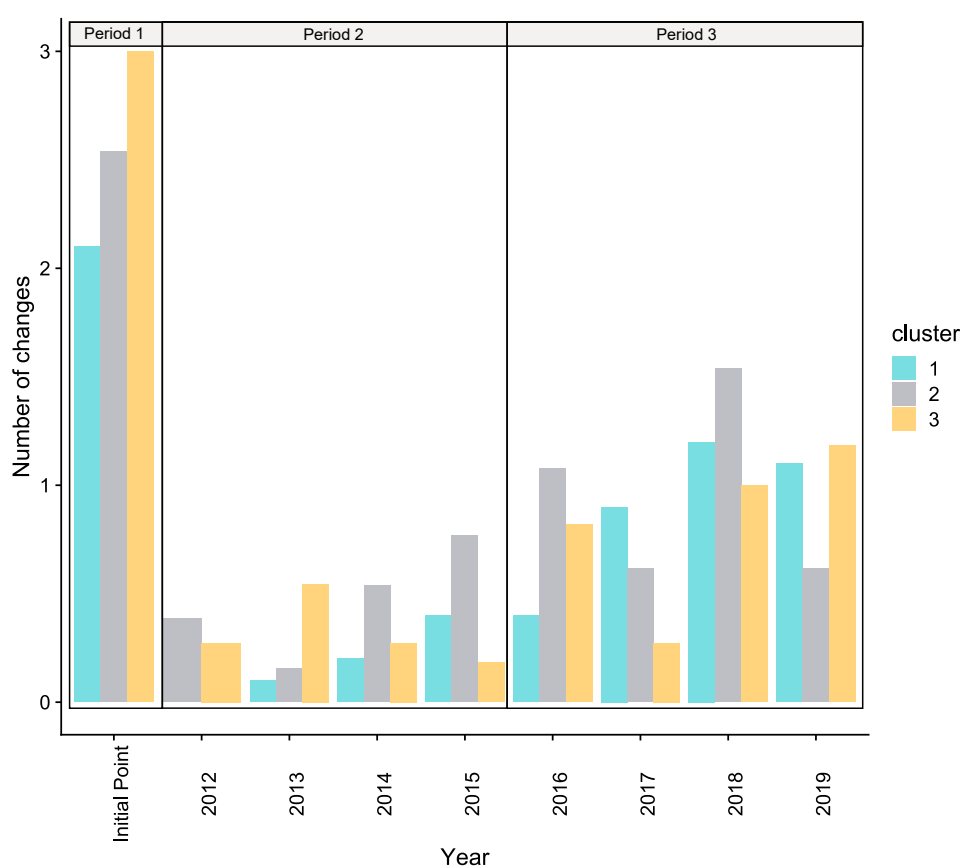


Figure 6a.4 Mean evolution of implemented changes depending on the cluster of pesticides use trajectory identified by Fouillet et al. (submitted)

During *period 1*, we observe an average number of changes per year and per farm greater than one, indicating the implementation of a combination of technical levers. In *period 2*, on average less than 1 change per year implemented per cluster, this means that not all farms implemented changes every year. During *period 3*, some pikes of changes were noticeable. In 2016, the year of re-engagement in the network, an increase in the number

of changes was observed (on average one change per farm and per year for cluster 2 farms). In 2018, a second peak of changes was observed, this time concerning all clusters. This year, the average number of changes implemented per cluster was higher than 1. In 2019, a strong decrease in the number of changes was observed within cluster 2.

We observed that the levers implemented in each cluster were often combined and implemented progressively.

3.4.1 Cluster 1 change trajectory

During the first period, when entering the DEPHY-network, levers combination appeared. A high number of changes were implemented (2.1 ± 1.3) on the cluster 1. The majority of the changes targeted directly the phytosanitary treatments against pests and diseases (62%) most particularly fungicides (56%). The levers modifying the fungicide management that were the most implemented were dose reasoning (with or without DSS) and the use of copper product to replace some other chemical product, the stop of anti-botrytis treatment and the stop of CMR products replaced with systemic product. The other changes identified impacted the weed management (39% of the changes). The row (11%) and inter-row (27%) management were modified. Instead of chemical weeding, farmers implemented mechanical weeding, or sowing of cover crop on the inter-row.

During the second period, a stabilisation phase was observed with only few changes implemented (0.3 ± 0.5 per year in average). No changes were identified in 2012. Phytosanitary treatments against diseases were mainly impacted as it concerned 93% of the change with dose reasoning and the replacement of some product with biocontrol. Changes did not concern weed management. In 2014, implementation of resistant varieties was observed in one farm.

Starting from the DEPHY re-engagement in 2016, an increase of changes was observed. The changes were mainly linked to the phytosanitary treatments against pest and diseases (more than 70% each year). The use of biocontrol increased among the farms related to the stop of the use of some products (CMR and anti-botrytis...). Few changes in the inter-row management were implemented during this period (only in 2017 for one farm which changed the species sown in the inter-row). Between 2017 and 2019, agrobiodiversity oriented changes were implemented within 4 farms (installation of bat shelters and hedges...). In 2019, vineyard management was impacted by changes as prophylaxis methods (manual pruning to replace chemical pruning) and soft pruning are implemented (10% of the identified change in 2019). During this period, changes related to fungicides remained in the majority.

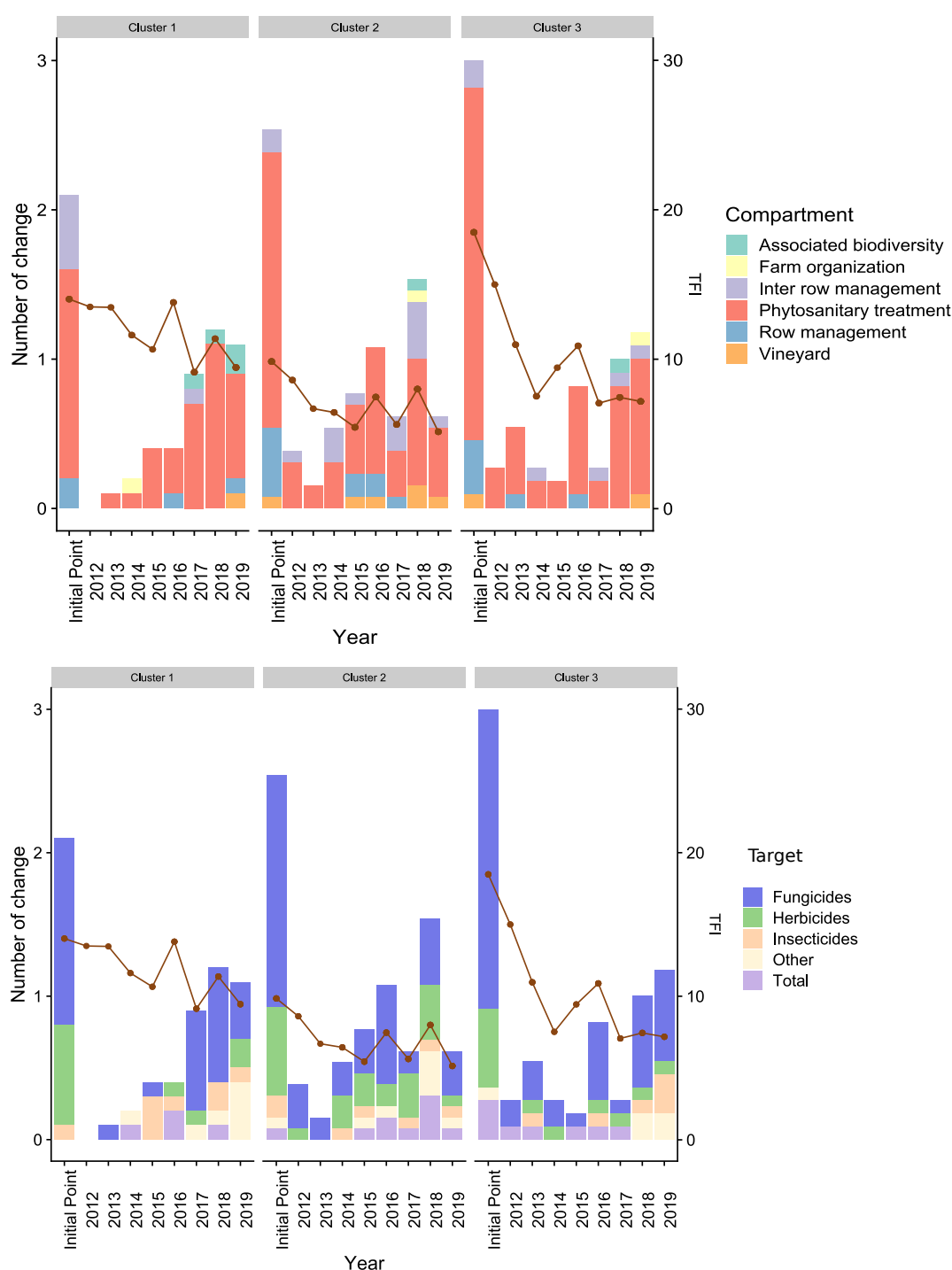


Figure 6a.5 Mean evolution of implemented changes depending on the cluster of pesticides use trajectory identified by Fouillet et al. (submitted)

3.4.2 Cluster 2 change trajectory

When entering the DEPHY-Network, cluster 2's winegrowers implemented in average 2.4 ± 1.3 changes per year. These changes were mostly linked to phytosanitary treatments

(pest and disease) (73%) and targeted mainly fungicides (70%). The main changes observed corresponded to the reasoning of the sprayed dose of systemic products but also introduction of biocontrol products in the phytosanitary strategy (including sulphur product). Changes in the row management (14%) and inter-row management (3.3%) were also observed. The mechanical weeding under the row and the implementation of cover crop in the inter-row replaced the use of herbicide product.

During the period 2, only few changes were implemented between 2012 and 2013. An average of 0.33 per year were implemented indicating that a majority of farms do not implement changes every year. An increase of the number of changes was observed between 2014 and 2015. The main changes impacted the phytosanitary treatment to struggle against fungicide pressure were the replacement of systemic products with biocontrol, the increase of the number of biocontrol treatments and the dose reasoning. In 2015 and 2016, changes linked to the prophylaxis were introduced (staggered pruning to delay the first treatment) and an important proportion of changes linked again to fungicides and herbicides was observed. Changes in the inter-row and row management were observed: adaptation of weeding practices in the row and inter-row (species seeded, grazing...).

During the third period, pikes of changes were observed in 2016 and 2018. The changes targetted mainly phytosanitary products to struggle against fungicide (change of products with sulphur, reduction of the dose of copper sprayed, increase in the number/quantity of biocontrol products used...) and inter-row management (in the cover crop management: adjustment of the sown species, grazing...). The management of the vineyard was modified with the introduction of soft pruning. For one of the winegrowers surveyed, we identified a modification of the farm organisation with the purchase of plots closer to the farm and uprooting of the distant plots. Change relative to a change of spraying mode (confined spraying) and the optimization of sprayer settings were implemented each years. During each period, inter-row, row management and prophylaxis management were adjusted and modified.

3.4.3 Cluster 3 change trajectory

Entering the DEPHY-Network, in average 3 ± 1.8 changes were implemented in the cluster 3. The large majority of the changes observed in cluster 3 were related to a modification of the phytosanitary strategy (59%) targeting the fungicides (58%), then herbicides (22.5%) and the spraying (11%). No change in the insecticides management was observed during this period. The main levers implemented during this period were the replacement of systemic products by biocontrol products or non-CMR products combining with dose reasoning to control fungi.

During the second period, between 2012 and 2015, few changes were implemented (0.3 ± 0.25 changes per year in average) indicating that a majority of farms do not implement changes every year as the other clusters. The changes were mainly modifying the fungicidal phytosanitary treatments (more than 50% of the changes per year in average). The main changes identified were dose reasoning, replacement of chemical product and spraying adjustment. Weed management in the row and inter-row was also modified with mechanical weed management due to the stop of herbicide product under the row and the sowing of service crop in the inter-row.

Between 2016 and 2019, an increase of the number of changes was observed, that were mainly related to phytosanitary treatments. Changes linked to farm organisation (2019), agrobiodiversity management (2018) and vineyards (2019) appeared at the end of the trajectory. The changes observed were in majority changes in the diseases management (more than 50% in average) : stop of the use of CMR products and increase of the use of biocontrol products. An increase of biological control (with trichograms) or sexual confusion, changes linked to insecticides, was observed in 2019. Also, soft pruning and plantation of resistant varieties ('other') were noted in 2018 and 2019. Modifications of the inter-row management were finally observed with the sowing of service crop in the inter-row and a reflection on the species sown.

Regarding the dynamic of conversion towards organic farming, we identified that few farms were converting. In the cluster 1, no farms have converted to organic farming. For clusters 2 and 3, some farms were already in organic agriculture before entering the network. Only few farms converted during the study period (one farm for cluster 2 and 3).

3.5 Linking trajectory of practices and trajectory of pesticide use

A high number of changes was identified. These changes were not very diverse. They were mainly described as catch up solutions through the adaptation and modification of the phytosanitary treatments to control pests and diseases. However, by implementing and combining these levers, the farmers of all clusters managed to reduce their pesticide use across the ten years of this study. Thus for the fungicide and insecticide reduction, the levers mainly identified were the dose reasoning and the use of biocontrol product. For the reduction of herbicide, the options for substitution offered less possibilities than for fungicide reduction, and solutions are geared towards stopping herbicides rather than reducing them.

The survey confirmed the results identified by Fouillet et., (*in progress*) in the AGRO-SYST database, identifying an increase of the use of biocontrol and a reduction of doses

according to phenological periods as well as the cessation of herbicides. But the surveys allowed to go further by identifying levers linked to changes in spraying, the introduction of plant cover, plantation of resistant grape varieties or prophylactic measures.

A combination of levers was implemented when entering the network, impacting mainly the fungicidal and weed management. The levers combined were already known levers like reducing and reasoning the dose depending on the phenological period, improving the spraying and replacing some systemic products with biocontrol. The consequences was a strong decrease of the TFI, specially for the cluster 2 and 3. The reduction in pesticide use was all the more rapid that the initial TFI was high, as was the case for the farms in cluster 3. Thus the TFI reduction depended partly from the initial point indicating the room of improvement winegrowers have (Fouillet et al. in progress).

We observed differences in the dynamics of the implemented changes in terms of the nature of the change, especially for cluster 2. The levers implemented at the beginning were mostly related to efficiency and substitution of phytosanitary treatments (at different intensities between the 3 clusters). The next stage corresponded to an adaptation of the implemented levers: a progressive decrease of the TFI was observed while the number of implemented levers was low for all clusters. The following period, starting in 2016, corresponded to step-by-step changes. Levers were implemented each year on average to go further in reducing the use of pesticides. We observed that the changes were more intense for the farms of cluster 2, with natures of changes related to prophylaxis.

Looking at the dynamic of changes and their intensity, we observed that the trajectories could be ordered a one unique trajectory of pesticide use (Figure 6a.6). The first stage identified corresponded to the cluster 3, starting with a high initial TFI compared to regional TFI and experiencing a high TFI reduction. This first TFI reduction can be achieved with easy to implement and we-known levers targeting directly impacting phytosanitary treatments: dose reduction, use of biocontrol product, stopping the use of herbicide in the inter-row. These levers based on efficiency and substitution are sufficient to highly reduce the TFI because of the room of improvement these farms have.

The second stage corresponds the cluster 1 trajectory. This stage is based on the adaptation of the changes implemented during stage 1. Winegrowers are going further in the optimization of sprayed dose, increasing the use of biocontrol and copper products instead of systemic products. stop using herbicides under the row. The reduction of the TFI is less intense than in the first step and a stagnation during the last years is observed. Changes associated with redesign appear at the end of this second stage , with changes related to efficiency and substitution being optimized to the maximum.

The final and third pesticide reduction stage identified in our study corresponds to

the cluster 2 trajectory, involving deeper changes. In this stage the use of pesticides is already low and practices related to phytosanitary treatments are optimized at the beginning of the trajectories. A new adaptation of the phytosanitary products is observed. Winegrowers doing with systemic products at the end of stage 2 turned in the third stage to practices associated with organic farming (treatments based on copper and sulphur). As observed in cluster 2, a greater diversity of changes is observed in this stage. Levers implemented are not specifically targeted (spraying, etc.) and changes that do not directly impact on phytosanitary treatments (prophylaxis, etc.). Some changes made have strong impacts on the farming system organisation: row and inter-row management (grazing, seeding of cover crops. . .), soft pruning. The intensity of these changes is not reflected in the reduction of pesticide use.

To resume (Figure 6a.6), a general order of the change implemented is emerging. First of all changes impacted the systemic-based phytosanitary treatments. The winegrowers reduced the doses, optimized the spraying, used systemic products less impacting for the health and the environment (non-CMR) before moving to the use of biocontrol and copper/sulphur-based products. Some changes, observed in each cluster, can be mobilized at any point in the trajectory (e.g. dose reduction) while a gradient of intensity is observed for other practices (late implementation of prophylaxis and change of pruning method). Changes related to efficiency and substitution can occur at any point in the trajectory.

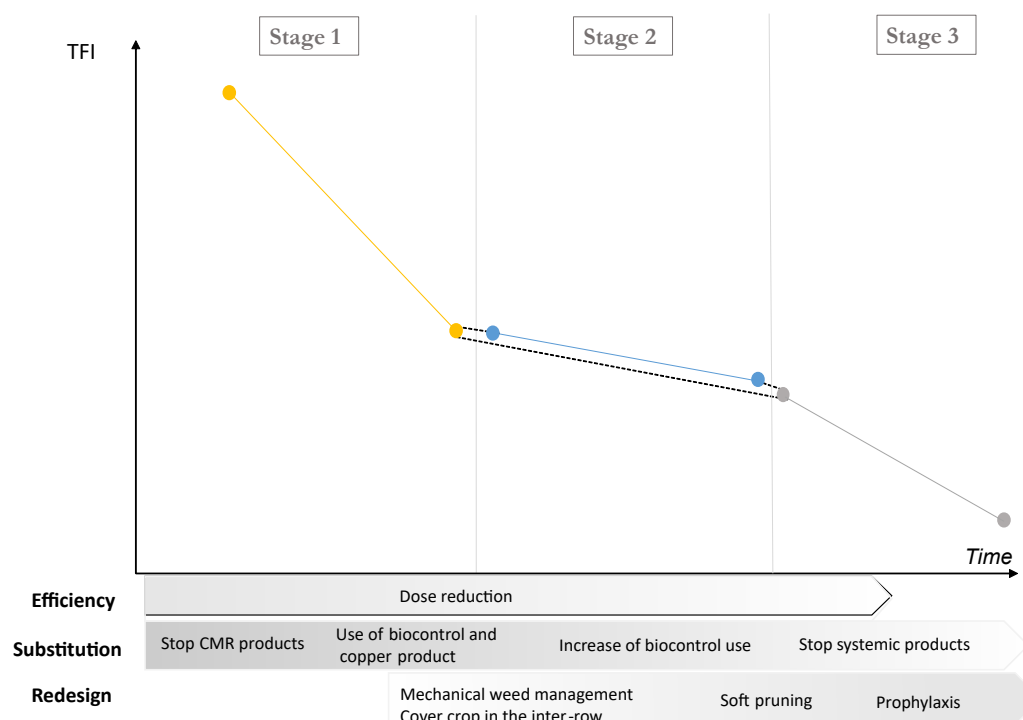


Figure 6a.6 General trajectory of pesticide use and practices identified. The grey scale shows the intensity of implementation of the practices associated with the ESR framework

Whatever the stage of the trajectory considered, the farms surveyed from all clusters were still basing their pest and disease management on the use of phytosanitary products (synthesis, copper and sulphur). A minima, it should be possible to sustain the pesticide reduction of all the farms engaged in DEPHY to the third stage observed in cluster 2 where only few changes directly mobilized biodiversity and biological regulation. A fourth stage is however needed for a stronger pesticide use reduction. But as observed in this work, the lower is TFI the higher should be the change intensity. Thus a fourth stage required deeper changes and systemic levers, linked to redesign strategy (Jacquet et al., 2022). Moreover, pesticide use is a generic solution that is applicable the same way to all situations. A contrario, nature-based solutions must be adapted to the specific context of the farm (workloads, soil and climate conditions...) (Duru et al., 2015; Jacquet et al., 2022). A change of paradigm is necessary to reduce sustainably the pesticide use, shifting from curative methods to preventive methods with the use of prophylaxis DEPHY network impacts in change trajectory (Jacquet et al., 2022; Lamine, 2017).

The dynamic of change shows that DEPHY-network have a high impact in change implementation. DEPHY appears to be a good tool of change, the speed of change is high for all clusters when entering the network so as when re-engaging the network in 2015-2016. It was interesting to notice also that after these intense periods of changes, a stabilization phase can be observed like between 2012-2015. In fact, only few changes were observed. After the re-engagement, during the period 2016-2019, the implementation of levers was progressive and changes are made step-by-step. A progressive transition was observed involving each year more intense changes (Meynard et al., 2012).

Even if DEPHY is considered for some authors as a failure (Guichard et al., 2017), previous study has showed that a TFI decrease of 33% was observed (Fouillet et al., 2022). Winegrowers are implementing new technical levers and optimizing their phytosanitary practices through spraying or dose optimization. DEPHY managed to support winegrowers in their pesticide use reduction when the dynamics of the network are at their greatest.

Finally, the levers put in place at the beginning of the network were sufficient to significantly reduce the TFI until 2016. However, most of the changes identified were not disruptive. In this regards, the DEPHY-network fails in supporting farmers in the redesign of their farming system through pesticide use reduction. It has been shown that the creation of the AGROSYST database has diverted the primary goal of the DEPHY network, which was to train engineers and support farmers in the redesign of their farming systems (Aulagnier and Goulet, 2017; Guichard et al., 2017). The database was designed to produce references and knowledge on the levers mobilized by farmers. As a result,

the time spent by the network engineers to accompany is reduced because their time is dedicated in large part to collecting data and filling the AGROSYST database (Guichard et al., 2017). Also, the pesticide reduction strategy promoted by public policies has over time focused on biocontrol products (Aulagnier, 2021). Biocontrol solutions seen as direct substitutes to pesticides are better perceived by professional agricultural organizations in the face of the ambitious perspective of farm redesign (Aulagnier, 2021). It is therefore necessary for public policies to support farmers in their efforts to redesign their operations by focusing on levers other than substitution and efficiency but also to train consultants to support this redesign.

3.6 Conclusion and Perspective

Winegrowers managed to reduce their pesticide use by implementing combining and step-by-step levers with different gradient of intensity. However, the strategy used by winegrowers to struggle against pest and diseases is still mainly linked on phytosanitary treatment when they should be turning to preventive methods such as prophylaxis. The DEPHY managed to support winegrowers in their pesticide use reduction but fails in promoting and supporting farmers in deeper changes. This work would allow us to better understand the intensity of the changes, combinations of levers and strategies implemented and to better characterize the initial point of the farmers when they entered the network. This global analysis is not enough; further work on the individual trajectories of farmers to better understand the impact of changes on the overall coherence of their system is necessary.

Chapitre 6b

Trajectoires de combinaisons de techniques au cours du processus de réduction de l'utilisation de pesticides.

1 Introduction

La première partie de ce chapitre, rédigée sous forme d'article scientifique, a démontré que la réduction de l'usage des pesticides par cluster étaient fondées principalement sur des leviers liés à des solutions de rattrapage, c'est-à-dire des changements de produits utilisés et de doses appliquées. Cette première analyse globale ne permet pas de comprendre finement ce qu'il se passe au sein de chaque exploitation enquêtée, à l'échelle individuelle et en particulier en matière de combinaisons de pratiques et leurs enchainements.

Un travail d'analyse plus fine des trajectoires de pratiques a donc été mené, afin d'identifier et d'analyser plus précisément les trajectoires individuelles de changements de pratiques vers des systèmes à plus basse utilisation de pesticides. Ce travail s'appuie sur le cadre d'analyse des phases de cohérence agronomique proposé par Moulin et al. (2008) et adapté par la suite par Chantre and Cardona (2014). Nous proposons ici une nouvelle méthode combinant (i) le cadre de Moulin et al. (2008) adapté par Chantre and Cardona (2014) et (ii) le cadre ESR de Hill and MacRae (1996) adapté par Merot et al. (2019). Les modifications progressives correspondent à des changements qui n'impactent pas la cohérence globale du système alors que les transformations, telles que définies par Moulin et al. (2008), sont vue comme étant des changements de phase de cohérence du système. Le cadre ESR nous a permis de distinguer les modifications progressives (associées à des changements d'efficience ou de substitution) des transformations (associées à de la reconception).

Nous faisons l'hypothèse que les trajectoires des exploitations des cluster 1 et cluster 2 engagées dans le réseau DEPHY avec un IFT normalisé inférieur à la moyenne régionale, présenteront plus de transformations que dans celles du cluster 3. Pour les exploitations du cluster 3, nous faisons l'hypothèse que des modifications progressives seront observées en majorité et que le nombre de transformations sera plus faible que pour les clusters 2 et 3. Ces résultats, complémentaires à l'article précédent, sont présentés en français.

2 Matériel et méthodes

Les analyses s'appuient sur les mêmes données collectées sur le même échantillon de fermes enquêtées que dans la partie précédente.

2.1 Caractérisation des changements avec le cadre conceptuel ESR de Hill and MacRae (1996)

Dans un premier temps, chaque changement identifié et présenté dans la partie précédente a été caractérisé en utilisant le cadre conceptuel "ESR" (Hill and MacRae, 1996). Ce cadre permet d'analyser le degré de dépendance aux intrants d'un système agricole en transition à travers trois étapes. Le premier niveau est l'Efficienc (E) qui correspond à un objectif d'amélioration de l'efficienc de l'utilisation des intrants. Le deuxième niveau est la Substitution (S) des intrants chimiques par des intrants organiques ou bien des pratiques alternatives. Le dernier niveau correspond à la Reconcept (R) global du système de culture ou l'exploitation agricole. Nous avons utilisé le cadre ESR réadapté par Merot et al. (2019) qui l'a utilisé à l'échelle plus fine des pratiques culturales en divisant le R de redesign en deux :

- La **Réorganisation (Ro)** qui correspond à un changement d'une pratique culturale qui conduit à repenser une ou deux autres pratiques culturales.
- Le **Redesign (Re)** qui correspond à une modification de plusieurs pratiques culturales, conduisant à un changement d'une grande partie de l'itinéraire technique.

Enfin, nous avons aussi ajouté la notion d'Arrêt (A) de pratique nécessaire à cette échelle-là, arrêt qui n'est pas forcément suivi d'un remplacement, modification, amélioration.

2.2 Mise en place d'un score ESR par année

Pour chaque année et exploitation, un score ESR a été calculé tel que Merot et al. (2019) :

$$ScoreESR_{année} = \left\{ \begin{array}{l} Re \text{ si } \left(\left(\sum_{ij} Re > \sum_{ij} A \right) \text{ et } \left(\sum_{ij} Re > \sum_{ij} E \right) \text{ et } \left(\sum_{ij} Re > \sum_{ij} S \right) \text{ et si } \left(\sum_{ij} Re \geq \sum_{ij} Ro \right) \right) \\ Ro \text{ si } \left(\left(\sum_{ij} Ro > \sum_{ij} A \right) \text{ et } \left(\sum_{ij} Ro > \sum_{ij} E \right) \text{ et } \left(\sum_{ij} Ro > \sum_{ij} S \right) \text{ et si } \left(\sum_{ij} Ro \geq \sum_{ij} Re \right) \right) \\ S \text{ si } \left(\left(\sum_{ij} S > \sum_{ij} A \right) \text{ et } \left(\sum_{ij} S > \sum_{ij} E \right) \text{ et } \left(\sum_{ij} S > \sum_{ij} Ro \right) \text{ et si } \left(\sum_{ij} S \geq \sum_{ij} Re \right) \right) \\ E \text{ si } \left(\left(\sum_{ij} E > \sum_{ij} A \right) \text{ et } \left(\sum_{ij} E > \sum_{ij} S \right) \text{ et } \left(\sum_{ij} E > \sum_{ij} Ro \right) \text{ et si } \left(\sum_{ij} E \geq \sum_{ij} Re \right) \right) \\ A \text{ si } \left(\left(\sum_{ij} A > \sum_{ij} E \right) \text{ et } \left(\sum_{ij} A > \sum_{ij} S \right) \text{ et si } \left(\sum_{ij} A \geq \sum_{ij} Re \text{ ou } Ro \right) \right) \end{array} \right\} \quad (6b.1)$$

Equation 6b.1 Score ESR calculé pour chaque année et exploitation.

2.3 Identification des phases de cohérence dans les trajectoires individuelles

Notre analyse se focalise sur les trajectoires de cohérences des pratiques des viticulteur·ice·s. Un changement de phase de cohérence se définit par un ou des changements de fonctionnement important affectant la cohérence de l'exploitation. Dans notre travail, nous nous sommes appuyées sur le score ESR par année et exploitation pour identifier les changements de phases de cohérence de pratiques à l'intérieur des trajectoires individuelles des 10 ans d'étude. Nous avons considéré que les changements de pratiques liés à des arrêts (A), de l'efficience (E) et de la substitution (S) de pratiques, comme des modifications progressives n'affectant pas la cohérence de l'exploitation. A l'inverse, nous avons considéré qu'un score de Re ou Ro affectait cette cohérence. En effet dans toutes nos enquêtes, des changements importants relevant de Re ou Ro conduisaient à la mise en place d'une nouvelle stratégie affectant l'utilisation dans le temps et l'espace des ressources de l'exploitation, ce qui est considéré par Moulin et al. (2008) comme une transformation.

2.4 Construction des types de combinaisons techniques en lien avec les phases de cohérence

2.4.1 Identification des types de combinaisons techniques

Pour identifier les phases de cohérences, nous avons caractérisé au point initial l'utilisation des pesticides et la gestion de l'herbe en fonction de trois critères :

- la nature des produits utilisés pour lutter contre la pression cryptogamique (utilisation de produits systémiques, biocontrôle...)
- la gestion du rang (chimique, mécanique, enherbement...)
- la gestion de l'inter-rang (chimique, mécanique, enherbement...)

Certaines modalités de complexification de la combinaison technique ont également été identifiées mais n'ont pas été prises en compte dans les stratégies phytosanitaires car très spécifiques et observées seulement dans quelques exploitations : variétés résistantes, changement de modalités de taille...

Pour chaque exploitation, les années où le score ESR était soit Re soit Ro, nous avons ré-actualisé la combinaison technique, jusqu'au prochain prochain score Re/Ro.

Pour vérifier si la dernière combinaison technique identifiée avec le score ESR était correcte en fin de trajectoire, la combinaison technique du point final (2019) était également redéfinie.

Ensuite, nous avons utilisé une représentation graphique (Figure 6b.2) pour mettre en évidence pour chaque cluster, les différentes trajectoires de combinaison technique et l'existence d'un pattern en termes de changement.

2.5 Lien entre combinaison technique et IFT

Pour chaque année et chaque exploitation, l'IFT hors biocontrôle obtenu à partir de la base de données Agrosyst a été associé à la combinaison technique de cette année afin de calculer une valeur moyenne d'IFT et d'évaluer le gain d'IFT pour chaque stratégie technique.

3 Résultats

Au total, 14 combinaisons techniques ont été identifiées et replacées sur un gradient en fonction des différentes modalités de produits utilisés et de gestion de l'enherbement (voir Figure 6b.1). Sur les 14 combinaisons techniques identifiées, quatre correspondent à des combinaisons liées à un mode de conduite en Agriculture Biologique (CT11 à CT14). Toutes les autres combinaisons techniques comprennent l'utilisation de produits de synthèse pour lutter contre les maladies cryptogamiques ou pour gérer l'enherbement des parcelles. Cinq combinaisons techniques sont liées à une utilisation majoritaire de produits de synthèse pour lutter contre les maladies cryptogamiques (CT1 à CT5). Enfin six combinaisons sont identifiées comme incluant une utilisation d'herbicides sous le rang (CT1 à CT3, CT 6, CT 9, CT10) dont une avec une gestion du rang et de l'inter-rang avec des herbicides de synthèses (CT1).

La Figure 6b.2 met en évidence une plus grande diversité de combinaisons techniques dans le cluster 2. Au total, 13 des 14 stratégies phytosanitaires ont été observées dans le cluster 2. Les clusters 1 et 3 sont plus pauvres en termes de nombre de combinaisons techniques rencontrées : cinq combinaisons pour les exploitations du cluster 1 et neuf combinaisons pour le cluster 3. Dans les clusters 1 et 3, les exploitations en zone méditerranéenne sont aussi celles qui restent dans des combinaisons techniques CT1 à CT5 correspondantes à une utilisation majoritaire de produits phytosanitaires de synthèse alors que des stratégies en AB sont observées dans ces clusters en zone atlantique et océanique.

3.1 Description et caractérisation des trajectoires de combinaisons techniques

3.1.1 Point initial

Avant l'entrée dans le réseau, les stratégies initiales des exploitations agricoles, tout cluster confondu, sont principalement centrées autour de l'utilisation de produits de synthèses et d'utilisation d'herbicides avec une majorité de CT1-CT2-CT3 (Figure 6b.2). Au sein du cluster 1, 10 exploitations (83%) avaient une stratégie phytosanitaire initiale basée sur un produit chimique et une culture de couverture sur l'inter-rang (ST3). Une exploitation était en ST2 (utilisation de produits phytosanitaires majoritaire, herbicide sous le rang pas de couverture du sol dans l'inter-rang) et une était en CT1. Au sein du cluster 3, 70% des exploitations avaient une stratégie phytosanitaire liée à la CT3 et 30% avaient une stratégie phytosanitaire CT1. Une plus grande diversité de stratégies initiales est observée au sein du cluster 2. Des exploitations viticoles commencent avec des points

initiaux plus avancés en termes d'utilisation des phytosanitaires, 57% des exploitations agricoles sont entrées dans le réseau avec une combinaison technique basée sur les produits chimiques et les herbicides sous le rang et dans l'inter-rang. Trois fermes (21,5%) ont démarré en CT6 c'est-à-dire avec l'utilisation d'herbicides sous le rang et l'utilisation de produits de biocontrôle et de cuivre mais elle est complétée par l'utilisation de produits de synthèse. Au total, trois exploitations (21,5%) sont entrées dans le réseau en étant déjà en agriculture biologique.

<i>Gestion de l'enherbement</i>					
<i>Rang</i>	<i>Inter-Rang</i>				
Rang enherbé	IR enherbé		CT8		CT14
	IR nu				
Rang sans HS	IR enherbé	CT5	CT7	CT11	CT13
	IR nu	CT4			CT12
Rang avec HS	IR enherbé	CT3	CT6	CT9	CT10
	IR nu	CT2			
Rang avec HS	IR avec HS	CT1			
		Utilisation de produits de synthèse majoritaire	Utilisation de cuivre/biocontrôle complété par des produits de synthèse	Utilisation de cuivre et biocontrôle seulement	Utilisation de cuivre et biocontrôle et PNPP (huile essentielle, purin...)
		<i>Nature des produits utilisés</i>			

Figure 6b.1 Distribution des combinaisons techniques en fonction des critères d'identification : la nature des produits utilisés et la gestion du rang et de l'inter-rang

3.1.2 Trajectoire de stratégies phytosanitaires

Les trajectoires moyennes observées pour chaque cluster ont été retracées Figure 6b.3.

Trajectoire de combinaisons techniques du cluster 1

Au sein du cluster 1, peu de changement de phases sont observés sur la période étudiée. Au total, 7 CT ont été observés sur l'ensemble des trajectoires de stratégies phytosanitaires des exploitations de cluster 1. Les exploitations du cluster 1 changent en moyenne 1.9 ± 0.7 fois au cours des dix ans. Le premier changement arrive tardivement, en moyenne en 2015, et les exploitations agricoles restent en moyenne 6.1 ± 4 années au sein d'une même stratégie (Table 6b.1). Une majorité d'exploitations connaît un changement de phase passant de CT3 au CT6 ou CT7 et ce jusqu'au point final de l'étude (2019). Au total, 40% des exploitations passent de l'utilisation de produits phytosanitaires à la substitution de certains traitements par du biocontrôle et du cuivre, et à l'arrêt des herbicides (de CT3 à CT7).

Trajectoire de combinaisons techniques du cluster 2

Une grande diversité de combinaisons techniques est observée au cours des trajectoires du cluster 2. Un nombre beaucoup plus élevé de changements de combinaison technique que pour le cluster 1 est observé avec une moyenne de 3.3 ± 1.1 changements de combinaison technique par exploitation. Les exploitations restent en moyenne 4 ± 3 ans entre 2 changements de combinaison technique. Les changements de stratégie se font en moyenne en 2014. Pour trois exploitations, des changements liés à du Re et Ro qui n'affectent pas la combinaison technique (en termes de nature de produit utilisé et de gestion de l'herbe) sont observés en fin de trajectoires. Ils correspondent à des changements dans le mode de taille ou à la mise en place de pratiques prophylactiques non intégrées dans la définition des stratégies techniques.

Dans le cluster 2, deux grands clusters de trajectoires de stratégies phytosanitaires sont observés au sein des exploitations en fonction du point initial et des changements de stratégies.

Tout d'abord, à partir d'un point initial basé principalement sur l'utilisation de produits de synthèse pour la gestion des ravageurs et des adventices, les trajectoires observées correspondent à (i) Un arrêt des herbicides (CT4) et pour certaines exploitations l'utilisation de produits de biocontrôle et de cuivre pour substituer certains traitements (CT7) ou (ii) une conversion directe à l'agriculture biologique.

Pour les exploitations partant d'un point initial où la stratégie est basée sur l'utilisation

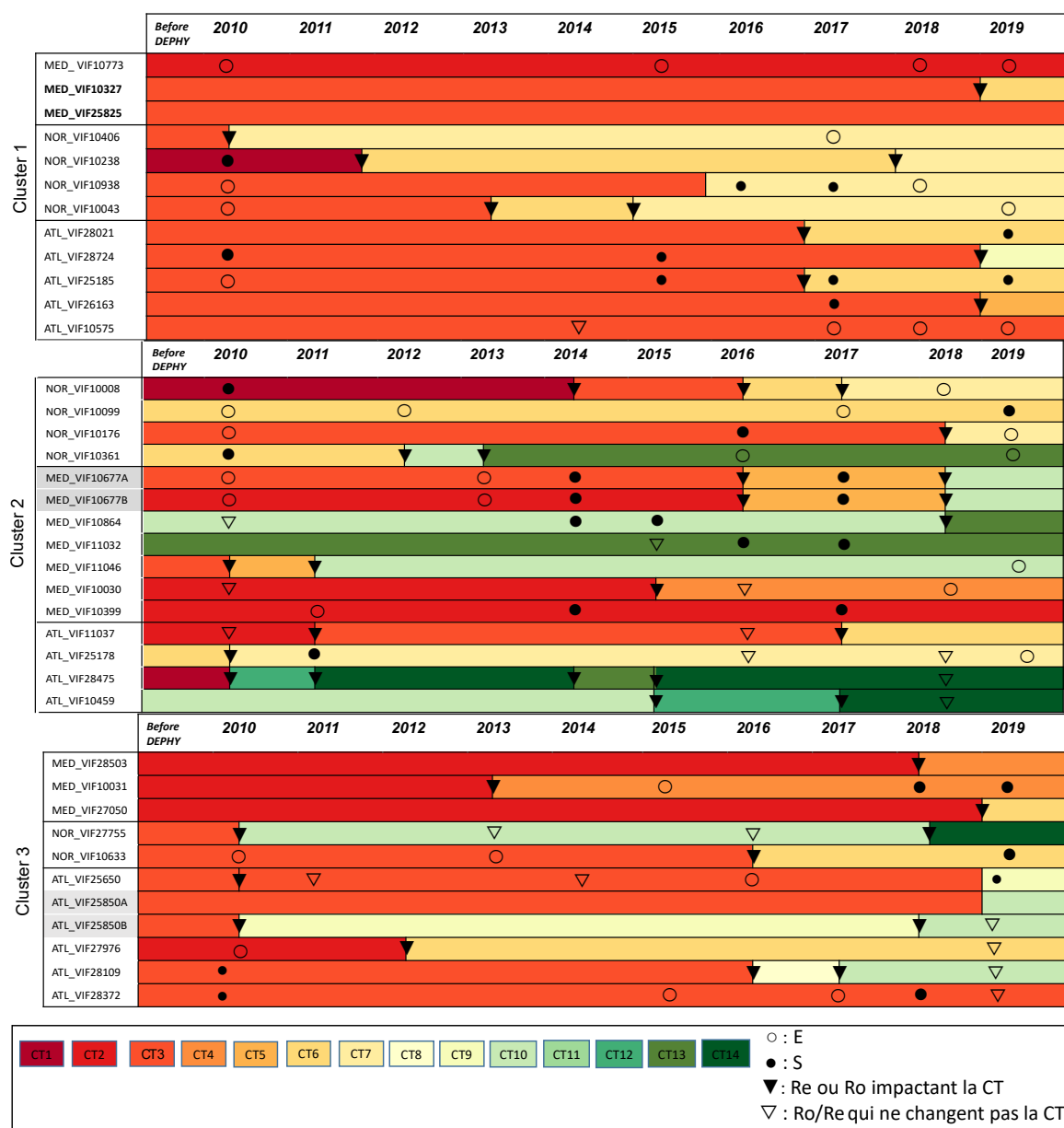


Figure 6b.2 Trajectoire de combinaisons techniques et trajectoire ESR. Les trajectoires de combinaisons techniques ont été représentées sur des frises. Elles sont séparées en fonction des types de trajectoires d'IFT identifiés dans le chapitre 3. Au sein des types, les exploitations agricoles enquêtées sont aussi regroupées en fonction de la zone climatique à laquelle elles appartiennent. Les trajectoires ESR sont également représentées.

de pesticides de synthèse, d'herbicides de synthèse et de produits de biocontrôle et de cuivre, les trajectoires identifiées correspondent à (i) aucun changement de stratégie mais une amélioration de cette dernière CT13 (ii) un arrêt des herbicides sous le rang CT7 et (3) une conversion à l'agriculture biologique en passant par une ou des stratégies intermédiaires CT5.

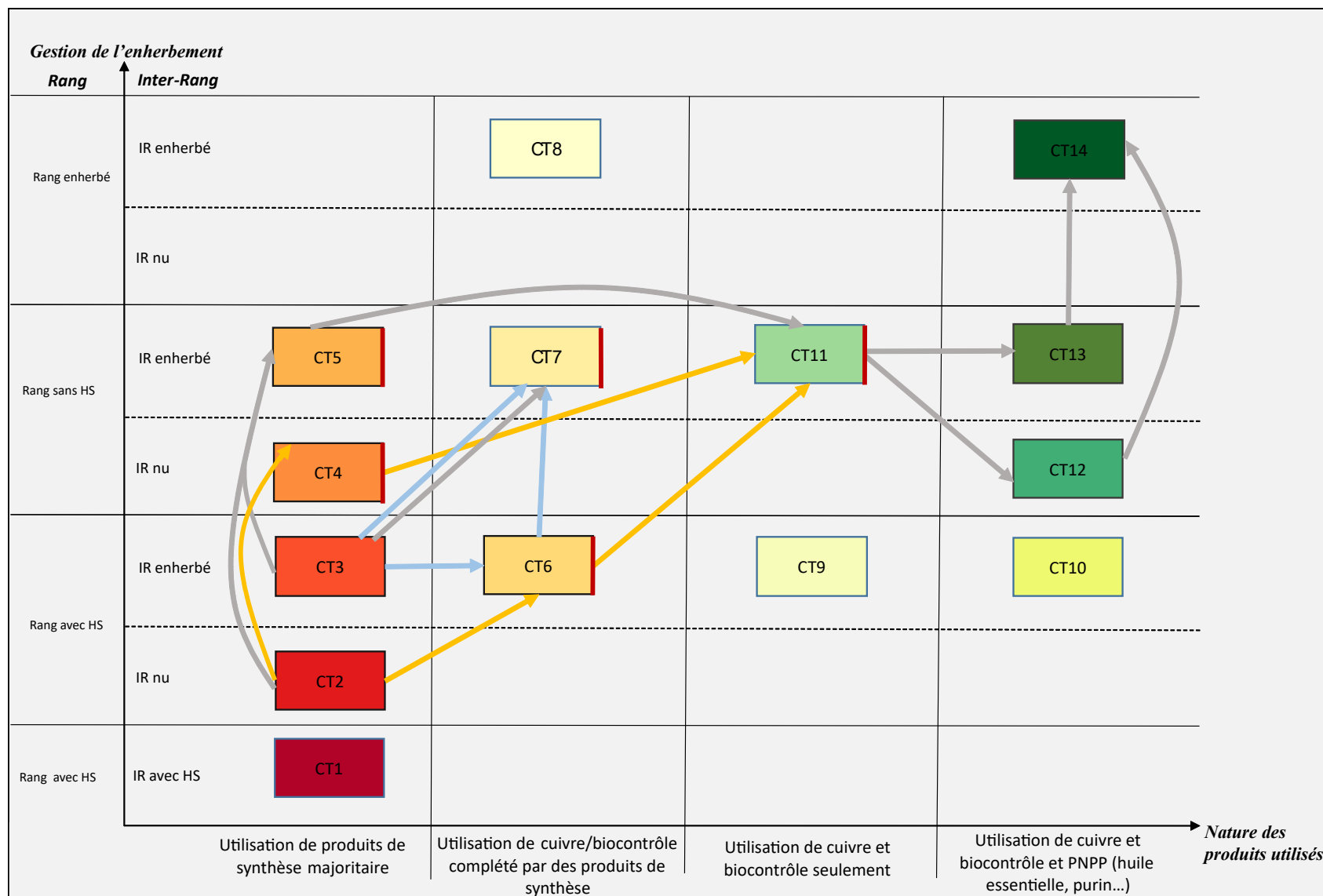
Trajectoire de combinaisons techniques du cluster 3

Table 6b.1 Description des trajectoires de combinaisons techniques en fonction des différents clusters

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Nombre moyen de changements de phase de cohérence	$1,9 \pm 0,7$	$3,3 \pm 1,1$	$2,6 \pm 0,9$
Nombre d'année moyen entre 2 changements de phase de cohérence	$6,14 \pm 4,1$	4 ± 3	$5,5 \pm 3,2$
Date moyenne du premier changement de phase	$2015 \pm 4,6$ (médiane = 2019)	$2013,8 \pm 3,2$ (médiane = 2017)	$2015,5 \pm 3,8$ (médiane = 2015)
Date moyenne du dernier changement	$2017,6 \pm 2,8$ (médiane = 2018)	$2016,3 \pm 3,4$ (médiane = 2018)	$2018,3 \pm 1,1$ (médiane = 2019)

Pour le cluster 3, neuf des 14 CT identifiées ont été rencontrées dans les trajectoires. En moyenne, 2.6 changements de combinaisons sont observés au cours des trajectoires. Les exploitations restent en moyenne 5.5 ± 3.2 ans au sein d'une même stratégie phytosanitaire. La conversion à l'agriculture biologique de quatre exploitations au cours des 10 années de l'étude est observée. Ces conversions se font de façon directe (passant de CT4 à CT11) ou bien de façon plus progressive avec des phases intermédiaires en passant par CT7, c'est-à-dire en arrêtant dans un premier temps les herbicides sous le rang et en utilisant plus de produits biocontrôle et cuivrés. D'autres exploitations vont moins loin en termes de stratégie en arrêtant les herbicides sous le rang mais en gardant une majorité de produits systémiques (CT4) ou bien en utilisant des produits biocontrôle et cuivrés en majorité (CT6).

Figure 6b.3 Trajectoire combinaison technique moyen par cluster, en bleu le Cluster 1, en gris le Cluster 2, en jaune le Cluster 3. Les barres rouges à droite de certaines ST correspondent à des stratégies souvent observées au point final (2019)



3.1.3 Des phases intermédiaires et des points de blocages dans les trajectoires

L'analyse des trajectoires de stratégies phytosanitaires fait apparaître certaines combinaisons techniques comme des points finaux et d'autres comme des points intermédiaires et permet ainsi d'identifier des points de blocages (Figure 6b.3). Les combinaisons CT3/CT4 sont des combinaisons d'entrée dans la réduction des produits phytosanitaires qui constituent le point étape 1, déjà présents dès le point initial dans les exploitations de plusieurs clusters.

Ensuite, deux chemins potentiels sont observés CT5 et CT6 qui correspondent à deux stratégies et deux objectifs différents – une réduction des produits phytosanitaires par le travail sur les produits de traitements CT6 (doses/ cluster de produits) ou une réduction par la baisse des herbicides en surface traitée CT5. Quel que soit le chemin emprunté, CT5 et CT6 sont souvent des étapes dans la trajectoire de réduction des produits phytosanitaires qui amènent à CT11 qui permet de faire converger les objectifs de CT5 et CT6 (baisse des herbicides et baisse fongicides).

CT11 est aussi une étape dans la trajectoire et un point d'entrée vers un mode de traitement compatible avec le label AB qui amène ensuite vers CT12 à CT14 ce qui est notamment visible dans le cluster 2.

Chacun de ces points étapes constitue un changement de phase de cohérence. De ce fait, il peut être vu comme un point intermédiaire qui ouvre sur un prolongement de la trajectoire de réduction des produits phytosanitaires si le viticulteur remet en perspective son objectif de transition ou comme un point d'arrêt si le viticulteur estime avoir atteint son objectif. C'est ce qui est observé dans les clusters 1 et 3 avec les CT5/CT6 ou CT11. Il

est aussi intéressant de noter le positionnement particulier de CT5 (gestion mécanique de l'herbe sous le rang, inter-rang enherbé et utilisation de produits de synthèse en majorité) qui n'a jamais été rencontrée comme une étape de trajectoire mais toujours comme un point final dans nos enquêtes qui pose la question d'un blocage sous-jacent.

Enfin pour deux exploitations, des trajectoires différenciées entre 2 parties de l'exploitation sont observées. Une partie servant de base d'apprentissage avant de passer l'intégralité de l'exploitation avec une stratégie moins intensive en utilisation de produits phytosanitaires chimiques.

3.1.4 Lien entre stratégies phytosanitaires et IFT

A partir de la base de données, les stratégies phytosanitaires ont été réassociées à l'IFT hors biocontrôle (Figure 6b.4). Le passage de CT1 à CT14 se traduit par une baisse progressive de l'IFT moyen par stratégie. La stratégie CT3, observée en majorité avant l'entrée dans DEPHY quel que soit le cluster, présente une grande variabilité d'IFT associée, indiquant de plus grande marge de manœuvre au sein de cette stratégie. L'IFT moyen au sein de la CT3 est de 11.4 ± 5.3 . Parmi les autres stratégies fortement présentes, la ST6 a une moyenne d'IFT de 8.6 ± 3.3 et la CT7 de 8.3 ± 5.3 . Les ST liés à des modes de productions en AB (CT11-12-13-14), ont de plus petites amplitudes d'IFT avec des IFT moyens autour de 5. La CT11 présente un IFT moyen de 4.8 ± 3.7 .

Au niveau des points intermédiaires dans les trajectoires observées, la baisse moyenne liée au passage de CT6 à CT7 représente une baisse moyenne de 3%. Pour le passage de CT6 à CT11 et CT7 à CT11 une différence respective de 3.8 et 3.5 point d'IFT est nécessaire, soit une baisse moyenne de l'IFT d'environ 40%. Des conversions à l'agriculture biologique directe sont observé de CT4 à CT11. Une différence d'IFT moyenne de 60% est observé entre ces deux combinaisons techniques.

4 Discussion

Cette deuxième partie de chapitre 6 avait pour objectif de mettre en évidence des combinaisons techniques associées à des niveaux d'IFT différents et d'identifier les trajectoires de combinaisons techniques mises en œuvre pour réduire efficacement les produits phytosanitaires dans chaque cluster.

La méthode mise en œuvre a permis d'identifier une diversité de combinaisons techniques au sein des clusters. Certaines combinaisons techniques et trajectoires de combinaisons techniques étant plus fréquemment rencontrées que d'autres, cela nous permet d'identifier les chemins qui sont privilégiés par les viticulteur·ice·s lors du processus de

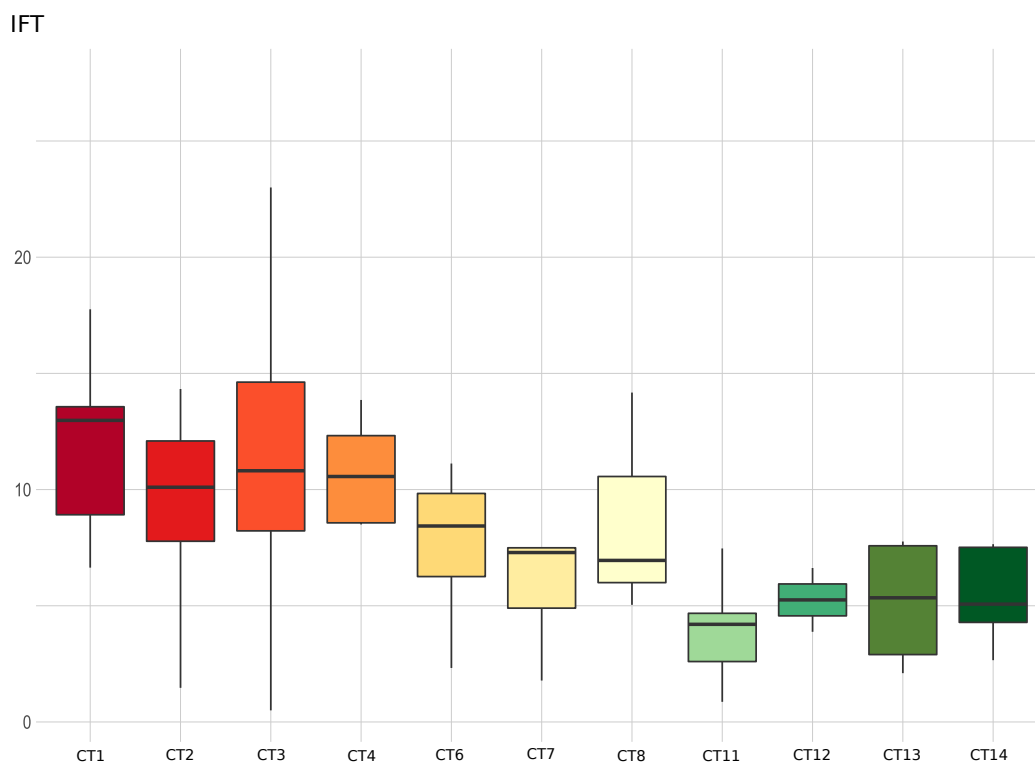


Figure 6b.4 Gamme d'IFT en fonction des différentes combinaisons techniques

réduction des pesticides. Nous avons pu montrer que les trajectoires de combinaisons techniques différaient dans chaque cluster expliquant ainsi la baisse différentielle d'IFT par cluster. Ainsi nous avons observé une trajectoire avec un nombre limité de phases de cohérence, c'est-à-dire une faible diversité de combinaisons techniques qui se succèdent, dans le cluster 1 qui présentait aussi la plus faible baisse d'IFT. Finalement, dans ce groupe nous retiendrons qu'une grande majorité des exploitations enquêtées arrêtent l'utilisation d'herbicide sous le rang, résultat qui se retrouve par ailleurs dans les autres clusters.

Au sein des clusters 2 et 3, qui diffèrent par les combinaisons techniques de départ, les combinaisons techniques évoluent plus vite et plus loin en matière de réduction des produits phytosanitaires en suivant des chemins privilégiés. Un grand nombre d'exploitations parviennent à se convertir à l'Agriculture Biologique en atteignant une combinaison liée à CT11 (ou plus) par des chemins différents. Les exploitations du cluster 2 qui ne sont pas encore en Agriculture Biologique lors de l'entrée dans le réseau passe par une combinaison techniques basée sur une gestion mécanique de l'herbe sous le rang et une utilisation de produits de synthèse majoritaire (CT5) avant d'atteindre la combinaison technique liée à l'Agriculture Biologique (CT11). Tandis que certaines exploitations du cluster 3

connaissent des transitions à l'AB soit progressive passant par une utilisation de produits cuivrés et biocontrôle (CT6) avant d'arrêter l'utilisation des herbicides sous le rang. Des transitions plus directes sont observées passant de directement d'une combinaison technique reposant en majorité sur des produits de synthèses pour la gestion des fongicides et de l'herbe à un mode de conduire en Agriculture Biologique (CT11). Ces différences de de transitions direct ou plus progressives sont observés peuvent être remise en lien avec les travaux de Lamine and Bellon (2009).

En effet, le passage à l'agriculture biologique (CT11) constitue pour certains un point final dans les trajectoires de changements de pratiques vers des systèmes plus efficient en utilisation de produits phytosanitaires. Cependant, certain·e·s viticulteur·ice·s vont plus loin. Même si nous n'observons pas de différence en termes d'IFT vis-à-vis des exploitations qui vont plus loin, avec des recours à des huiles essentielles ou PNPPs ou bien en enherbant sous le rang (CT12-13-14) mais elles connaissent plus de changements liées à de la reconception comme le mode de taille ou encore de la prophylaxie.

Par ailleurs, certaines exploitations, notamment celles du cluster 1, restent sur certaines combinaisons techniques. Le passage à l'utilisation complète de cuivre sans utilisation de produits de synthèse à des moments clés notamment autour de la floraison (Fouillet et al., 2022) constitue une prise de risque pour certain·e·s viticulteur·ice·s (passage de CT6/CT7 à CT11). Finalement certaines exploitations s'arrêtent à une combinaison reposant sur une utilisation majoritairement sur l'utilisation de produits cuivrés, biocontrôle et plus ou moins d'utilisation de produits herbicides de synthèse sous le rang (CT6-CT7).

Au sein de chaque phase de cohérence identifiée, des changements sont aussi réalisés par les viticulteurs. Ils sont liés à une recherche de meilleure efficience et de la substitution. Nous n'observons pas de logique temporelle pour ces changements. Ils traduisent aussi une approche de la conception pas-à-pas de systèmes moins dépendants des pesticides avec une amélioration constante des stratégies en place. Ces résultats sont cohérents avec les dynamiques de changements et les phases dynamiques observées dans le début de ce chapitre.

Les trajectoires cluster ont permis d'identifier des points importants en terme d'accompagnement et de conseil notamment dans l'accompa-gnement vers l'arrêt des herbicides et la conversion vers l'AB. Ces résultats amènent de nouvelles perspectives d'analyse sur l'identification des points de blocages à partir des données de contexte, organisationnelles, économiques. Des analyses plus fines du parcellaire (dispersion, difficulté à travailler les parcelles...) sont nécessaires pour mieux appréhender les freins et blocages organisationnels et techniques auxquels font face les viticulteur·ice·s. De plus, des données sur les facteurs économiques (Merot et al., 2019) permettraient d'identifier les freins économiques no-

tamment pour les exploitations qui restent en ST6/ST7. Une analyse plus approfondie du contexte des exploitations serait ainsi nécessaire.

PARTIE IV

Discussion générale

Chapitre 7

Discussion générale

Ce travail de thèse avait pour objectif d'étudier les systèmes viticoles engagés dans une réduction des produits phytosanitaires à travers les trajectoires de pratiques et des performances associées. Les connaissances acquises sur les processus de transition et les dynamiques d'implémentation de solutions de conception en situation réelle de production permettront de mieux accompagner les viticulteur·ice·s à la conception de nouvelles façons de produire. Cette étude avait été déclinée en trois sous-objectifs cognitifs, à savoir i) Évaluer et caractériser les trajectoires d'utilisation des pesticides au sein de systèmes de culture engagés dans une réduction des pesticides dans une diversité de contextes de production, ii) Identifier et caractériser l'impact des changements de stratégie phytosanitaires sur les différentes performances (environnementales, techniques et économiques), iii) Identifier et caractériser les changements de pratiques mis en œuvre au cours du temps par les viticulteurs engagés dans une réduction de produits phytosanitaires.

Dans ce chapitre, nous discutons des apports scientifiques, méthodologiques et opérationnels de la thèse.

1 Apports cognitifs de la thèse sur les changements et dynamiques de changements des viticulteur·ice·s au cours du processus de réduction de l'utilisation de pesticides

1.1 Évolution générale de l'utilisation des pesticides au sein du réseau DEPHY

1.1.1 Les fermes DEPHY arrivent à réduire leur utilisation de pesticides de 33%

Le premier résultat de cette thèse est que les fermes du réseau DEPHY arrivent à réduire leur utilisation des pesticides. À l'échelle du réseau, nous avons identifié une baisse moyenne de l'IFT de 33% sur les 10 années d'études (Chapitre 3). La comparaison de l'IFT DEPHY en 2019 comparé à l'IFT régional moyen indique que les systèmes DEPHY sont bien en dessous de la moyenne d'utilisation des produits phytosanitaires en France. L'IFT normalisé médian était de 0.65 en 2019, indiquant une marge de réduction de 35% à l'échelle nationale. Nos résultats en viticulture rejoignent les travaux de Lechenet (2016), sur le réseau DEPHY grande culture qui identifie au sein du réseau des stratégies économes en pesticides. En ce sens, le réseau DEPHY remplit une partie de ses objectifs de réduction de l'utilisation des pesticides. Ces résultats restent cependant insuffisants face au 50% de réduction ciblés d'ici 2025 par la plan ECOPHYTO.

La réduction identifiée au sein du réseau DEPHY montre qu'il existe un vrai potentiel de baisse des pesticides sachant que les exploitations du réseau DEPHY représentent majoritairement le modèle dominant de production (Guichard et al., 2017). La baisse de pesticides est constatée dans une majorité de bassins viticoles français étudiés quelle que soit la pression initiale des bioagresseurs et les conditions pédoclimatiques. Même dans des conditions qui sont favorables au développement des bioagresseurs il est possible de réduire l'utilisation des pesticides. Ainsi, dans des bassins viticoles avec des fortes pressions bioagresseurs dû à la forte pluviométrie tels que le bordelais ou le Val de Loire, une baisse significative de l'IFT est observée au sein du réseau DEPHY.

Nous avons pu constater que la trajectoire de réduction des produits phytosanitaires s'organise progressivement entre périodes d'implémentation de changements et périodes d'ajustement. La baisse d'IFT observée dans le réseau est très rapide puisqu'elle se fait dès l'entrée dans le réseau. Entre le point initial et 2012, une réduction de 13% est observée, avant une période de stabilisation (Chapitre 3). Les changements qui permettent cette

baisse sont donc rapides à implémenter (sur un ou deux ans), ce qui se confirme au cours du Chapitre 6a. Cette forte implémentation est suivie par une période d'ajustement des pratiques avec peu de changements en particulier de forte intensité sur la période 2012-2015, puis une reprise d'implémentation de leviers pas-à-pas. La baisse de l'utilisation des pesticides se fait pas-à-pas avec des périodes plus ou moins intenses en matière de changements (Meynard et al., 2012).

1.1.2 Une réduction des produits phytosanitaires est possible sans impacter les autres performances

Les résultats de l'analyse générale du réseau montrent qu'en parallèle de la baisse d'IFT, une baisse de rendement est observée (Chapitre 3). Cependant, l'analyse plus détaillée de cette dynamique (Chapitre 5) ne montre pas de corrélation entre la baisse d'IFT et la baisse de rendements. Ces résultats en viticulture peuvent compléter les travaux de Jacquet et al. (2011) qui montrent qu'une baisse d'IFT de 30% n'impacte pas significativement les revenus des agriculteur·ice·s en grandes cultures.

La cause de réduction des rendements doit donc être cherchée au-delà des changements de pratiques de réduction des pesticides. Une baisse des rendements à l'échelle nationale a été observée depuis plus de 10 ans (Schauberger et al., 2018). En 2018, une enquête nationale a révélé que 90% des viticulteur·ice·s faisaient face à des baisses de rendement qui les préoccupent fortement (PNDV, 2018). Ce phénomène généralisé a été identifié dans la filière viticole indépendamment de la baisse des produits phytosanitaires et nommé dépérissement viticole. La perte de rendement lié au dépérissement viticole a été estimée en moyenne à $4.5 \text{ hL} \cdot \text{ha}^{-1}$ et par an pour les vignobles d'appellation. Dans tous les cas, le rendement viticole représente une variable sensible dans l'évaluation des impacts de changements d'autant que le rendement dépend de beaucoup de paramètres (Merot, 2022).

En plus du rendement, nous avons constaté que la baisse de l'IFT n'affecte pas les variables sociotechniques et économiques. Une diminution des charges opérationnelles de 46% a aussi été observée mais ne s'avère pas corrélée à la baisse d'IFT. Ces résultats sont particulièrement intéressants car ils sont fondamentaux pour rassurer les viticulteur·ice·s qui présentent une aversion aux risques importante (Lamine, 2017). Ils sont d'autant plus intéressants que nous avons identifié une augmentation du travail mécanique sous le rang et de l'inter-rang ainsi que des travaux en vert (ébourgeonnage manuel).

1.2 Les leviers mobilisés pour réduire l'utilisation des pesticides relèvent essentiellement de l'efficience et de la substitution

1.2.1 Les principaux leviers identifiés relèvent de l'efficience et de la substitution

Les leviers mis en œuvre par les viticulteur·ice·s au cours du processus de réduction des pesticides relèvent principalement de l'efficience et la substitution. Une majorité des changements cible les fongicides, qui représentent 80% des traitements faits en viticulture en 2019 (Simonovici and Caray, 2021). Les leviers observés sont la substitution de produits systémiques par des produits de biocontrôle (incluant le soufre pour lutter contre l'oïdium) et par des produits cuivrés (pour lutter contre le mildiou). Un arrêt de l'utilisation des produits CMR est aussi observé. Ces changements de produits s'accompagnent d'un gain d'efficience s'appuyant sur un raisonnement des doses avec ou sans outils d'aide à la décision. Ces leviers sont la plupart du temps combinés comme le montre le chapitre 6.

Parmi les changements identifiés au cours de la thèse, la majorité des changements identifiés ne relève pas du redesign. Aussi, peu de leviers mobilisés à l'échelle de l'exploitation sont observés. Ces résultats font échos aux différentes études de trajectoires de changements réalisées en grandes cultures (Chantre and Cardona, 2014; Lamine, 2011) mais aussi sur des systèmes pérennes tels que les agrumes (Dupré et al., 2017) où peu de changements liés à la reconception ont été identifiés. Dupré et al. (2017) identifient que la mise en place de changements liés à la reconception est liée à des contextes spécifiques : le mode de commercialisation, les différenciations et compensations au sein de l'exploitation (une partie reste plus intensive). L'étude de Pissonnier et al. (2019) montre aussi la difficulté des agriculteur·ice·s à mettre en œuvre des changements radicaux à l'échelle de l'exploitation. Les agriculteur·ice·s vont avoir tendance à se tourner plus facilement vers des leviers d'efficience et de substitution, via des réductions de doses ou une substitution des intrants synthétiques par des produits plus 'naturels'. La reconception de l'exploitation nécessite non seulement une refonte de l'organisation mais aussi de la stratégie globale de l'exploitation (Pissonnier et al., 2019).

Nous avons quand même identifié quelques leviers relevant du redesign et impactant plus fortement le fonctionnement de l'exploitation agricole. Ainsi, les leviers qui concernent la gestion de l'enherbement (inter-rang et rang) présentent plus d'intensité de changement, et sont associés majoritairement à de la reconception. En effet, l'arrêt du désherbage chimique sous le rang avec un travail du sol et de la gestion de l'inter-rang via l'implantation de culture de service ou d'enherbement spontané complexifient le fonctionnement de l'exploitation. Les changements liés à la gestion de l'enherbement sont

souvent les changements les plus intenses implémentés au sein des exploitations DEPHY.

1.2.2 Les leviers identifiés sont génériques

Malgré le fort effet bassin viticole, les leviers identifiés sont génériques, c'est-à-dire qu'ils sont implémentés au sein d'exploitations dans la plupart des bassins viticoles. Les trajectoires types d'IFT identifiées dans le Chapitre 4, sont présentes dans presque tous les bassins viticoles (au moins dans toutes les zones climatiques). Au cours des enquêtes, nous n'avons pas mis en avant d'effet bassin viticole dans la mise en place des leviers. Certains leviers seront peut-être intensifiés dans certaines régions mais c'est surtout le nombre d'interventions qui varie plus que le choix de mise en œuvre d'un levier plutôt qu'un autre. Ce résultat est particulièrement positif dans une démarche visant à encourager les viticulteur·ice·s à réduire les pesticides.

A contrario, la forte généralité des leviers identifiés souligne aussi le manque de leviers liés à de la reconception. Les viticulteur·ice·s ne changent pas de paradigme et les stratégies restent fortement fondées sur l'utilisation d'intrants (méthode curative), plutôt que sur des méthodes fondées sur les processus biologiques (méthodes préventives). La mise en œuvre de pratiques fondées sur des processus agroécologiques nécessite une adaptation plus forte aux spécificités de la situation agricole et du contexte social, économique et écologique (Couix et al., 2022; Toffolini et al., 2017a) ce qui n'a pas été fait dans la majorité des exploitations du réseau DEPHY.

1.2.3 Les viticulteur·ice·s suivent des trajectoires similaires

La mise en place de leviers génériques au sein de tous les bassins viticoles et de tous les clusters se traduit également par des combinaisons techniques et trajectoires de combinaisons techniques « type » identifiées dans tous les bassins viticoles et dans tous les clusters (Chapitre 4 et Chapitre 6a). Cette généralité fait ressortir l'existence d'un schéma type de réduction des produits phytosanitaires plutôt que plusieurs trajectoires arrivant toutes au même point final.

Dans cette trajectoire type, des combinaisons techniques « nœuds » ou « étape » ont été mises en évidence. Les résultats du Chapitre 6b montrent que pour réduire le recours aux pesticides les viticulteur·ice·s passent tous par un arrêt des herbicides (sous le rang et l'inter-rang) et/ou une substitution des produits de synthèse. Les combinaisons techniques mises en place sont assez similaires. Deux chemins sont cependant possibles lorsque les viticulteur·ice·s démarrent d'une forte utilisation de pesticides. Ils-elles peuvent démarrer en arrêtant les herbicides et continuer en basculant vers l'utilisation de produits cuivrés et soufrés. Les viticulteur·ice·s peuvent aussi prendre les changements dans le sens inverse

en basculant vers l'utilisation de produits cuivrés et soufrés d'abord avant d'arrêter les herbicides. Ces premiers changements amènent progressivement aux pratiques bio et ouvrent vers une nouvelle étape de changement technique avec l'apparition de nouveaux produits (PNPP, biocontrôle...) comme dans le cluster 2. Ces leviers constituent un 'pack' de changements qui peuvent être rapidement mis en œuvre plus ou moins intensément puis adaptés au cours du temps. Wilson (2008) définit ainsi les points nodaux (*nodal changes*) comme des points étapes où se fait le retour vers l'objectif de la transition et une réorientation potentielle de cet objectif.

Ainsi, des combinaisons techniques et trajectoires de combinaisons apparaissent comme des clés dans le processus de réduction des pesticides (CT3, CT6). Nous avons pu observer des grandes étapes dans le processus de réduction d'intrants. Des chemins similaires et des « carrefours » dans les trajectoires sont observés que soit pour les trajectoires d'IFT et les trajectoires de combinaisons de techniques. En reprenant la description des transitions par Wilson (2008), les chemins similaires empruntés par les viticulteur·ice·s peuvent rendre compte d'une dépendance au chemin, les choix faits auparavant par les viticulteur·ice·s s'articulant autour de l'utilisation des pesticides. Proposer des gammes de combinaisons techniques et des chemins possibles avec des changements simples, pas-à-pas pourrait permettre de mieux supporter les transitions vers des systèmes durables (Deffontaines et al., 2020).

Les constatations liées à la faible reconception et à la généricité des leviers amènent à s'interroger sur l'accompagnement des viticulteur·ice·s au cours du processus de réduction des pesticides. La question se pose de comment aider et supporter les agriculteur·ice·s dans la reconception de stratégie de protection à l'échelle de l'exploitation tenant compte de son contexte. Pour accompagner les agriculteur·ice·s à concevoir ou reconcevoir leur stratégie de protection sanitaire à l'échelle de l'exploitation, le type de conseil fourni doit évoluer (Cerf et al., 2010). Les conseiller·ère·s fournissent des conseils d'ordre tactique ou opérationnel (Le Gal et al., 2011; Pisonnier et al., 2019). Des conseils stratégiques qui prennent en compte l'ensemble du système agricole et identifient les obstacles empêchant les producteurs d'innover (Le Gal et al., 2011) sont nécessaires. La transition agroécologique amène des transformations dans les manières de penser le conseil et les logiques d'accompagnements (Duhamel et al., 2017).

1.2.4 Quelques situations de réduction de pesticides plus poussées qui permettent d'imaginer les étapes futures

Malgré le faible niveau de reconception identifié, des changements plus profonds sont observés chez certaines exploitations du cluster 2. Ainsi, l'étude des exploitations du cluster 2, qui vont plus loin en terme de combinaisons techniques et de réduction de l'utilisation des pesticides permet d'identifier des situations où les viticulteur·ice·s vont aussi plus loin en terme de réduction des pesticides. Pour rappel, les exploitations du cluster 2 sont représentées par un faible point initial comparé à l'IFT régional et une forte baisse de l'IFT observée (48.7%). Ces systèmes sont particulièrement intéressants puisque certaines exploitations partent de combinaisons techniques déjà bien avancées (travail mécanique pour gérer l'herbe sous le rang et utilisation de produits cuivrés et soufrés) et parfois déjà en agriculture biologique. L'étude des trajectoires des exploitations du cluster 2 permet d'imaginer les combinaisons techniques futures par lesquelles pourraient passer les exploitations des cluster 1 et cluster 3. Pour les trajectoires de changements des fermes du cluster 2, une étape de plus dans la trajectoire générique de combinaisons de leviers est observée après avoir dépassé les combinaisons techniques CT6 (utilisation de produits soufrés et cuivrés) et CT7 (arrêt des herbicides sous le rang et utilisation de produits cuivrés et soufrés). La trajectoire 'type' suivie par une majorité d'exploitations DEPHY se prolonge par des combinaisons techniques, se rapprochant au point final à un mode de conduite en agriculture biologique avec une intégration des préparations naturelles peu préoccupantes (PNPP) comme des huiles essentielles ou des purins et des pratiques mises en place liées à de la biodynamie. Une analyse plus fine des quelques exploitations allant très loin dans les changements pourrait s'avérer aussi intéressant pour commencer à dessiner le pas de plus.

Au cours du processus de réduction des pesticides, des leviers plus systémiques sont finalement mis en place à partir de 2016. Ces leviers (changements dans le mode de taille ou changements mis en place à l'échelle exploitation) posent la question d'un changement profond d'objectif de conception visé par ces exploitations de cluster 2. Finalement, en 2019, point final de notre étude, les situations en AB sont plus nombreuses (%). La finalité des trajectoires identifiées amène donc à des modes de conduites en AB 'classique' (qualifié par Hill (2014) de *'shallow organic'*) avant d'aller plus loin vers des pratiques plus tournées vers des produits naturels et des pratiques associées à la biodynamie. Ainsi, nos travaux montrent la place importante que prend le mode de conduite en AB soit comme point de bascule vers des pratiques encore plus vertueuses en terme de pratiques phytosanitaires soit comme point d'arrêt. Ces résultats vont dans le même sens que les travaux de Hill and MacRae (1996) qui place l'Agriculture Biologique vers la fin de

trajectoire de changements mais pas comme un point final. Le stade final intégré par Hill (2014) correspond à la conception intégrée des agroécosystèmes.

1.2.5 L'accompagnement au sein de DEPHY joue un rôle dans les types de changements identifiés

Le travail sur les dynamiques de changements et les natures de changements identifiés dans cette thèse pose des questions sur le rôle du réseau DEPHY et des politiques publiques dans l'accompagnement à la réduction des pesticides.

Tout d'abord, nous n'avons pas exploré l'effet groupe et animation dans nos travaux. Chaque groupe DEPHY est animé par un·e ingénieur·e réseau. Le groupe définit un ou deux objectifs de travail (*e.g.* optimisation de la pulvérisation, couverts végétaux). Les axes de travail pris par chaque groupe peuvent donc impacter les natures des leviers mis en place. De plus, les leviers déjà implémentés par certain·e·s membres du groupe peuvent servir d'exemples et d'arguments positifs pour leurs mises en place auprès des autres viticulteur·ice·s du groupe (Compagnone, 2004). La circulation des connaissances et des expérimentations des viticulteur·ice·s peut également accélérer les processus de changements (Compagnone et al., 2018). Cependant, ces dynamiques de groupes dépendent fortement des ingénieur·e·s réseaux, pour qui l'animation de groupe n'est pas l'unique rôle. En effet, ils·elles sont également en charge de collecter et saisir les données dans la base de données AGROSYST. Guichard et al. (2017) et Aulagnier (2021) soulignent le changement du rôle des ingénieur·e·s réseau lors de la mise en place de la base de données. La création de la base de données a changé la nature du travail des ingénieur·e·s qui passent d'accompagnateur de changement à collecteurs de données pour alimenter la base de données DEPHY (Omon and Guichard, 2017). Les ingénieurs passent un temps non négligeable dans la saisie des pratiques culturales dans la base de données AGROSYST (Guichard et al., 2017). Aussi, les emplois d'ingénieur·e·s restent des emplois 'précaires', représentés en majorité par des personnes jeunes et peu expérimentées avec un *turn-over* important qui peut affecter la qualité de l'animation du groupe.

Ensuite, l'analyse en sciences politiques et sociologiques faites par Aulagnier and Goulet (2017) remet en perspective les dynamiques DEPHY et les politiques publiques mises en œuvre pour accompagner la réduction des pesticides. Les auteurs soulignent notamment le tournant pris par les politiques vers la substitution des pesticides de synthèses par des produits biocontrôle, dénaturant ainsi la vision des agronomes pour qui la substitution relève de la lutte biologique. L'augmentation de l'utilisation de produits biocontrôle à la place des produits systémiques produit certes des résultats plus rapides en terme de baisse de l'utilisation des pesticides mais ne permet pas de changer de paradigme et l'utilisation

accrue de produits biocontrôle peut expliquer en partie la faible reconception identifiée dans notre étude.

2 Apports et contraintes méthodologiques de la thèse

Au-delà des résultats cognitifs de cette thèse, ce travail présentait une dimension méthodologique forte. En effet, un enjeu de cette thèse était de proposer des méthodes pour évaluer et caractériser les trajectoires de pratiques et performances des exploitations viticoles opérant une réduction des pesticides. Les méthodes recherchées devaient aller au-delà d'études locales sur un faible nombre d'exploitations dont les résultats risquaient d'être plus limités en terme d'impact. Nous avons fait l'hypothèse que la combinaison d'une approche « *Big Data* » et d'une approche par enquêtes permettrait de donner plus de généralité aux résultats sans pour autant faire d'impasse sur leur finesse.

2.1 La base de données AGROSYST présente des avantages et des contraintes

Les analyses réalisées au cours de cette thèse se sont basées en grande partie sur la base de données AGROSYST. La base de données AGROSYST est une base de données unique en France qui compile les données de pratiques et de performances sur le temps long (depuis 2010 à aujourd'hui) et à l'échelle nationale. Ces données sont importantes pour démontrer la possibilité de réduction de l'utilisation des pesticides dans une large gamme de contextes de production pour les différentes filières agricoles. Dans les chapitre 3, chapitre 4 et chapitre 5, nous avons pu travailler sur les dynamiques de performances dans une diversité de bassins viticoles et de situations de production avec un nombre élevé de systèmes de culture malgré les sélections réalisées.

Cette base de données a déjà été mobilisée et valorisée dans différents travaux de thèse, en grandes cultures et en viticulture/arboriculture. Pour les systèmes en grandes cultures, Lechenet et al. (2016) ont identifié des clusters de situations de production avec des niveaux contrastés d'utilisation de pesticides. Les auteurs ont identifié le degré de réduction de pesticides pour lesquels aucune perte de rentabilité n'avait été observée. Les résultats issus de cette base de données fournissent des connaissances pour un large éventail de situations à l'échelle nationale qui pourront servir d'appui aux agriculteur·ice·s, aux conseiller·ère·s et aux décideur·euse·s politiques (Debaeke et al., 2022).

Le travail sur la base de données nous a permis d'identifier les changements à partir des données de performances (IFT et IFTbiocontrôle, quantité de cuivre et soufre) et qui concernent donc majoritairement des solutions de rattrapage. En grandes cultures,

des leviers tels que des changements dans la date de semis, un allongement des rotations ou encore une diversification des cultures sont impactant en terme de baisse d'IFT et clairement identifiables à partir d'Agrosyst (Lechenet, 2016). Dans le cas des systèmes viticoles, le manque de finesse dans la description des pratiques représente une limite importante pour le travail d'identification de leviers et pour associer ces leviers à l'évolution de l'utilisation des pesticides étant donné que ce sont ces leviers pour lesquels des blocages organisationnels sont identifiés. Les données concernant les traitements restent malgré tout très précises et permettent de travailler en finesse sur les performances et les solutions de rattrapage.

Il faut signaler aussi que le principal indicateur utilisé dans ce travail de thèse pour rendre compte du niveau d'utilisation des pesticides au sein du réseau DEPHY est l'IFT. C'est également un des principaux indicateurs avec le nombre de dose (NODU) et la quantité de matière active (QSA) suivis par DEPHY et ECOPHYTO pour rendre compte des évolutions et des progrès réalisés (Guichard et al., 2017). Cependant, cet indicateur est controversé, l'IFT est un indicateur de dépendance aux pesticides, sa réduction devient une fin en soi. Guichard et al. (2017) souligne que cet indicateur peut être baissé artificiellement. Cet indicateur reste un bon indicateur qui doit être complété par d'autres.

AGROSYST est une base de données riche qui permet de travailler sur une diversité de problématiques pour différentes disciplines (agronomie, écologie, économie...) et peut fournir des résultats à différentes échelles (systèmes de culture, paysage). Une autre richesse de cette base de données est qu'elle peut être connectée à d'autres. La base de données AGROSYST peut être associée à d'autres bases de données telles que *EPIPHYT*, une base de données nationale d'épidémiologie (Etienne et al. (*in progress*), Courson et al. (*in progress*)) pour lier pratiques culturales et infestations de bioagresseurs. Etienne et al. (*in progress*) ont ainsi mis en évidence l'impact significatif du paysage sur l'utilisation des pesticides (insecticides et fongicides) en arboriculture (pommier) et viticulture. Une autre étude a lié la base de données AGROSYST à la base de données Agreste (Lapierre et al., 2019) qui permet d'avoir des données plus précises sur les pratiques mais aussi de fournir des données économiques. Cette étude a permis d'identifier que les viticulteur·ice·s engagé·e·s au sein de DEPHY ont utilisé de 8 à 22% moins de pesticides qu'ils·elles ne l'auraient fait en l'absence du programme.

Cependant, AGROSYST est une base de données complexe qu'il est difficile de prendre en main. Nous avons fait face à plusieurs difficultés méthodologiques au cours de nos analyses.

Dans un premier temps, du fait de la forte hétérogénéité de saisie, nous avons sélectionné seulement certains systèmes de culture pour lesquels les données étaient complètes

pour le calcul de l'IFT. Il est important de souligner que depuis le début de cette thèse, des efforts importants ont été fournis par la CAN pour nettoyer et filtrer les erreurs de saisie dans la base de données. Sur les 326 systèmes entrés en 2010, nous avons pu en garder 75%. Pour le chapitre 4, un deuxième tri a été effectué pour ne garder que 161 systèmes de culture soit 49% des systèmes de culture entrés en 2010. Malgré le tri réalisé, le nombre de systèmes de culture gardés reste tout de même élevé et ceci dans une diversité de contextes de production. En 2022, l'étude des systèmes entrés en 2016 pourrait être intéressante, notamment pour comparer les trajectoires de combinaisons techniques et tester si les trajectoires types identifiées sur les systèmes de culture engagés depuis 10 ans sont similaires.

Ensuite, lors du stage de fin d'étude d'ingénieur de Margaux Guy, qui visait à identifier les pratiques mobilisées à partir de la base de données, certaines pratiques identifiées comme des leviers dans la bibliographie (tableau 1.1) n'ont pas pu être étudiées. Des informations telles que les caractéristiques parcellaires (e.g. densité de plantation, orientation des rangs) ou encore des aspects du mode de conduite de la vigne (e.g. forme de la taille, cépage ou porte-greffe) sont inégalement renseignées en fonction des groupes. Ces pratiques représentent des leviers importants et sont souvent évoquées dans la bibliographie (Barbier et al., 2011; Pertot et al., 2017; Niles et al., 2018). La présence d'animaux, que ce soit pour la traction animale (cheval) ou encore pour le pâturage avec des ovins, identifiée par enquêtes, n'ont pas été retrouvés dans la BDD pour les systèmes de culture concernés. De même, des pratiques comme l'adaptation du matériel par les agriculteur·ice·s identifiées dans la bibliographies (Petit, 2018) ne sont pas non plus facilement identifiables sur la base de données. Ces constats mettent en lumière les limites de la base de données AGROSYST pour identifier des pratiques clés pour la réduction des pesticides dans le cas des systèmes pérennes. Ce constat soulève des questions concernant le type de saisie et la structuration des informations pour étudier de façon plus détaillée les trajectoires d'utilisation des pesticides sur de grands échantillons et pas seulement par des enquêtes.

Ainsi, la base de données est un support très riche et intéressant pour suivre les évolutions de performances au cours du processus de changement. En revanche, la base de données ne prend pas assez en compte la complexité et la spécificité des pratiques mises en œuvre dans les systèmes de pérennes comme la vigne.

2.2 Caractériser la dynamique de variables quantitatives et leurs co-variations

En plus de la prise en main et de la valorisation des données d'Agrosyst, nous avons l'enjeu dans cette thèse de prendre en compte les trajectoires de variables quantitatives. Nous avons posé l'hypothèse qu'entrer par les performances dans cette étude permettrait d'identifier plus facilement des leviers de réduction des produits phytosanitaires. Dans ce travail, nous avons effectivement validé cette hypothèse. Cependant pour étudier les trajectoires de pratiques et de performances prenant en compte les variables quantitatives disponibles dans la base de données, nous avons dû construire ou fortement adapter des méthodes d'analyses déjà existantes. Ces méthodes sont relativement limitées en nombre dans la littérature. L'enjeu était en fait de prendre en compte la variabilité interannuelle mais aussi la continuité d'années pour chaque système de culture. En effet, les trajectoires d'IFT ne sont pas linéaires du fait d'un fort effet année qui impacte la pression maladies et donc l'IFT (Mailly et al., 2017). De plus, la vigne est une culture pérenne. Nous avons donc dû trouver des méthodes prenant en compte la forte dépendance entre année sur un même système de système pour l'élaboration du rendement (Merot, 2022) ou pour le niveau d'inoculum primaire (Fermaud et al., 2016). Pour cela, plusieurs méthodes ont été explorées. La volonté de travailler sur la dynamique nous a aussi conduit à adopter des approches dépassant les comparaisons point initial – point final. Pour l'analyse de la dynamique, les approches de séries temporelles qui avaient été évoquées au départ de cette thèse ont rapidement été mises de côté du fait d'une très forte exigence sur la quantité de données. Pour toutes les analyses sur l'évolution d'une variable au cours du temps, nous avons opté finalement pour des modèles linéaires mixtes (Chapitre 3, Chapitre 5).

Ensuite, pour étudier plus finement les trajectoires individuelles des systèmes de culture, l'extraction de plusieurs variables à partir de la dynamique d'IFT a permis l'identification d'une typologie de trajectoires d'IFT. Grâce aux analyses des trajectoires type, nous avons pu étudier des groupes de systèmes de culture réparties sur l'ensemble du territoire et gagner en généricité (Teixeira et al., 2018). Ces résultats ont permis de mettre en perspective les résultats des enquêtes, sous-échantillon de la base de données qui est représentatif de la BDD. Il serait intéressant à ce stade de revenir aux données initiales sans typologie pour étudier de nouveau les leviers identifiés et valoriser l'information qui est perdue quand on réduit la diversité dans les approches de typologie. Une approche pourrait consister, comme Lechenet (2016), à s'appuyer sur une combinaison des méthodes (CART) et random forest pour différencier des types de systèmes de culture en fonction de leur utilisation de pesticides. Ces méthodes ont permis d'identifier des types de situations de production et de les lier avec des stratégies de gestion.

Le travail sur les processus de changement sur le temps long nous a aussi conduit à d'importants questionnements méthodologiques sur l'étude des dynamiques de performances. Nous avons fait le choix dans le chapitre 4, de décomposer les trajectoires d'IFT en plusieurs indicateurs pour rendre compte de la dynamique en adaptant la méthode de Martin et al. (2017). Cette décomposition de la trajectoire en indicateurs prend le risque de masquer un ou plusieurs aspects qui n'auraient pas été observés *a priori* (Dardonville, 2021).

Pour le chapitre 5, nous avons fait face à des difficultés pour trouver une méthode permettant d'identifier des co-variations entre performances de façon dynamique. Dans un premier temps, nous nous sommes tournées vers les méthodes en k-tableaux comme la méthode d'analyse triadique partielle (Chessel et al., 1996) qui permet de faire une analyse moyenne de plusieurs ACP sur les mêmes individus et variables. Cette méthode était sur le papier idéale mais gère mal les données manquantes. Or compte tenu de l'importance des données manquantes, il nous a été impossible de la mettre en œuvre. Le choix fait de travailler sur des pentes nous a permis par la suite de contourner le problème des données manquantes.

Il existe peu de méthodes qualifiant la dynamique des performances en tant que telle. Dans leur travaux plus récents, Dardonville et al. (2022) utilisent et comparent 3 approches différentes pour étudier les relations entre performances de façon dynamique. Les auteurs utilisent dans un premier temps la méthode de Martin et al. (2017) sur laquelle nous nous sommes appuyés mais aussi une méthode d'arbre de régression multivarié et de pareto ranking (deviant positif) en utilisant certains indicateurs dynamiques proposés par Martin et al. (2017).

Ces méthodes pourraient être également utilisées pour identifier des compromis entre performances. Une méthode qui nous semble intéressante est celle du classement de Pareto, utilisé pour identifier les agroécosystèmes déviants positifs présentant la meilleure combinaison de performances multiples (c'est-à-dire les agroécosystèmes exemplaires dans la réalisation de tous les objectifs) (Dardonville et al., 2022). L'utilisation de cette méthode pourrait servir de support d'échantillonnage d'enquêtes en identifiant des systèmes de culture à très bas niveau d'intrants qui maintiennent de bonnes performances économiques et agronomiques.

La revue faite par Soulé et al. (2021) sur les méthodes et cadres conceptuels utilisés pour évaluer la durabilité environnementale au sein des systèmes agricoles indiquent également des lacunes sur les méthodes dynamiques. Toutes ces études proposent des indicateurs statiques. Ainsi Soulé et al. (2021) font part de la nécessité de développer des évaluations multicritères dynamiques, pas seulement pour qualifier les dynamiques de productivité

ou de rentabilité, mais aussi sur d'autres indicateurs. Le manque de méthodes rendant compte de la dynamique représente un frein important pour réaliser des analyses sur le temps long que ce soit pour l'étude des trajectoires ou bien pour les travaux situés dans le cadre de la résilience et de la durabilité. Il y a donc un défi méthodologique pour intégrer au mieux les aspects dynamiques dans l'étude des performances sur le temps long.

2.3 Caractérisation des dynamiques de pratiques

Notre troisième question de recherche visait à identifier des trajectoires de pratiques au cours du temps. Nous avons dû adapter les cadres conceptuels et les méthodes aux systèmes viticoles et croiser des méthodes qui présentaient chacune des intérêts (phase de cohérence et cadre ESR par exemple). Sur les analyses dynamiques de pratiques culturales, nous avons aussi été confrontés à des questionnements méthodologiques pour caractériser les changements identifiés par enquêtes. Les pratiques ont été caractérisées à l'aide de différents cadres (ESR, cadre d'Aubertot et al. (2010), compartiments). Un premier enjeu de ce travail a été de combiner ces cadres conceptuels. Dans le chapitre 6, nous avons mis en place une méthode pour caractériser les combinaisons techniques en se basant sur les cadres d'analyses déjà existant : le cadre ESR (Hill and MacRae, 1996) et le cadre mis en place par Chantre and Cardona (2014) en recombinaut autrement la méthode. Les cadres conceptuels sont les mêmes que ceux utilisés par Chantre and Cardona (2014) mais dans notre cas le cadre ESR sert à identifier les changements de cohérence. Sur les combinaisons techniques, nous aurions pu aller plus finement dans l'identification de combinaisons en nous focalisant sur un ou deux groupes de pratiques. Les méthodes mises en place par de Tourdonnet et al. (2018) et Bakker et al. (2021) détaillent plus précisément une pratique, dans leur cas la gestion des sols. Les pratiques étudiées sont également replacées sur un gradient ESR. Cette méthode permet d'être plus précis sur les changements techniques mis en œuvre et permet d'étudier plus finement la diversité des trajectoires d'agriculteur·ice·s sans en définir de combinaisons techniques. En effet, le nombre de combinaisons techniques que nous avons observé est élevé ce qui complique l'analyse et la compréhension des résultats. Pour étudier les systèmes viticoles, nous avons choisi de travailler sur des grands leviers avec une volonté de généralité et ainsi éviter le fort effet bassin viticole.

Les données collectées par enquêtes n'ont pas encore été totalement exploitées. Les données de matériel, de parcellaire et de contexte nécessitent d'être travaillées. Ces méthodes permettront de préciser les étapes et suivies par les exploitations lors de leur transitions agroécologiques et d'approfondir la compréhension des processus de changements. Les méthodes et cadres conceptuel mobilisés au cours de ce travail de thèse se sont basés sur

ceux existants et déjà beaucoup mobilisés (cadre ESR, trajectoire de cohérence ...). Cette combinaison de méthodes nous a permis d'aborder les transitions de différentes manières.

3 Perspectives opérationnelles – Apport de cette thèse pour l'accompagnement des transitions

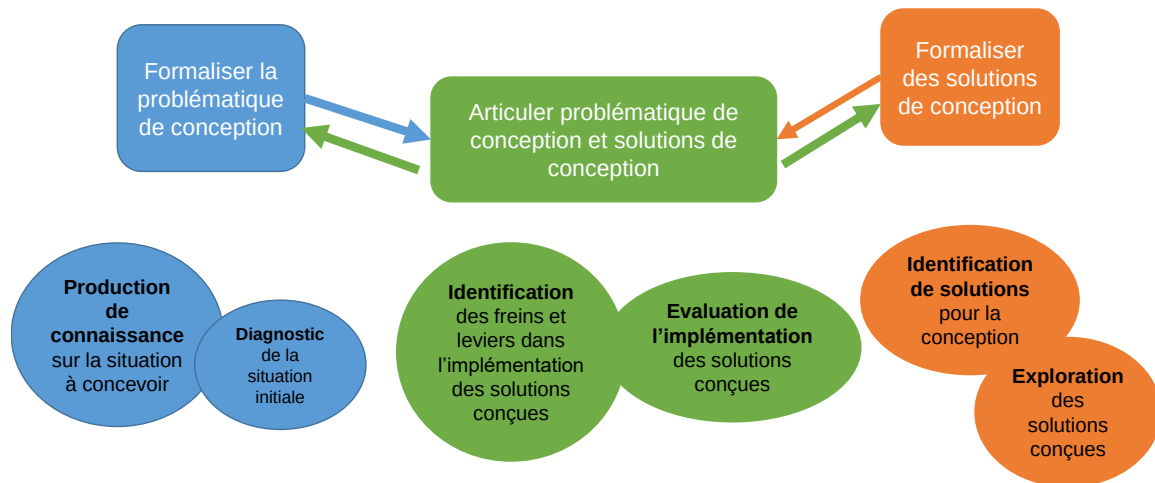


Figure 7.1 Les trois pôles de la conception définis par Prost (2019) et repris par Merot (2022)

3.1 Apport des connaissances produites pour alimenter le processus de conception

Cette thèse avait pour objectif d'apporter des connaissances sur les processus d'implémentation *ex post* mis en œuvre dans les exploitations viticoles par l'étude des trajectoires de performances et des changements de pratiques associés. Nos travaux se focalisaient sur le troisième pôle de la conception, l'articulation entre la problématique de conception et les solutions de conception, défini par Prost (2019) et plus particulièrement sur l'analyse de l'implémentation des solutions conçues (Figure 1). Nous avons pu identifier les leviers implémentés et leur dynamique au cours du processus de réduction de l'utilisation des pesticides. L'analyse montre que le chemin à suivre pour mettre en place les leviers est relativement générique. Il existe un « ordre » à suivre qui semble garantir la baisse des pesticides. Par ailleurs, il semblerait qu'une implémentation pas-à-pas soit favorable à une baisse des pesticides réussie. Suivre cette trajectoire d'implémentation des leviers en les introduisant petit à petit dans l'exploitation permet sûrement de dépasser les difficultés de mise en place.

Bien que l'identification des freins et des leviers est un point de ce pôle qui n'a

pas été explorée explicitement dans cette thèse, plusieurs indicateurs et données nous permettent de relever des situations « favorables » à une baisse importante de l'IFT. Par exemple, nous avons identifié des différences dans les motivations d'entrée au sein du réseau DEPHY qui pourraient avoir un impact sur l'intensité des changements mis en œuvre (affichage politique, volonté d'échanger avec un groupe de pairs, volonté de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires). De même, il semblerait que certains contextes d'exploitation (taille de l'exploitation, coopérateur versus indépendant) ou dynamiques de groupes réseau (dynamiques d'accompagnement) soient plus favorables aux changements. Dans la construction de la thèse, une deuxième série d'enquête était prévue, se focalisant plus particulièrement sur les processus de décision et le pilotage et les logiques agronomiques sous-jacentes aux changements de pratiques (Toffolini et al., 2017a). Des informations telles que les règles qui motivent le premier traitement ont été demandées mais pas assez explorées. Le nombre de traitements est inférieur lorsque les traitements sont déclenchés en fonction de la perception de l'agriculteur·ice que lorsqu'il·elle s'appuie sur l'avis d'un·e conseiller·ère·s (Mézière et al., 2009). Par ailleurs, la dimension organisationnelle du changement en lien avec le fonctionnement de l'exploitation n'a pas non plus été explorée comme nous l'aurions souhaité. Des ajustements dans l'organisation de l'exploitation ont été captés lors des enquêtes mais pas suffisamment analysés pour pouvoir conclure. Ces changements organisationnels, et par là même des blocages et freins d'organisation, ne sont pas accessibles à partir de la base de données mais leur analyse pourrait permettre de comprendre pourquoi les leviers de reconception sont si peu implémentés par les agriculteur·ice·s du réseau.

Dans tous les cas, les changements de pratiques pas-à-pas tels que mis en place dans les exploitations DEPHY conduisent à un apprentissage graduel de la complexité dans la conception de systèmes de cultures (Deffontaines et al., 2020) qui laisse supposer une plus grande stabilité des exploitations après changement (RMSE par type, finalement les types 3 ont des faibles RMSE autour de la pente).

Le changement pas-à-pas identifié dans cette thèse implique aussi des boucles de conception et des redéfinitions régulières des objectifs de conception (Meynard et al., 2012). La trajectoire de combinaisons techniques est sous-tendue par une trajectoire d'objectifs. De ce fait, nos résultats mettent en avant la nécessité de réadapter le diagnostic au cours de la trajectoire, notamment à chaque changement de phase de cohérence indiquant un changement d'objectifs de la conception. Les conseiller·ère·s, plus largement les accompagnateurs de la conversion, ont un rôle important à jouer dans la formalisation régulière de ces objectifs. Toffolini et al. (2017b) soulignent l'importance d'identifier la posture de 'réflexion-action' de l'agriculteur·ice. Cela permet d'accompagner l'agriculteur·ice dans la construction de « l'attitude de changement ». Pour accompagner au mieux les change-

ments de pratiques, il faudrait lier trajectoire de pratiques et trajectoire d'agriculteur·ice. En terme d'accompagnement, cela implique de mettre au centre de l'accompagnement, la trajectoire individuelle des viticulteur·ice liée à la trajectoire de pratiques mais aussi les indicateurs qu'il·elle mobilise et ainsi avoir une meilleure compréhension de la dynamique de construction des logiques d'action.

La définition de la conception à laquelle cette thèse se rattache en trois pôles d'activité met en avant l'interconnexion des pôles entre eux. Ainsi l'activité d'implémentation nourrit les deux autres pôles (solutions de conception et objectifs visés) (Figure 7.1). Les résultats acquis au cours de cette thèse permettent de tirer des leçons sur les deux autres pôles en plus des connaissances sur l'implémentation pas-à-pas.

3.1.1 Premier pôle : formalisation de la problématique de conception

Nos résultats sur l'importance du point initial dans le processus de réduction de l'utilisation des pesticides en terme de marge de manœuvre et de leviers mobilisables soulignent l'importance de la formalisation de la problématique de conception, premier pôle du processus et en particulier, du diagnostic de la situation initiale. Ainsi au-delà de l'explicitation de l'objectif visé, il paraît absolument nécessaire de réaliser un diagnostic initial. Dans le cas de conception vers des systèmes moins dépendants des pesticides, la caractérisation du niveau d'utilisation des pesticides et le positionnement de l'exploitation dans la trajectoire générique identifiée dans ce travail peut être mis en place pour donner à voir plus facilement sur le chemin à venir. Par ailleurs, le positionnement de l'exploitation par rapport à sa capacité à changer – l'exploitation est-elle en condition favorable pour changer ? – est nécessaire. Dans ce travail, nous n'avons que peu contribué sur la caractérisation de ces situations mais les résultats montrent que ces conditions existent en lien avec la gestion des ressources (main d'œuvre, équipements, SAU), le type de vinification (coopérateur ou cave particulière) ou encore la labellisation du vin (AOP, IGP...).

Dans nos travaux, nous avons peu exploré le lien entre changements de pratiques, intensité de changements et contexte de l'exploitation. Les données de contexte sont cependant nécessaires pour identifier les blocages et opportunités existantes au sein de l'exploitation. Les travaux récents de Liebert et al. (2022) formalisent que la taille de l'exploitation impacte l'intensité des changements. Ainsi, les changements associés à une reconception sont négativement corrélés à la taille de l'exploitation (Figure 7.2). Ce travail de diagnostic prenant en compte le contexte de l'exploitation et la situation initiale en terme d'utilisation des pesticides permet d'accompagner plus 'finement' l'agriculteur·ice dans son processus de réduction de l'utilisation des pesticides. Les solutions de conceptions

proposées seront plus adaptées au contexte de l'exploitation.

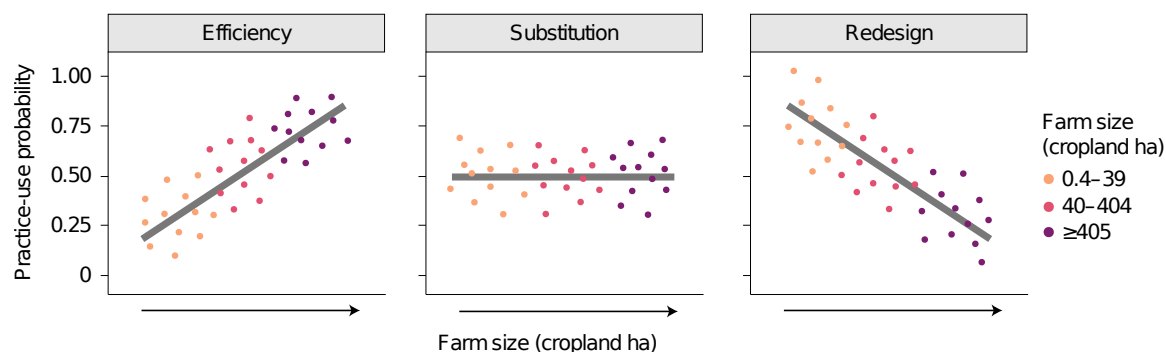


Figure 7.2 Corrélations attendues entre intensité de changement selon de cadre ESR (Hill and MacRae, 1996) d'après Liebert et al. (2022)

3.1.2 Deuxième pôle : formalisation de la problématique de conception

Le deuxième pôle du processus de conception, la formalisation des solutions de conception, comporte l'identification de solutions et l'exploration des solutions conçues. Le nombre de leviers existants pour réduire l'utilisation des pesticides en viticulture est élevé. L'analyse de la base de données et les enquêtes ont permis de noter que certains leviers étaient facilement mis en œuvre et ce quel que soit la région viticole et que leur combinaison était nécessaire. Ces leviers génériques permettent une réduction des pesticides importante et sans impact sur les rendements ou d'autres performances. Il est donc nécessaire de mieux faire connaître ces leviers et de communiquer sur leur impact sur les performances (IFT mais aussi rendement, temps de travail...) afin de susciter plus largement l'envie de les mettre en œuvre. Ainsi à minima, tous les projets de conception devraient pouvoir intégrer ces leviers génériques.

Cependant, les leviers plus systémiques restent nécessaires pour permettre d'aller plus loin en terme de réduction des pesticides. En effet des leviers plus complexes existent (pâturage, agroforesterie...). Ces systèmes innovants sont peu mis en œuvre et soulèvent de nouvelles questions scientifiques sur ces pratiques agroécologiques. Les connaissances sur ces systèmes manquent (Bosshardt et al., 2022). La situation sur ces leviers plus systémiques est complètement différente de celle sur les leviers génériques identifiés dans la thèse. Les connaissances scientifiques sur l'impact sur les processus de ces leviers ne sont pas suffisantes et encore plus sur l'impact sur les performances. Des études complémentaires sont nécessaires. L'étude des pratiques innovantes et des trajectoires d'exploitations 'vertueuses' (par une démarche de traque à l'innovation par exemple) pourrait permettre de mettre en lien trajectoire de fermes du système dominant (régime dominant) et trajectoire de fermes à très faible utilisation d'intrants (niches). Cela

pourrait permettre d'identifier des solutions innovantes et d'identifier des combinaisons techniques qui vont plus loin que celles que nous avons observées. L'étude des pratiques innovantes peut servir de moteur pour les activités de conception (Périnelle et al., 2021).

Ainsi, il est nécessaire de développer plus d'études intégrant des situations de reconception forte. Pour faciliter la transition des viticulteur·ice·s appartenant au régime dominant (DEPHY ou hors DEPHY) vers des systèmes à bas niveau d'intrant, plus de lien entre mode de conduite alternatif et conventionnel faciliterait le transfert d'information et de connaissances. Des travaux de traques aux innovations au sein d'exploitations viticoles mettant en place des pratiques innovantes pour gagner en connaissance et dépasser certains freins (Morel et al., 2020; Meynard et al., 2017).

Conclusion et Perspectives

Notre étude s'est intéressée à la transition vers une réduction des pesticides de viticulteur·ice·s engagé·e·s volontairement dans le réseau DEPHY. Ce travail de thèse propose de combiner analyse de base de données et enquêtes pour étudier les changements de pratiques et les évolutions des performances au cours du processus de réduction des pesticides. Notre démarche comprenait 4 étapes. Nous avons dans un premier temps identifié les tendances générales sur les dix années d'étude puis caractérisé les types de trajectoires d'utilisation des pesticides. Nous avons ensuite identifié si des co-variations existaient entre performances environnementales, sociotechniques et agronomiques avant d'analyser les trajectoires de pratiques au cours du temps.

Cette démarche a permis de montrer qu'une réduction des pesticides de 33% était possible sans impacter les performances agronomiques et sociotechniques. Aussi, nous avons montré que les trajectoires de réduction des produits phytosanitaires s'organisent progressivement entre période d'implémentation de changements et périodes d'adaptation. Parmi les leviers identifiés, la majorité relève de l'efficacité et de la substitution. L'étude des trajectoires de pratiques a permis l'identification d'une trajectoire générique conduisant à une réduction des pesticides, où le passage à l'Agriculture Biologique apparaît comme un point majeur.

Les méthodes mises en place pour décrire et évaluer les transitions vers des systèmes viticoles pérennes ne sont pas spécifiques et peuvent être mises en place pour d'autres systèmes de culture. La combinaison de sources de données, entre base de données et enquêtes est une démarche intéressante à articuler pour comprendre les processus de changements des agriculteur·ice·s et faire le lien entre échelle de la filière et échelle de l'exploitation. Il nous apparaît nécessaire de réaliser des enquêtes pour comprendre finement les processus de changements des agriculteur·ice·s et acquérir des données plus précises sur le contexte de l'exploitation.

Par ailleurs, la vigne est une culture pérenne et présente donc une inertie forte face aux changements. Les systèmes de culture viticoles sont difficilement transformables sur une période courte. La réduction des pesticides reste une problématique importante dans les systèmes viticoles. L'implémentation de leviers associés à de l'efficacité et de la substitution est une première étape, mais qui n'est pas suffisante. Nous avons identifié peu de leviers associés à de la reconception dans la dynamique de changement pas-à-pas des viticulteur·ice·s. Ces leviers sont pourtant jugés nécessaires pour réduire

durablement l'utilisation des pesticides. La mise en place de pratiques innovantes à une échelle supra-parcellaire (agroforesterie, pâturage...) présente encore de nombreux freins et les connaissances manquent. Ainsi, les perspectives de recherches sont nombreuses. La mise en place de leviers pose des questions d'accompagnement des viticulteur·ice·s au cours du processus de réduction mais nécessite également une meilleure compréhension de certaines pratiques agroécologiques.

Références bibliographiques

Bibliographie

- Ageste (2016). Pratiques culturales en viticulture 2013 Réduire la dose, une pratique répandue pour les traitements fongicides. [70](#)
- Alvarez, S., Timler, C. J., Michalscheck, M., Paas, W., Descheemaeker, K., Titttonell, P., and Groot, J. C. (2018). Capturing farm diversity with hypothesis-based typologies: An innovative methodological framework for farming system typology development. *PLoS ONE*, page 24. [100](#)
- Ansaloni, M. and Fouilleux, E. (2006). Changement de pratiques agricoles. Acteurs et modalités d'hybridation technique des exploitations laitières bretonnes. *Économie rurale*, (292):3–17, DOI: 10.4000/economierurale.695. [125](#)
- Aouadi, N., Aubertot, J., Caneill, J., and Munier-Jolain, N. (2015). Analyzing the impact of the farming context and environmental factors on cropping systems: A regional case study in Burgundy. *European Journal of Agronomy*, 66:21–29, DOI: 10.1016/j.eja.2015.02.006. [15](#)
- Aouadi, N., Macary, F., Delière, L., and Roby, J.-P. (2021). New Scenarios for a Shift towards Agroecology in Viticulture. *Agricultural Sciences*, 12(10):1003–1033, DOI: 10.4236/as.2021.1210065. [125](#)
- Aouadi, N., Macary, F., and Ugaglia, A. A. (2019). Evaluation des performances socio-économiques et environnementales de systèmes viticoles en bordelais par une méthode multicritère d'aide à la décision. Bordeaux, France. [133](#), [149](#), [150](#)
- Attoumani-Ronceux, A., Aubertot, J. N., Guichard, L., Jouy, L., Mischler, P., Omon, B., Petit, M.-S., Pleyber, , Reau, R., and Seiler, A. (2011). Guide pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires. Application aux systèmes de polyculture. [xiii](#), [12](#), [160](#)
- Aubertot, J. N., Barbier, J. M., Carpentier, A., Gril, J. J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., and Voltz, M. (2005). Pesticides, agriculture et environnement: réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Synthèse du rapport de l'expertise. Synthèse du rapport de l'expertise, IRSTAE, INRA. [1](#), [43](#), [69](#), [98](#), [159](#)
- Aubertot, J.-N., Guichard, L., Jouy, L., Mischler, P., Omon, B., Petit, M.-S., Pleyber,

- , Reau, R., Seiler, A., and Attoumani-Ronceux, A. (2010). Guide pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires. Technical report. [11](#), [14](#), [60](#), [160](#), [166](#), [172](#), [218](#)
- Aubry, C. and Michel-Dounias, I. (2006). Systèmes de culture et décisions techniques dans l'exploitation agricole. Chapitre 2. In Martin, P., Le Bail, M., Ney, B., Estrade, J.-R., and Doré, T., editors, *L'agronomie aujourd'hui*. Editions Quae, editions quae edition. [20](#)
- Aulagnier, A. (2021). Y a-t-il une alternative aux pesticides ? *La Vie des idées*. [181](#), [212](#)
- Aulagnier, A. and Goulet, F. (2017). Des technologies controversées et de leurs alternatives. Le cas des pesticides agricoles en France. *Sociologie du travail*, 59(3), DOI: 10.4000/sdt.840. [1](#), [132](#), [180](#), [212](#)
- Aveline, N. (2009). Réduction des intrants : quelles alternatives ? *IFV*, page 6. [11](#)
- Aveline, N., Samuel, R., and Fau, J.-B. (2009). Produits alternatifs et SDN pour protéger la vigne. page 164. *IFV*. [72](#)
- Bakker, T., Dugué, P., and de Tourdonnet, S. (2021). Assessing the effects of Farmer Field Schools on farmers' trajectories of change in practices. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(2):18, DOI: 10.1007/s13593-021-00667-2. [218](#)
- Baldi, I., Filleul, L., Mohammed-Brahim, B., Fabrigoule, C., Dartigues, J. F., Schwall, S., Drevet, J. P., Salamon, R., and Brochard, P. (2001). Neuropsychologic effects of long-term exposure to pesticides: results from the French Phytoner study. *Environmental Health Perspectives*, 109(8):839–844, DOI: 10.1289/ehp.01109839. [1](#), [70](#)
- Baldi, I., Lebailly, P., Rondeau, V., Bouchart, V., Blanc-Lapierre, A., Bouvier, G., Canal-Raffin, M., and Garrigou, A. (2012). Levels and determinants of pesticide exposure in operators involved in treatment of vineyards: results of the PESTEXPO Study. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 22(6):593–600, DOI: 10.1038/jes.2012.82. [1](#), [70](#)
- Barbier, C., Cerf, M., and Lusson, J.-M. (2015). Cours de vie d'agriculteurs allant vers l'économie en intrants : les plaisirs associés aux changements de pratiques. *Activités*, 12:28. [19](#)
- Barbier, J. M., Constant, N., Davidou, L., Deliere, L., Guisset, M., Jacquet, O., Lafond, D., Panon, M.-L., and Sauvage, D. (2011). CEPviti: co-conception de systèmes viticoles économes en produits phytosanitaires. Rapport technique. [41](#), [215](#)
- Barbier, M. and Elzen, B. (2012). System Innovations, Knowledge Regimes, and Design Practices towards Transitions for Sustainable Agriculture. Technical report, INRA, Paris. [7](#)
- Barbier, M. and Lemery, B. (2000). “Learning” through Processes of Change in

- Agriculture: a methodological Framework. In *Knowing and Learning for Change in Agriculture: Case Studies from Industrialised Countries*, pages 381–393. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, m. cerf, d. gibbon, b. hubert, r. ison, j. jiggins, m. paine, j. proost, n. röling edition. 19, 89, 99
- Barzman, M. and Dachbrodt-Saaydeh, S. (2011). Comparative analysis of pesticide action plans in five European countries. *Pest Management Science*, page 6, DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.2283>. 73, 98
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., and Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67:1–48, DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>. 78
- Baxter, R. (2009). Reflective and formative metrics of relationship value: A commentary essay. *Journal of Business Research*, 62(12):1370–1377, DOI: 10.1016/j.jbusres.2008.12.004. 140
- Bellon, S., Bockstaller, C., Fauriel, J., Geniaux, G., and Lamine, C. (2007). To design or to redesign : how indicators contribute. In *an international symposium on methodologies for integrated analysis of farm production systems*, Catania, Italy. 20
- Belmin, R., Malézieux, E., Basset-Mens, C., Martin, T., Mottes, C., Della Rossa, P., Vayssières, J.-F., and Le Bellec, F. (2022). Designing agroecological systems across scales: a new analytical framework. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1):3, DOI: 10.1007/s13593-021-00741-9. 7
- Bergez, J., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., and Sadok, W. (2010). Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy*, 32(1):3–9, DOI: 10.1016/j.eja.2009.06.001. 8
- Berthet, E. (2014). *Contribution à une théorie de la conception des agro-écosystèmes: Fonds écologique et inconnu commun*. Sciences de Gestion, Mines Paris Tech. 8
- Blackmore, C., Cerf, M., Ison, R., and Paine, M. (2012). The role of action-oriented learning theories for change in agriculture and rural networks. In Darnhofer, I., Gibbon, D., and Dedieu, B., editors, *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Springer Netherlands, Dordrecht. 23
- Blesh, J. and Wolf, S. A. (2014). Transitions to agroecological farming systems in the Mississippi River Basin: toward an integrated socioecological analysis. *Agriculture and Human Values*, 31(4):621–635, DOI: 10.1007/s10460-014-9517-3. 125
- Bleyer, G., Kassemeyer, H., Breuer, M., Krause, R., Viret, O., Dubuis, P., Frabre, A., Bloesch, B., Siegfried, W., Naef, A., and Huber, M. (2011). “VitiMeteo” a future oriented forecasting system for viticulture. *Bull. IOBC/WPRS*, (67):69–77. 71
- Bliss, K., Padel, S., Cullen, B., Ducottet, C., Mullender, S., Rasmussen, I. A., and

- Moeskops, B. (2019). Exchanging knowledge to improve organic arable farming: an evaluation of knowledge exchange tools with farmer groups across Europe. *Organic Agriculture*, 9(4):383–398, DOI: 10.1007/s13165-018-0238-6. [19](#)
- Bonke, V., Michels, M., and Musshoff, O. (2021). Will Farmers Accept Lower Gross Margins for the Sustainable Cultivation Method of Mixed Cropping? First Insights from Germany. *Sustainability*, 13(4):1631, DOI: 10.3390/su13041631. [92](#)
- Bony, S., Gillet, C., Bouchez, A., Margoum, C., and Devaux, A. (2008). Genotoxic pressure of vineyard pesticides in fish: Field and mesocosm surveys. *Aquatic Toxicology*, 89(3):197–203, DOI: 10.1016/j.aquatox.2008.06.017. [1](#), [70](#)
- Bosshardt, S., Sabatier, R., Dufils, A., and Navarrete, M. (2022). Changing perspectives on chicken-pastured orchards for action: A review based on a heuristic model. *Agricultural Systems*, 196:103335, DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103335. [222](#)
- Boulanger-Fassier, S. (2008). La viticulture durable, une démarche en faveur de la pérennisation des territoires viticoles français ? *Géocarrefour*, 2008(83):181–190, DOI: 10.4000/geocarrefour.6856. [92](#)
- Boulestreau, Y., Casagrande, M., and Navarrete, M. (2021). Analyzing barriers and levers for practice change: a new framework applied to vegetables’ soil pest management. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(3):44, DOI: 10.1007/s13593-021-00700-4. [13](#)
- Bourguet, D. and Guillemaud, T. (2016). The Hidden and External Costs of Pesticide Use. In Lichtfouse, E., editor, *Sustainable Agriculture Reviews*, volume 19, pages 35–120. Springer International Publishing, Cham, DOI: 10.1007/978-3-319-26777-7_2. Series Title: Sustainable Agriculture Reviews. [1](#), [149](#)
- Bouttes, M., San Cristobal, M., and Martin, G. (2018). Vulnerability to climatic and economic variability is mainly driven by farmers’ practices on French organic dairy farms. *European Journal of Agronomy*, 94:89–97, DOI: 10.1016/j.eja.2018.01.013. [26](#), [104](#)
- Brunet, N., Guichard, L., Omon, B., Pingault, N., Pleyber, , and Seiler, A. (2008). L’indicateur de fréquence de traitements (IFT) : un indicateur pour une utilisation durable des pesticides. [76](#), [102](#)
- Brédart, D. and Stassart, P. M. (2017). When farmers learn through dialog with their practices: A proposal for a theory of action for agricultural trajectories. *Journal of Rural Studies*, 53:1–13, DOI: 10.1016/j.jrurstud.2017.04.009. [99](#)
- Béguin, P. and Darse, F. (1998). Le travail des concepteurs et la conception du travail. Université de Toulouse le Mirail. [9](#)
- Caffi, T., Legler, S. E., Rossi, V., and Bugiani, R. (2012). Evaluation of a Warning System

- for Early-Season Control of Grapevine Powdery Mildew. *Plant Disease*, 96(1):104–110, DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-11-0484>. 71
- Capillon, A. (1993). *Typologie des exploitations agricoles. Contribution à l'étude régionale des problèmes techniques*. PhD thesis, Ina - PG, Paris. 25
- Capillon, A. and Manichon, H. (1978). La typologie des exploitations agricoles : un outil pour le conseil technique. In Boiffin, J. and Sébillotte, M., editors, *Exigences nouvelles pour l'agriculture : les systèmes de culture pourront-ils s'adapter?*, pages 449–464. Chaire d'Agronomie, Paris. 25
- Caquet, T., Gascuel, C., Tixier-Boichard, M., Dedieu, B., Détang-Dessendre, C., Dupraz, P., Favardin, P., Hazard, L., Hinsinger, P., Lescourret, F., Litrico, I., Médale, F., Monod, H., Petit, S., Reboud, X., Roques, L., Thomas, A., Soussana, J.-F., and Vries, H. d. (2020). *L'agroécologie: des recherches pour la transition des filières et des territoires*. Edition Quae, edition quae edition. OCLC: 1143644034. 22
- Carbonneau, A., Torregrosa, L., Deloire, A., Pellegrino, A., Romieu, C., Ojeda, H., Jaillaird, B., Metay, A., and Abbal, P. (2020). *Traité de la vigne*. Dunod, 3ème edition. 41, 42, 43
- Carisse, O., Bacon, R., Lefebvre, A., and Lessard, K. (2009). A degree-day model to initiate fungicide spray programs for management of grape powdery mildew [*Erysiphe necator*]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, page 10, DOI: <https://doi.org/10.1080/07060660909507592>. 71
- Catalogna, M. (2018). *Expérimentations de pratiques agroécologiques réalisées par des agriculteurs: proposition d'un cadre d'analyse à partir du cas des grandes cultures et du maraîchage diversifié dans le département de la Drôme*. PhD thesis, Université d'Avignon. 28, 150
- Celette, F., Findeling, A., and Gary, C. (2009). Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system: The case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy*, 30(1):41–51, DOI: 10.1016/j.eja.2008.07.003. 72, 159
- Celette, F. and Gary, C. (2013). Dynamics of water and nitrogen stress along the grapevine cycle as affected by cover cropping. *European Journal of Agronomy*, 45:142–152, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.10.001>. 72, 135, 148, 159
- Cerdà, A., Daliakopoulos, I. N., Terol, E., Novara, A., Fatahi, Y., Moradi, E., Salvati, L., and Pulido, M. (2021). Long-term monitoring of soil bulk density and erosion rates in two *Prunus Persica* (L) plantations under flood irrigation and glyphosate herbicide treatment in La Ribera district, Spain. *Journal of Environmental Management*, 282:111965, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111965. 70

- Cerf, M., Omon, B., Chantre, E., Guillot, M., Bail, M. L., Lamine, C., and Olry, P. (2010). Vers des systèmes économes en intrants: quelles trajectoires et quel accompagnement pour les producteurs en grandes cultures. *Innovations Agronomiques*, 8:105–119. [92](#), [99](#), [125](#), [210](#)
- Chantre, E. (2014). *Apprentissages des agriculteurs vers la réduction d'intrants en grandes cultures: Cas de la Champagne Berrichonne de l'Indre dans les années 1985-2010*. Sciences agricoles, AgroParisTech - Ecole doctorale ABIES. [27](#), [125](#), [140](#)
- Chantre, E. and 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, DOI: 10.1080/21683565.2013.876483. [22](#), [23](#), [28](#), [32](#), [61](#), [98](#), [150](#), [183](#), [208](#), [218](#)
- Chantre, E., Cerf, M., and Le Bail, M. (2015). Transitional pathways towards input reduction on French field crop farms. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 13(1):69–86, DOI: 10.1080/14735903.2014.945316. [28](#), [29](#), [30](#), [61](#), [99](#), [125](#), [160](#), [161](#)
- Chen, M., Brun, F., Raynal, M., and Makowski, D. (2019). Timing of Grape Downy Mildew Onset in Bordeaux Vineyards. *Phytopathology®*, 109(5):787–795, DOI: 10.1094/PHYTO-12-17-0412-R. [71](#), [74](#), [89](#)
- Chen, M., Brun, F., Raynal, M., and Makowski, D. (2020). Delaying the first grapevine fungicide application reduces exposure on operators by half. *nature research*, page 13, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62954-4>. [12](#), [71](#), [72](#), [89](#)
- Chessel, D., Simier, M., and Hanafi, M. (1996). STATIS et Co-inertie. Analyses multivariées et expression graphique des données environnementales(5 , Université Lyon 1):41. [217](#)
- Chizallet, M., Prost, L., and Barcellini, F. (2019). Comprendre l'activité de conception d'agriculteurs en transition agroécologique : vers un modèle trilogique de la conception. *Psychologie Française*, 64(2):119–139, DOI: 10.1016/j.psfr.2019.03.001. [9](#)
- Chèze, B., David, M., and Martinet, V. (2020). Understanding farmers' reluctance to reduce pesticide use: A choice experiment. *Ecological Economics*, 167:106349, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2019.06.004. [16](#), [134](#), [151](#)
- Coll, P., Le Cadre, E., Blanchart, E., Hinsinger, P., and Villenave, C. (2011). Organic viticulture and soil quality: A long-term study in Southern France. *Applied Soil Ecology*, page 8, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.013>. [69](#)
- Compagnone, C. (2004). Agriculture raisonnée et dynamique de changement en viticulture bourguignonne. *Recherches Sociologiques*, page 20. [19](#), [212](#)
- Compagnone, C. (2014). Les viticulteurs bourguignons et le respect de l'environnement:

- Réseaux de dialogues professionnels et dynamiques de changement. *Revue française de sociologie*, Vol. 55(2):319–358, DOI: 10.3917/rfs.552.0319. [19](#)
- Compagnone, C., Lamine, C., and Dupré, L. (2018). La production et la circulation des connaissances en agriculture interrogées par l’agro-écologie: De l’ancien et du nouveau. *Revue d’anthropologie des connaissances*, 12,2(2):111, DOI: 10.3917/rac.039.0111. [212](#)
- Coquil, X., Béguin, P., Lusson, J. M., and Dedieu (2014). Transitions vers des systèmes plus autonomes : les ressources de la construction de l’expérience des agriculteurs. INRA - Versailles. [30](#), [125](#)
- Cordeau, S., Triolet, M., Wayman, S., Steinberg, C., and Guillemain, J.-P. (2016). Bioherbicides: Dead in the water? A review of the existing products for integrated weed management. *Crop Protection*, 87:44–49, DOI: 10.1016/j.cropro.2016.04.016. [72](#)
- Cortez-Arriola, J., Rossing, W. A., Massiotti, R. D. A., Scholberg, J. M., Groot, J. C., and Tiftonell, P. (2015). Leverages for on-farm innovation from farm typologies? An illustration for family-based dairy farms in north-west Michoacán, Mexico. *Agricultural Systems*, 135:66–76, DOI: 10.1016/j.agsy.2014.12.005. [100](#)
- Coux, N., Magne, M.-A., and Hazard, L. (2022). PSDR4 ATARI - Accompagner la transition agroécologique des systèmes d’élevage : quelques enseignements sur l’évolution des contenus et modalités d’intervention auprès des éleveurs. *Innovations Agronomiques*, pages 263–277. [209](#)
- Coulon, T., Hugueniot, F., Raynal, M., and Sentenac, G. (2007). Production Intégrée en viticulture sur un réseau de fermes de référence: étude de faisabilité et identification des freins à la démarche. *Innovations Agronomiques*, page 11. [17](#)
- Crisan, M. (2019). Pratiques culturales en grandes cultures 2017 - IFT et nombre de traitements. *Agreste Chiffres et Données*. [101](#), [132](#), [159](#)
- Dardonville, M., Bockstaller, C., and Therond, O. (2020). Review of quantitative evaluations of the resilience, vulnerability, robustness and adaptive capacity of temperate agricultural systems. *Journal of Cleaner Production*, page 125456, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125456. [150](#)
- Dardonville, M., Bockstaller, C., Villerd, J., and Therond, O. (2022). Resilience of agricultural systems: biodiversity-based systems are stable, while intensified ones are resistant and high-yielding. *Agricultural Systems*, 197:103365, DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103365. [150](#), [217](#)
- Darnhofer, I. (2014). Resilience and why it matters for farm management. *European Review of Agricultural Economics*, 41(3):461–484, DOI: 10.1093/erae/jbu012. [22](#)
- Darnhofer, I. (2021). Resilience or how do we enable agricultural systems to

- ride the waves of unexpected change? *Agricultural Systems*, 187:102997, DOI: 10.1016/j.agsy.2020.102997. [21](#)
- Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., and Milestad, R. (2008). Adaptive farming systems – A position paper. In *S 3: Adaptive farming systems*, page 13, Clermont-Ferranf. [21](#)
- Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., and Milestad, R. (2010a). Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3):545–555, DOI: 10.1051/agro/2009053. [15](#), [100](#)
- Darnhofer, I., Fairweather, J., and Moller, H. (2010b). Assessing a farm’s sustainability: insights from resilience thinking. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8(3):186–198, DOI: 10.3763/ijas.2010.0480. [21](#)
- Darré, J.-P. (1985). la Parole et la technique. L’univers de pensée des éleveurs du Ternois. *Sociologie du travail*, page 4. [125](#)
- Davy, A., Raynal, M., Vergnes, M., Debord, C., Codis, S., Naud, O., Deliere, L., Davidou, L., Fermaud, M., Roudet, J., Metral, R., Bouisson, Y., Guilbault, P., Dupin, S., Genevet, B., Mahieux, V., Baron, M., and Perot, S. (2020). Decitrait®: un OAD pour la protection de la vigne. *Innovations Agronomiques*, 79:89–99, DOI: 10.15454/7fk8-gt23. [12](#), [71](#)
- de Ponti, T., Rijk, B., and van Ittersum, M. K. (2012). The crop yield gap between organic and conventional agriculture. *Agricultural Systems*, 108:1–9, DOI: 10.1016/j.agsy.2011.12.004. [147](#)
- de Tourdonnet, S., Barbier, J. M., Courty, S., Martel, P., and Lucas, V. (2018). How can collective organization and the search for autonomy lead to an agroecological transition? The example of farm machinery cooperatives in France. page 9. [218](#)
- de Tourdonnet, S., Brives, H., Denis, M., Omon, B., and Thomas, F. (2015). Accompagner le changement en agriculture: du non labour à l’agriculture de conservation. *Agronomie, Environnement and Sociétés*, page 15. [125](#)
- Debaeke, P., Aubertot, J.-N., Bardy, M., Bertuzzi, P., Constantin, J., Durand, P., Guichard, L., Mignolet, C., Munier-Jolain, N., Therond, O., Wigneron, J.-P., Ballot, R., Cellier, P., Justes, E., Huard, F., Le Bas, C., and Richard, G. (2022). Availability and Integration of Agro-Environmental Data: The French Case. In Rizzo, D., Marraccini, E., and Lardon, S., editors, *Landscape Agronomy*, pages 63–111. Springer International Publishing, Cham, DOI: 10.1007/978-3-031-05263-7_3. [213](#)
- Deffontaines, L., Mottes, C., Della Rossa, P., Lesueur-Jannoyer, M., Cattan, P., and Le Bail, M. (2020). How farmers learn to change their weed management practices: Simple changes lead to system redesign in the French West Indies. *Agricultural Systems*, 179:102769, DOI: 10.1016/j.agsy.2019.102769. [8](#), [9](#), [15](#), [73](#), [89](#), [92](#), [100](#), [210](#), [220](#)

- Deguine, J.-P., Aubertot, J.-N., Flor, R. J., Lescourret, F., Wyckhuys, K. A., and Ratnadass, A. (2021). Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(3):38, DOI: 10.1007/s13593-021-00689-w. [3](#)
- Delecourt, E., Joannon, A., and Meynard, J.-M. (2019). Work-related information needed by farmers for changing to sustainable cropping practices. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2):28, DOI: 10.1007/s13593-019-0571-5. [17](#), [133](#), [150](#)
- Deliere, L., Cartolaro, P., Goutouly, J.-P., Barbier, J. M., Bonicel, L., Forget, D., Leroy, P., Naud, O., Ugaglia, A., Del’Homme, C., Davy, A. L., Davidou, L., Guilbault, P., Guisset, M., and Guillois, F. (2013). Conception et transfert de systèmes décisionnels pour la réduction des traitements en viticulture: le projet SyDéréT. *Innovations Agronomiques*, 28:155–168. [8](#), [46](#), [71](#)
- Deliere, L., Rougier, M., Emonet, E., Pillet, E., Burgun, X., Lafond, D., Mahé, H., Metral, R., Serrano, E., and Thiollet-Scholtus, M. (2016). Réseau DEPHY EXPE: Synthèse des résultats à mi-parcours à l’échelle nationale - filière Viticulture. Rapport technique, Cellule d’Animation Nationale DEPHY Ecophyto. [74](#)
- Delière, L., Cartolaro, P., Léger, B., and Naud, O. (2015). Field evaluation of an expertise-based formal decision system for fungicide management of grapevine downy and powdery mildews: Decision system for management of grapevine mildews. *Pest Management Science*, 71(9):1247–1257, DOI: 10.1002/ps.3917. [71](#), [89](#)
- Delière, L., Guimier, S., Petitgenet, M., Goutouly, J., Vergnes, M., Dupin, S., Davidou, L., Christen, M., Rochas, A., and Guilbault, P. (2018). Projet EcoViti Aquitaine : performances de systèmes viticoles à faible niveau d’intrants phytopharmaceutiques dans le vignoble bordelais. *Innovations Agronomiques* 70, 37-54. *Innovations Agronomiques*, DOI: 10.15454/3WLRXP. Publisher: INRA. [9](#), [73](#)
- Delpuech, X. and Carra, M. (2016). Adapter le parc matériel pour traiter plus précisément. *PHYTOMA*, (698):24–27. [12](#), [72](#)
- Delpuech, X. and Metay, A. (2018). Adapting cover crop soil coverage to soil depth to limit competition for water in a Mediterranean vineyard. *European Journal of Agronomy*, 97:60–69, DOI: 10.1016/j.eja.2018.04.013. [148](#)
- Duhamel, S., Cerf, M., and Olry, P. (2017). Analyser son travail et faire face à des situations complexes. page 11. [210](#)
- Dumont, A. M. and Baret, P. V. (2017). Why working conditions are a key issue of sustainability in agriculture? A comparison between agroecological, organic and conventional vegetable systems. *Journal of Rural Studies*, 56:53–64, DOI: 10.1016/j.jrurstud.2017.07.007. [150](#)

- Dupré, M., Michels, T., and Le Gal, P.-Y. (2017). Diverse dynamics in agroecological transitions on fruit tree farms. *European Journal of Agronomy*, 90:23–33, DOI: 10.1016/j.eja.2017.07.002. [28](#), [29](#), [99](#), [161](#), [208](#)
- Duru, M., Therond, O., and Fares, M. (2015). Designing agroecological transitions; A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4):1237–1257, DOI: 10.1007/s13593-015-0318-x. [2](#), [180](#)
- Duval, J., Blanchonnet, A., and Hostiou, N. (2021). How agroecological farming practices reshape cattle farmers’ working conditions. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 45(10):1480–1499, DOI: 10.1080/21683565.2021.1957062. [17](#), [28](#), [150](#)
- Ecophyto (2019). Méthodologie de calcul du NODU (Nombre de doses unités). [90](#)
- Falconnier, G. N., Descheemaeker, K., Van Mourik, T. A., Sanogo, O. M., and Giller, K. E. (2015). Understanding farm trajectories and development pathways: Two decades of change in southern Mali. *Agricultural Systems*, 139:210–222, DOI: 10.1016/j.agsy.2015.07.005. [25](#)
- Fermaud, M., Smits, N., Merot, A., Roudet, J., Thiéry, D., Wery, J., and Delbac, L. (2016). New multipest damage indicator to assess protection strategies in grapevine cropping systems: An indicator of multipest damage in grapevine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22(3):450–461, DOI: 10.1111/ajgw.12238. [16](#), [43](#), [70](#), [101](#), [132](#), [148](#), [159](#), [216](#)
- Finger, R. and Möhring, N. (2022). The adoption of pesticide-free wheat production and farmers’ perceptions of its environmental and health effects. *Ecological Economics*, 198:107463, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2022.107463. [19](#)
- Fouillet, E., Delière, L., Chartier, N., Munier-Jolain, N., Cortel, S., Rapidel, B., and Merot, A. (2022). Reducing pesticide use in vineyards. Evidence from the analysis of the French DEPHY network. *European Journal of Agronomy*, 136:126503, DOI: 10.1016/j.eja.2022.126503. [100](#), [102](#), [103](#), [105](#), [122](#), [123](#), [126](#), [132](#), [135](#), [136](#), [141](#), [147](#), [148](#), [151](#), [162](#), [180](#), [199](#)
- Gadoury, D. M., Seem, R. C., Pearson, R. C., Wilcox, W. F., and Dunst, R. M. (2001). Effects of Powdery Mildew on Vine Growth, Yield, and Quality of Concord Grapes. *Plant Disease*, 85(2):137–140, DOI: 10.1094/PDIS.2001.85.2.137. [17](#)
- Garcia, L., Celette, F., Gary, C., Ripoche, A., Valdés-Gómez, H., and Metay, A. (2018). Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 251:158–170, DOI: 10.1016/j.agee.2017.09.030. [43](#), [72](#), [125](#)
- García-Martínez, A., Olaizola, A., and Bernués, A. (2009). Trajectories of evolution and drivers of change in European mountain cattle farming systems. *animal*, 3(1):152–165,

- DOI: 10.1017/S1751731108003297. [25](#), [99](#)
- Gaviglio, C. (2021). L'épamprage de la vigne. [42](#)
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8-9):1257–1274, DOI: 10.1016/S0048-7333(02)00062-8. [21](#)
- Geels, F. W. and Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36(3):399–417, DOI: 10.1016/j.respol.2007.01.003. [21](#), [22](#)
- Gil, E., Llorens, J., Landers, A., Llop, J., and Giralt, L. (2011). Field validation of dosaviña, a decision support system to determine the optimal volume rate for pesticide application in vineyards. *European Journal of Agronomy*, 35(1):33–46, DOI: 10.1016/j.eja.2011.03.005. [71](#)
- Giraud, T. and Lambert, N. (2017). Reproducible cartography. In Peterson, M., editor, *Advances in Cartography and GIScience. ICACI 2017. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography.*, pages 173–183, Cham, Switzerland. Springer, DOI: 10.1007/978-3-319-57336-6_13. [78](#)
- Gliessman, S. (2016). Transforming food systems with agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(3):187–189, DOI: 10.1080/21683565.2015.1130765. [160](#)
- Gonthier, L. (2021). L'enherbement permanent. [42](#)
- Goulet, F., Pervanchon, F., Conteau, C., and Cerf, M. (2008). Les agriculteurs innovent par eux-mêmes pour leurs systèmes de culture:. In *Systèmes de culture innovants et durables*, pages 53–69. Éducagri éditions, DOI: 10.3917/edagri.reau.2008.01.0053. [9](#), [10](#), [19](#)
- Grace, J. B., Anderson, T. M., Seabloom, E. W., Borer, E. T., Adler, P. B., Harpole, W. S., Hautier, Y., Hillebrand, H., Lind, E. M., Pärtel, M., Bakker, J. D., Buckley, Y. M., Crawley, M. J., Damschen, E. I., Davies, K. F., Fay, P. A., Firn, J., Gruner, D. S., Hector, A., Knops, J. M. H., MacDougall, A. S., Melbourne, B. A., Morgan, J. W., Orrock, J. L., Prober, S. M., and Smith, M. D. (2016). Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness. *Nature*, 529(7586):390–393, DOI: 10.1038/nature16524. [141](#)
- Gramaje, D., Úrbez Torres, J. R., and Sosnowski, M. R. (2018). Managing Grapevine Trunk Diseases With Respect to Etiology and Epidemiology: Current Strategies and Future Prospects. *Plant Disease*, 102(1):12–39, DOI: 10.1094/PDIS-04-17-0512-FE. [91](#)
- Guichard, L. (2010). Caractérisation des pratiques de protection des cultures et de leur évolution : Méthodologie de diagnostic et propositions visant à améliorer l'impact

- environnemental des systèmes de culture et d'élevage. Technical report, Rapport d'étude, INRA/AgroParisTech. [91](#)
- Guichard, L., Dedieu, F., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Reau, R., and Savini, I. (2017). Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France : décryptage d'un échec et raisons d'espérer. *Cahiers Agricultures*, 26(1):14002, DOI: 10.1051/cagri/2017004. [3](#), [15](#), [50](#), [125](#), [151](#), [160](#), [180](#), [181](#), [206](#), [212](#), [214](#)
- Hill, S. B. (2014). Considerations for Enabling the Ecological Redesign of Organic and Conventional Agriculture: A Social Ecology and Psychosocial Perspective. Chapitre 22. In Bellon, S. and Penvern, S., editors, *Organic farming, Prototype for Sustainable Agricultures*, pages 401–422. [211](#), [212](#)
- Hill, S. B. and MacRae, R. J. (1996). Conceptual Framework for the Transition from Conventional to Sustainable Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 7(1):81–87, DOI: 10.1300/J064v07n01_07. [13](#), [27](#), [32](#), [61](#), [70](#), [89](#), [90](#), [99](#), [108](#), [121](#), [132](#), [160](#), [183](#), [211](#), [218](#), [222](#)
- Hossard, L., Guichard, L., Pelosi, C., and Makowski, D. (2017). Lack of evidence for a decrease in synthetic pesticide use on the main arable crops in France. *Science of The Total Environment*, 575:152–161, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.008. [3](#), [15](#), [45](#), [160](#)
- Jacquet, F., Butault, J.-P., and Guichard, L. (2011). An economic analysis of the possibility of reducing pesticides in French field crops. *Ecological Economics*, 70(9):1638–1648, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2011.04.003. [2](#), [207](#)
- Jacquet, F., Delame, N., Vita, J. L., Huyghe, C., and Reboud, X. (2021). The micro-economic impacts of a ban on glyphosate and its replacement with mechanical weeding in French vineyards. *Crop Protection*, 150:105778, DOI: 10.1016/j.cropro.2021.105778. [149](#)
- Jacquet, F., Delame, N., Vita, J. L., Reboud, X., and Huyghe, C. (2019). Alternatives au glyphosate en viticulture. Evaluation économique des pratiques de désherbage. Expertise, INRAE. [17](#), [72](#), [91](#), [92](#), [106](#), [125](#), [133](#), [148](#)
- Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Jouan, J., Le Cadre, E., Litrico, I., Malausa, T., Reboud, X., and Huyghe, C. (2022). Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1):8, DOI: 10.1007/s13593-021-00742-8. [125](#), [133](#), [150](#), [180](#)
- Jacquet, F. and Jouan, J. (2022). Pourquoi faut-il changer de stratégie dans la protection des cultures ? Chapitre 3. In *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Synthèses. Quae, Versailles Cedex. [133](#)
- Jermini, M., Blaise, P., and Gessler, C. (2010). Quantitative effect of leaf damage

- caused by downy mildew (*Plasmopara viticola*) on growth and yield quality of grapevine 'Merlot' (*Vitis vinifera*). *Journal of Grapevine Research*, page 10, DOI: <https://doi.org/10.5073/vitis.2010.49.77-85>. [1](#), [17](#), [70](#)
- Jeuffroy, M.-H., Ballot, R., Mérot, A., Meynard, J. M., and Simon, S. (2022). Des systèmes de culture agroécologiques pour diminuer l'usage des pesticides. Chapitre 3. In *Zéro pesticide : Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Synthèses. Edition Quae, Versailles Cedex. [7](#), [13](#), [15](#), [100](#), [124](#), [132](#)
- Karimi, B., Cahurel, J.-Y., Gontier, L., Charlier, L., Chovelon, M., Mahé, H., and Ranjard, L. (2020). A meta-analysis of the ecotoxicological impact of viticultural practices on soil biodiversity. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6):1947–1966, DOI: [10.1007/s10311-020-01050-5](https://doi.org/10.1007/s10311-020-01050-5). [124](#)
- Keesstra, S., Rodrigo-Comino, J., Novara, A., Giménez-Morera, A., Pulido, M., Di Prima, S., and Cerdà, A. (2019). Straw mulch as a sustainable solution to decrease runoff and erosion in glyphosate-treated clementine plantations in Eastern Spain. An assessment using rainfall simulation experiments. *CATENA*, 174:95–103, DOI: [10.1016/j.catena.2018.11.007](https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.007). [70](#)
- Klapwijk, C., van Wijk, M., Rosenstock, T., van Asten, P., Thornton, P., and Giller, K. (2014). Analysis of trade-offs in agricultural systems: current status and way forward. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6:110–115, DOI: [10.1016/j.cosust.2013.11.012](https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.012). [133](#)
- Kudsk, P., Jørgensen, L. N., and Ørum, J. E. (2018). Pesticide Load—A new Danish pesticide risk indicator with multiple applications. *Land Use Policy*, 70:384–393, DOI: [10.1016/j.landusepol.2017.11.010](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.010). [151](#)
- Kuflík, T., Prodorutti, D., Frizzi, A., Gafni, Y., Simon, S., and Pertot, I. (2009). Optimization of copper treatments in organic viticulture by using a web-based decision support system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1):36–43, DOI: [10.1016/j.compag.2009.04.008](https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.04.008). [71](#)
- Köbrich, C., Rehman, T., and Khan, M. (2003). Typification of farming systems for constructing representative farm models: two illustrations of the application of multivariate analyses in Chile and Pakistan. *Agricultural Systems*, 76(1):141–157, DOI: [10.1016/S0308-521X\(02\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00013-6). [100](#)
- Lamanda, N., Roux, S., Delmotte, S., Merot, A., Rapidel, B., Adam, M., and Wery, J. (2012). A protocol for the conceptualisation of an agro-ecosystem to guide data acquisition and analysis and expert knowledge integration. *European Journal of Agronomy*, 38:104–116, DOI: [10.1016/j.eja.2011.07.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.07.004). [60](#)
- Lamichhane, J. R., Bischoff-Schaefer, M., Bluemel, S., Dachbrodt-Saaydeh, S., Dreux, L.,

- Jansen, J.-P., Kiss, J., Köhl, J., Kudsk, P., Malausa, T., Messéan, A., Nicot, P. C., Ricci, P., Thibierge, J., and Villeneuve, F. (2017). Identifying obstacles and ranking common biological control research priorities for Europe to manage most economically important pests in arable, vegetable and perennial crops: Pest management in arable, vegetable and perennial crops in Europe. *Pest Management Science*, 73(1):14–21, DOI: 10.1002/ps.4423. [72](#)
- Lamichhane, J. R., Messéan, A., and Ricci, P. (2019). Research and innovation priorities as defined by the Ecophyto plan to address current crop protection transformation challenges in France. In *Advances in Agronomy*, volume 154, pages 81–152. Elsevier, DOI: 10.1016/bs.agron.2018.11.003. [126](#)
- 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, DOI: 10.1016/j.jrurstud.2011.02.001. [27](#), [98](#), [208](#)
- Lamine, C. (2017). *La fabrique sociale de l'écologisation de l'agriculture*. ELD, les Éditions la Discussion, Marseille. OCLC: 1030615484. [18](#), [180](#), [207](#)
- Lamine, C. and Bellon, S. (2009). Conversion to organic farming: a multidimensional research object at the crossroads of agricultural and social sciences. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1):97–112, DOI: 10.1051/agro:2008007. [22](#), [98](#), [160](#), [161](#), [199](#)
- Lamine, C., Meynard, J. M., Perrot, N., and Bellon, S. (2009). Analyse des formes de transition vers des agricultures plus écologiques: les cas de l'agriculture biologique et de la protection intégrée. *Innovations Agronomiques*, page 12. [21](#), [123](#)
- Landaïs, E., Deffontaines, J.-P., and Benoît, M. (1988). Les pratiques des agriculteurs. Point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique. *Études rurales*, 109(1):125–158, DOI: 10.3406/rural.1988.3226. [100](#)
- Lapierre, M., Sauquet, A., and Subervie, J. (2019). Improving Farm Environmental Performance through Technical Assistance: Empirical Evidence on Pesticide Use. page 37. [214](#)
- Laurent, A. (2021). On-Farm Trials Reveal Significant but Uncertain Control of Botrytis cinerea by Aureobasidium pullulans and Potassium Bicarbonate in Organic Grapevines. *Frontiers in Plant Science*, 12:13. [90](#)
- Le Gal, P.-Y., Dugué, P., Faure, G., and Novak, S. (2011). How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. *Agricultural Systems*, 104(9):714–728, DOI: 10.1016/j.agry.2011.07.007. [20](#), [21](#), [210](#)
- Le Gal, P.-Y., Merot, A., Moulin, C.-H., Navarrete, M., and Wery, J.

- (2010). A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling and Software*, 25(2):258–268, DOI: 10.1016/j.envsoft.2008.12.013. [20](#)
- Lechenet, M. (2016). *Peut-on concilier un faible usage de pesticides, une bonne performance économique et environnementale ?* PhD thesis, Université de Bourgogne. [206](#), [214](#), [216](#)
- Lechenet, M., Bretagnolle, V., Bockstaller, C., Boissinot, F., Petit, M.-S., Petit, S., and Munier-Jolain, N. M. (2014). Reconciling Pesticide Reduction with Economic and Environmental Sustainability in Arable Farming. *PLoS ONE*, 9(6):e97922, DOI: 10.1371/journal.pone.0097922. [126](#), [147](#)
- Lechenet, M., Dessaint, F., Py, G., Makowski, D., and Munier-Jolain, N. (2017). Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants*, 3(3):17008, DOI: 10.1038/nplants.2017.8. [2](#), [126](#), [147](#)
- Lechenet, M., Makowski, D., Py, G., and Munier-Jolain, N. (2016). Profiling farming management strategies with contrasting pesticide use in France. *Agricultural Systems*, 149:40–53, DOI: 10.1016/j.agsy.2016.08.005. [126](#), [213](#)
- Lefebvre, M., Langrell, S. R. H., and Gomez-y Paloma, S. (2015). Incentives and policies for integrated pest management in Europe: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1):27–45, DOI: 10.1007/s13593-014-0237-2. [18](#)
- Leroy, P., Smits, N., Cartolaro, P., Delière, L., Goutouly, J.-P., Raynal, M., and Alonso Ugaglia, A. (2013). A bioeconomic model of downy mildew damage on grapevine for evaluation of control strategies. *Crop Protection*, 53:58–71, DOI: 10.1016/j.cropro.2013.05.024. [148](#)
- Liebert, J., Benner, R., Bezner Kerr, R., Björkman, T., De Master, K. T., Gennet, S., Gómez, M. I., Hart, A. K., Kremen, C., Power, A. G., and Ryan, M. R. (2022). Farm size affects the use of agroecological practices on organic farms in the United States. *Nature Plants*, 8(8):897–905, DOI: 10.1038/s41477-022-01191-1. [221](#), [222](#)
- Louchart, X., Voltz, M., Andrieux, P., and Moussa, R. (2001). Herbicide Transport to Surface Waters at Field and Watershed Scales in a Mediterranean Vineyard Area. *Journal of Environmental Quality*, 30(3):982–991, DOI: 10.2134/jeq2001.303982x. [72](#)
- Lê, S., Josse, J., and Husson, F. (2008). FactoMineR : An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), DOI: 10.18637/jss.v025.i01. [107](#)
- Mailly, F., Hossard, L., Barbier, J.-M., Thiollot-Scholtus, M., and Gary, C. (2017). Quantifying the impact of crop protection practices on pesticide use in wine-growing systems. *European Journal of Agronomy*, 84:23–34, DOI:

- 10.1016/j.eja.2016.12.005. [12](#), [44](#), [69](#), [70](#), [71](#), [73](#), [74](#), [88](#), [89](#), [98](#), [101](#), [123](#), [141](#), [147](#), [151](#), [162](#), [216](#)
- Martelloni, L., Frascioni, C., Sportelli, M., Fontanelli, M., Raffaelli, M., and Peruzzi, A. (2020). Flaming, Glyphosate, Hot Foam and Nonanoic Acid for Weed Control: A Comparison. *Agronomy*, 10(1):129, DOI: 10.3390/agronomy10010129. [13](#)
- Martin, G., Magne, M.-A., and 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*, 8:1483, DOI: 10.3389/fpls.2017.01483. [xiii](#), [26](#), [27](#), [29](#), [32](#), [56](#), [104](#), [105](#), [123](#), [138](#), [140](#), [217](#)
- Mawois, M., Vidal, A., Revoyron, E., Casagrande, M., Jeuffroy, M.-H., and Le Bail, M. (2019). Transition to legume-based farming systems requires stable outlets, learning, and peer-networking. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1):14, DOI: 10.1007/s13593-019-0559-1. [28](#), [29](#), [61](#), [161](#)
- Merot and Belhouchette (2019). Hierarchical Patch Dynamics Perspective in Farming System Design. *Agronomy*, 9(10):604, DOI: 10.3390/agronomy9100604. [16](#), [73](#)
- Merot, A. (2022). *Agronomie des systèmes de culture à base de pérennes. Analyse de trajectoires et conception de transitions agroécologiques. Rapport HDR*. PhD thesis, Université de Montpellier - Ecole doctorale GAIA. [xiii](#), [7](#), [8](#), [15](#), [22](#), [42](#), [135](#), [147](#), [148](#), [207](#), [216](#)
- Merot, A., Alonso Ugaglia, A., Barbier, J.-M., and Del'homme, B. (2019). Diversity of conversion strategies for organic vineyards. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2):16, DOI: 10.1007/s13593-019-0560-8. [9](#), [15](#), [17](#), [20](#), [23](#), [28](#), [61](#), [70](#), [73](#), [98](#), [99](#), [100](#), [133](#), [135](#), [140](#), [141](#), [148](#), [183](#), [185](#), [199](#)
- Merot, A., Belhouchette, H., Saj, S., and Wery, J. (2020). Implementing organic farming in vineyards. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44(2):164–187, DOI: 10.1080/21683565.2019.1631934. [72](#), [73](#), [92](#)
- Merot, A. and Smits, N. (2020). Does Conversion to Organic Farming Impact Vineyards Yield? A Diachronic Study in Southeastern France. *Agronomy*, 10(11):1626, DOI: 10.3390/agronomy10111626. [13](#), [15](#), [16](#), [17](#), [70](#), [73](#), [92](#), [122](#), [135](#), [147](#), [148](#)
- Merot, A. and Wery, J. (2017). Converting to organic viticulture increases cropping system structure and management complexity. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(3):19, DOI: 10.1007/s13593-017-0427-9. [15](#), [73](#), [91](#), [124](#)
- Meynard, J.-M. (2008). Produire autrement: réinventer les systèmes de cultures. In Reau, R. and Doré, T., editors, *Systèmes de culture innovants et durables : comment faire pour les mettre au point et les évaluer?* Educagri Edition. [1](#)
- Meynard, J. M., Aggeri, F., Coulon, J., Habib, R., and Tillon, J. (2006). Recherches sur

- la conception de systèmes agricoles innovants. Rapport du groupe de travail., INRA, Paris. [7](#)
- Meynard, J.-M., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.-B., Charlier, A., and Messéan, A. (2018). Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(5):54, DOI: 10.1007/s13593-018-0535-1. [161](#)
- Meynard, J.-M., Dedieu, B., and Bos, A. P. (2012). Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In Darnhofer, I., Gibbon, D., and Dedieu, B., editors, *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*, pages 405–429. Springer Netherlands, Dordrecht, DOI: 10.1007/978-94-007-4503-2_18. [1](#), [9](#), [15](#), [21](#), [133](#), [160](#), [180](#), [207](#), [220](#)
- Meynard, J.-M., Jeuffroy, M.-H., Le Bail, M., Lefèvre, A., Magrini, M.-B., and Michon, C. (2017). Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems. *Agricultural Systems*, 157:330–339, DOI: 10.1016/j.agsy.2016.08.002. [9](#), [13](#), [223](#)
- Mghirbi, O., Kamel, E., Philippe, L. G., Elisabeth, M., Jacques, F., Habiba, A., and Jean-Paul, B. (2015). Assessing plant protection practices using pressure indicator and toxicity risk indicators: analysis of the relationship between these indicators for improved risk management, application in viticulture. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(11):8058–8074, DOI: 10.1007/s11356-014-3736-4. [151](#)
- Mills, J., Reed, M., Skaalsveen, K., and Ingram, J. (2019). The use of Twitter for knowledge exchange on sustainable soil management. *Soil Use and Management*, 35(1):195–203, DOI: 10.1111/sum.12485. [19](#)
- Ministère de l’Agriculture et de l’Alimentation, . (2020). IFT - Doses de référence. [72](#)
- Ministère de l’Agriculture et de l’Alimentation, . (2021). Doses de références des produits phytosanitaires. [102](#)
- Mondello, V., Songy, A., Battiston, E., Pinto, C., Coppin, C., Trotel-Aziz, P., Clément, C., Mugnai, L., and Fontaine, F. (2018). Grapevine Trunk Diseases: A Review of Fifteen Years of Trials for Their Control with Chemicals and Biocontrol Agents. *Plant Disease*, 102(7):1189–1217, DOI: 10.1094/PDIS-08-17-1181-FE. [91](#)
- Morel, K., Revoyron, E., San Cristobal, M., and 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, DOI: 10.1371/journal.pone.0229910. [223](#)
- Moulin, C.-H., Ingrand, S., Lasseur, J., Madelrieux, S., Napoléone, M., Pluvinage, J., and Thénard, V. (2008). Comprendre et analyser les changements d’organisation et de

- conduite de l'élevage dans un ensemble d'exploitations : propositions méthodologiques. In Dedieu, B., Chia, E., Leclerc, B., Moulin, C.-H., and Tichit, M., editors, *L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, page 3. Quae, quae edition. [xiii](#), [21](#), [25](#), [26](#), [28](#), [32](#), [61](#), [99](#), [183](#), [185](#)
- Munier-Jolain, N., Deytieux, V., Guillemain, J.-P., Granger, S., and Gaba, S. S. (2008). Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la protection intégrée contre la flore adventice en grandes cultures. *Innovations Agronomiques*, page 15. [17](#)
- Métral, R., Chevrier, C., Bals, N., Bouisson, Y., Didier, V., Enard, C., Fremond, N., Garin, P., Gauthier, T., Genevet, B., Goma-Fortin, N., Guillios, F., Ohl, B., and Thierry, J. (2018). DEPHY EXPE EcoViti Arc Méditerranéen : synthèse des résultats 2012-2017. *Innovations Agronomiques*, (70):3–20. [9](#), [46](#), [73](#), [133](#)
- Mézière, D., Gary, C., Barbier, J.-M., Bernos, L., Clément, C., Constant, N., Delière, L., Forget, D., Grosman, J., Molot, B., Rio, P., Sauvage, D., and Sentenac, G. (2009). ECOPHYTO RandD. Vers des systèmes de cultures économes en produits phytosanitaires. Volet 1 : Analyse comparative de différents systèmes en viticulture (Tome III). Rapport technique, INRA. [1](#), [44](#), [57](#), [220](#)
- Naud, O., Davy, A., and Codis, S. (2018). Traiter avec précision – concepts en jeu dans le contexte de la gestion du mildiou et de l'oïdium de la vigne. *Innovations Agronomiques* 67, 17-22. DOI: 10.15454/F5MZZT. Publisher: INRA. [71](#)
- Navarrete, M. (2014). Conception de systèmes innovants en arboriculture et maraîchage — Quelles connaissances mobiliser ? In Lauri, P.-, Navarrete, M., Parrot, L., and Simon, S., editors, *Conception de systèmes horticoles innovants - Bases biologiques, écologiques et socio-économiques*. Formasciences, inra edition. [10](#)
- Navarrete, M., Djian-Caporalino, C., Mateille, T., Palloix, A., Sage-Palloix, A.-M., Lefèvre, A., Fazari, A., Marteu, N., Tavoillot, J., Dufils, A., Furnion, C., Pares, L., and Forest, I. (2016). A resistant pepper used as a trap cover crop in vegetable production strongly decreases root-knot nematode infestation in soil. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(4):68, DOI: 10.1007/s13593-016-0401-y. [8](#)
- Niles, M. T., Garrett, R. D., and Walsh, D. (2018). Ecological and economic benefits of integrating sheep into viticulture production. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(1):1, DOI: 10.1007/s13593-017-0478-y. [73](#), [215](#)
- Omon, B. and Guichard, L. (2017). Limiter l'usage des produits phytosanitaires, une politique ambitieuse qui pose la question de l'évolution nécessaire du conseil aux agriculteurs : simple rénovation du conseil ou accompagnement dans une démarche interactive de changement de mode de production? [212](#)

- Ostandie, N., Giffard, B., Tolle, P., Ugaglia, A. A., Thiéry, D., and Rusch, A. (2022). Organic viticulture leads to lower trade-offs between agroecosystem goods but does not improve overall multifunctionality. *Agricultural Systems*, 203:103489, DOI: 10.1016/j.agry.2022.103489. [149](#)
- Padel, S., Levidow, L., and Pearce, B. (2020). UK farmers' transition pathways towards agroecological farm redesign: evaluating explanatory models. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44(2):139–163, DOI: 10.1080/21683565.2019.1631936. [27](#), [98](#)
- Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*, 10(1):439–446, DOI: 10.32614/RJ-2018-009. [78](#)
- Pedersen, A. B., Nielsen, H. , Christensen, T., and Hasler, B. (2012). Optimising the effect of policy instruments: a study of farmers' decision rationales and how they match the incentives in Danish pesticide policy. *Journal of Environmental Planning and Management*, 55(8):1094–1110, DOI: 10.1080/09640568.2011.636568. [150](#)
- Perrin, A., Cristobal, M. S., Milestad, R., and Martin, G. (2020). Identification of resilience factors of organic dairy cattle farms. *Agricultural Systems*, 183:102875, DOI: 10.1016/j.agry.2020.102875. [104](#)
- Perrin, A. and Martin, G. (2021). Driving factors behind subjective resilience on organic dairy sheep farms. *Ecology and Society*, 26(3):art13, DOI: 10.5751/ES-12583-260313. [26](#)
- Perrot, C. (1990). Typologie d'exploitations construite par aggregation autour de pôles définis à dire d'experts. Propositions méthodologiques et premiers résultats obtenus en Haute Marne. *Production animale*, pages 51–66. [25](#)
- Pertot, I., Caffi, T., Rossi, V., Mugnai, L., Hoffmann, C., Grando, M., Gary, C., Lafond, D., Duso, C., Thiery, D., Mazzoni, V., and Anfora, G. (2017). A critical review of plant protection tools for reducing pesticide use on grapevine and new perspectives for the implementation of IPM in viticulture. *Crop Protection*, 97:70–84, DOI: 10.1016/j.cropro.2016.11.025. [11](#), [13](#), [42](#), [70](#), [72](#), [89](#), [215](#)
- Petit, A. (2018). Innover en viticulture : 15 « bonnes » idées pour se lancer. [215](#)
- Petit, A.-N., Fontaine, F., Clément, C., and Vaillant-Gaveau, N. (2008). Photosynthesis Limitations of Grapevine after Treatment with the Fungicide Fludioxonil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15):6761–6767, DOI: 10.1021/jf800919u. [1](#), [70](#)
- Petit, T. (2017). *Du territoire aux agriculteurs, approche technique et sociologique du maintien des prairies dans un contexte d'élevage périurbain de plaine. Enquête auprès d'éleveurs de la partie nord de l'agglomération de Rennes*. PhD thesis, ESA Anger, Unité de Recherche sur les Systèmes d'Elevage (URSE). [24](#)

- Pingault, N., Pleyber, , Champeaux, C., Guichard, L., and Omon, B. (2008). Produits phytosanitaires et protection intégrée des cultures : l'indicateur de fréquence de traitement. *Notes et études socio-économiques*, (32):34. [69](#), [76](#), [102](#), [132](#), [136](#), [159](#)
- Pissonnier, S., Dufils, A., and Le Gal, P.-Y. (2019). A methodology for redesigning agroecological radical production systems at the farm level. *Agricultural Systems*, 173:161–171, DOI: [10.1016/j.agsy.2019.02.018](#). [208](#), [210](#)
- PNDV (2018). Les Carnets du Plan Dépérissement. [207](#)
- Polge de Combret Champart, L., Guilpart, N., Mérot, A., Capillon, A., and Gary, C. (2013). Determinants of the degradation of soil structure in vineyards with a view to conversion to organic farming. *Soil Use and Management*, 29(4):557–566, DOI: [10.1111/sum.12071](#). [72](#)
- Pons, A., Mouakka, N., Deliere, L., Crachereau, J. C., Davidou, L., Sauris, P., Guilbault, P., and Darriet, P. (2018). Impact of Plasmopara viticola infection of Merlot and Cabernet Sauvignon grapes on wine composition and flavor. *Food Chemistry*, 239:102–110, DOI: [10.1016/j.foodchem.2017.06.087](#). [17](#), [70](#)
- Pretty, J., Benton, T. G., Pervez Bharucha, Z., Dicks, L. V., Butler Flora, C., Godfray, H. C. J., Goulson, D., Hartley, S., Morris, C., Pierzynski, G., Vara Prasad, P. V., Reganold, J., Rockström, J., Smith, P., Thorne, P., and Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature sustainability*, 1:6, DOI: [https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0](#). [108](#), [160](#)
- Prost, L. (2019). *La recherche agronomique au prisme de la conception. Rapport HDR*. PhD thesis, Université Paris-Est – Ecole doctorale ABIÉS. [xiii](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#), [219](#)
- Prost, L., Berthet, E. T. A., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Labatut, J., and Meynard, J.-M. (2017a). Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Research in Engineering Design*, 28(1):119–129, DOI: [10.1007/s00163-016-0233-4](#). [7](#)
- Prost, L., Reau, R., Paravano, L., Cerf, M., and Jeuffroy, M.-H. (2018). Designing agricultural systems from invention to implementation: the contribution of agronomy. Lessons from a case study. *Agricultural Systems*, 164:122–132, DOI: [10.1016/j.agsy.2018.04.009](#). [8](#)
- Prost, M., Prost, L., and Cerf, M. (2017b). Les échanges virtuels entre agriculteurs : un soutien à leurs transitions professionnelles ?.. *Raisons éducatives*, N° 21(1):129–154, DOI: [10.3917/raised.021.0129](#). [19](#)
- Puech, C., Poggi, S., Baudry, J., and Aviron, S. (2015). Do farming practices affect natural enemies at the landscape scale? *Landscape Ecol*, page 16. [141](#)
- Pujol, J. (2017). Apports de produits phytosanitaires en viticulture et climat : une analyse

- à partir des enquêtes pratiques culturelles. *Agreste - Les Dossiers*, (39):30. [1](#)
- Périnelle, A., Meynard, J.-M., and Scopel, E. (2021). Combining on-farm innovation tracking and participatory prototyping trials to develop legume-based cropping systems in West Africa. *Agricultural Systems*, 187:102978, DOI: 10.1016/j.agsy.2020.102978. [9](#), [223](#)
- Quinio, M., De Waele, M., Dessaint, F., Biju-Duval, L., Buthiot, M., Cadet, E., Bybee-Finley, A. K., Guillemin, J.-P., and Cordeau, S. (2017). Separating the confounding effects of farming practices on weeds and winter wheat production using path modelling. *European Journal of Agronomy*, 82:134–143, DOI: 10.1016/j.eja.2016.10.011. [140](#), [141](#)
- Raherison, C., Baldi, I., Pouquet, M., Berteaud, E., Moesch, C., Bouvier, G., and Canal-Raffin, M. (2019). Pesticides Exposure by Air in Vineyard Rural Area and Respiratory Health in Children: A pilot study. *Environmental Research*, 169:189–195, DOI: 10.1016/j.envres.2018.11.002. [1](#), [70](#)
- Raynal, M., Debord, C., Vergnes, M., and Coulon, T. (2010). Epicure, a geographic information system applied on downy and powdery mildew risks of epidemics on the Bordeaux vineyard. In *Proceedings of the 6th International Workshop on Grapevine Downy and Powdery Mildew. Bordeaux, 4-9 July, 2010.*, pages 144–146, Bordeaux, France. A. Calonnec, F. Delmotte, B. Emmett, D. Gadoury, C. Gessler, D. Gubler, H-H Kassemeyer, P. Magarey, M. Raynal and R. Seem, eds. [71](#)
- Renaud-Gentié, C., Dieu, V., Thiollet-Scholtus, M., van der Werf, H., Perrin, A., and Mérot, A. (2019). L’Analyse du Cycle de Vie pour réduire l’impact environnemental de la viticulture biologique. *BIO Web of Conferences*, 15:01031, DOI: 10.1051/bioconf/20191501031. [151](#)
- Repar, N., Jan, P., Dux, D., Nemecek, T., and Doluschitz, R. (2017). Implementing farm-level environmental sustainability in environmental performance indicators: A combined global-local approach. *Journal of Cleaner Production*, 140:692–704, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.022. [133](#)
- Revoyron, E., Le Bail, M., Meynard, J.-M., Gunnarsson, A., Seghetti, M., and Colombo, L. (2022). Diversity and drivers of crop diversification pathways of European farms. *Agricultural Systems*, 201:103439, DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103439. [26](#), [29](#), [161](#)
- Ripoche, A., Metay, A., Celette, F., and Gary, C. (2011). Changing the soil surface management in vineyards: immediate and delayed effects on the growth and yield of grapevine. *Plant and Soil*, 339(1-2):259–271, DOI: 10.1007/s11104-010-0573-1. [148](#)
- Robinson, D. and Hayes, A. (2020). broom: Convert Statistical Analysis Objects into Tidy Tibbles. R package version 0.5.4. [56](#), [78](#), [107](#)

- Rodrigo Comino, J., Keesstra, S. D., and Cerdà, A. (2018). Connectivity assessment in Mediterranean vineyards using improved stock unearthing method, LiDAR and soil erosion field surveys: Connectivity assessment in Mediterranean vineyards. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(10):2193–2206, DOI: 10.1002/esp.4385. 70
- Ross, A. M., Rhodes, D. H., and Hastings, D. E. (2008). Defining changeability: Reconciling flexibility, adaptability, scalability, modifiability, and robustness for maintaining system lifecycle value. *Systems Engineering*, 11(3):246–262, DOI: 10.1002/sys.20098. 23, 99, 122, 141
- Rouault, A., Beauchet, S., Renaud-Gentie, C., and Jourjon, F. (2016). Life Cycle Assessment of viticultural technical management routes (TMRs): comparison between an organic and an integrated management route. *OENO One*, 50(2), DOI: 10.20870/oeno-one.2016.50.2.783. 148
- Rueff, C., Choisis, J.-P., Balent, G., and Gibon, A. (2012). A Preliminary Assessment of the Local Diversity of Family Farms Change Trajectories Since 1950 in a Pyrenees Mountains Area. *Journal of Sustainable Agriculture*, 36(5):564–590, DOI: 10.1080/10440046.2012.672547. 25
- Ryschawy, J., Choisis, N., Choisis, J. P., and Gibon, A. (2013). Paths to last in mixed crop–livestock farming: lessons from an assessment of farm trajectories of change. *animal*, 7(4):673–681, DOI: 10.1017/S1751731112002091. 25
- Rénier, L., Cardona, A., Goulet, F., and Ollivier, G. (2022). La proximité à distance: Comment les agri-youtubeurs communiquent sur leurs pratiques. *Réseaux*, N° 231(1):225–257, DOI: 10.3917/res.231.0225. 19
- Salembier, C., Segrestin, B., Berthet, E., Weil, B., and Meynard, J.-M. (2018). Genealogy of design reasoning in agronomy: Lessons for supporting the design of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 164:277–290, DOI: 10.1016/j.agsy.2018.05.005. 9
- Salembier, C., Segrestin, B., Sinoir, N., Templier, J., Weil, B., and Meynard, J.-M. (2020). Design of equipment for agroecology: Coupled innovation processes led by farmer-designers. *Agricultural Systems*, 183:102856, DOI: 10.1016/j.agsy.2020.102856. 125
- Salembier, C., Segrestin, B., Weil, B., Jeuffroy, M.-H., Cadoux, S., Cros, C., Favrelière, E., Fontaine, L., Gimaret, M., Noilhan, C., Petit, A., Petit, M.-S., Porhiel, J.-Y., Sicard, H., Reau, R., Ronceux, A., and Meynard, J.-M. (2021). A theoretical framework for tracking farmers’ innovations to support farming system design. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5):61, DOI: 10.1007/s13593-021-00713-z. 9
- Sanchez, G. (2013). PLS path modeling with R. 140, 141
- Sanchez, G., Trinchera, L., and Russolillo, G. (2015). plspm: Tools for Partial Least Squares Path Modeling (PLS-PM). R package version 0.4.9.

- <https://github.com/gastonstat/plspm>. 56, 141
- Sanson, S. and Joulin, A. (2018). État des lieux de l'usage des produits phytopharmaceutiques en Grand Est. 91
- Schauberger, B., Ben-Ari, T., Makowski, D., Kato, T., Kato, H., and Ciais, P. (2018). Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Scientific Reports*, 8(1):16865, DOI: 10.1038/s41598-018-35351-1. 92, 207
- Schiere, J.-B., Darnhofer, I., and Duru, M. (2012). Dynamics in farming systems: of changes and choices. In Darnhofer, I., Gibbon, D., and Dedieu, B., editors, *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Springer Netherlands, Dordrecht, darnhofer, i., gibbon, d., dedieu, b edition. 21
- Schreck, E., Foucault, Y., Sarret, G., Sobanska, S., Cécillon, L., Castrec-Rouelle, M., Uzu, G., and Dumat, C. (2012). Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: Mechanisms involved for lead. *Science of The Total Environment*, 427-428:253–262, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.051. 1, 69
- Seufert, V., Ramankutty, N., and Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397):229–232, DOI: 10.1038/nature11069. 147
- Siegfried, W., Viret, O., Huber, B., and Wohlhauser, R. (2007). Dosage of plant protection products adapted to leaf area index in viticulture. *Crop Protection*, 26(2):73–82, DOI: 10.1016/j.cropro.2006.04.002. 71
- Simonovici, M. (2019). Enquête Pratiques phytosanitaires en viticulture en 2016. Nombre de traitements et indicateurs de fréquence de traitement. Technical report, ECOPHYTO - Ministère de la transition écologique et solidaire. 69, 72, 87, 92, 141, 170
- Simonovici, M. and Caray, J. (2021). Enquête Pratiques culturelles en viticulture en 2019 - IFT et nombre de traitements. Technical report, ECOPHYTO - Ministère de la transition écologique. 13, 43, 101, 132, 141, 159, 208
- Sinfort, C. and Vallet, A. (2003). Modélisation de la dispersion des pesticides pendant les applications. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, pages 85–94. 71
- Soulé, E., Michonneau, P., Michel, N., and Bockstaller, C. (2021). Environmental sustainability assessment in agricultural systems: A conceptual and methodological review. *Journal of Cleaner Production*, 325:129291, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129291. 133, 217
- Sutherland, L.-A., Burton, R. J., Ingram, J., Blackstock, K., Slee, B., and Gotts, N. (2012). Triggering change: Towards a conceptualisation of major change processes

- in farm decision-making. *Journal of Environmental Management*, 104:142–151, DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.03.013. [24](#), [98](#), [123](#), [125](#), [160](#), [161](#)
- Tchamitchian, M. and Le Gal, P.-Y. (2014). Démarche de co-conception en horticulture. In Lauri, P.-, Navarrete, M., Parrot, L., and Simon, S., editors, *Conception de systèmes horticoles innovants : bases biologiques, écologiques et socio-économiques*. FormaSciences, INRA, Paris. [9](#)
- Team, R. (2020). RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA. [107](#)
- Team, R. C. (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [107](#), [141](#)
- Teixeira, H. M., Vermue, A. J., Cardoso, I. M., Peña Claros, M., and Bianchi, F. J. (2018). Farmers show complex and contrasting perceptions on ecosystem services and their management. *Ecosystem Services*, 33:44–58, DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.08.006. [8](#), [25](#), [100](#), [216](#)
- Tenenhaus, M., Vinzi, V. E., Chatelin, Y.-M., and Lauro, C. (2005). PLS path modeling. *Computational Statistics and Data Analysis*, 48(1):159–205, DOI: 10.1016/j.csda.2004.03.005. [140](#)
- Thierry, D. and Yengue, J.-L. (2018). Vigne et ville. Le paradoxe de l’urbanisme. *Revue des Oenogues*, (169):60–61. [1](#), [70](#)
- Thiollet-Scholtus, M., Muller, A., Abidon, C., Audema, P., Bailly, C., Chaumonnot, S., Grignon, J., Keichinger, O., Klein, C., Langenfeld, A., Ley, L., Lemarquis, G., Nassr, N., Nibaudeau, R., Rabolin-Meinrad, C., Ribeiro, S., Schneider, C., and Weissbart, J. (2019). Performances multicritères de systèmes viticoles à réduction drastique d’intrants dans le vignoble alsacien (PEPSVI). *Innovations Agronomiques*, 76 (1):219–236. [9](#), [46](#), [71](#), [133](#)
- Thiollet-Scholtus, M., Muller, A., Abidon, C., Grignon, J., Keichinger, O., Koller, R., Langenfeld, A., Ley, L., Nassr, N., Rabolin-Meinrad, C., and Wohlfahrt, J. (2021). Multidimensional assessment demonstrates sustainability of new low-input viticulture systems in north-eastern France. *European Journal of Agronomy*, 123:126210, DOI: 10.1016/j.eja.2020.126210. [73](#)
- Tittonell, P. (2014). Ecological intensification of agriculture—sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8:53–61, DOI: 10.1016/j.cosust.2014.08.006. [160](#)
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., Mischler, P., Pernel, J., and Prost, L. (2017a). Farmers’ use of fundamental knowledge to re-design their cropping systems: situated contextualisation processes. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 80(1):37–47,

- DOI: 10.1016/j.njas.2016.11.004. [7](#), [160](#), [209](#), [220](#)
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., and Prost, L. (2016). Indicators used by farmers to design agricultural systems: a survey. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1):5, DOI: 10.1007/s13593-015-0340-z. [22](#), [28](#), [89](#), [92](#), [161](#)
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., and Prost, L. (2017b). L'activité de re-conception d'un système de culture par l'agriculteur: implications pour la production de connaissances en agronomie. *Agronomie, Environnement and Sociétés, ssociation Française d'Agronomie (Afa)*, page 15. [8](#), [10](#), [98](#), [220](#)
- Tsakirakis, A. N., Kasiotis, K. M., Charistou, A. N., Arapaki, N., Tsatsakis, A., Tsakalof, A., and Machera, K. (2014). Dermal and inhalation exposure of operators during fungicide application in vineyards. Evaluation of coverall performance. *Science of The Total Environment*, 470-471:282–289, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.021. [1](#), [70](#)
- Urruty, N., Deveaud, T., Guyomard, H., and Boiffin, J. (2016a). Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture. *European Journal of Agronomy*, 80:113–123, DOI: 10.1016/j.eja.2016.07.004. [69](#)
- Urruty, N., Deveaud, T., Guyomard, H., and Boiffin, J. (2016b). Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture. *European Journal of Agronomy*, 80:113–123, DOI: 10.1016/j.eja.2016.07.004. [132](#), [159](#)
- Valdés-Gómez, H., Fermaud, M., Roudet, J., Calonnec, A., and Gary, C. (2008). Grey mould incidence is reduced on grapevines with lower vegetative and reproductive growth. *Crop Protection*, 27(8):1174–1186, DOI: 10.1016/j.cropro.2008.02.003. [72](#)
- Van Berkel, D. B. and Verburg, P. H. (2012). Combining exploratory scenarios and participatory backcasting: using an agent-based model in participatory policy design for a multi-functional landscape. *Landscape Ecology*, 27(5):641–658, DOI: 10.1007/s10980-012-9730-7. [8](#)
- Vermunt, D., Wojtynia, N., Hekkert, M., Van Dijk, J., Verburg, R., Verweij, P., Wassen, M., and Runhaar, H. (2022). Five mechanisms blocking the transition towards 'nature-inclusive' agriculture: A systemic analysis of Dutch dairy farming. *Agricultural Systems*, 195:103280, DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103280. [161](#)
- Verret, V., Pelzer, E., Bedoussac, L., and 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, DOI: 10.1016/j.eja.2020.126018. [9](#), [72](#)
- Villain, M. (2022). Les freins et leviers psychosociologiques face au changement de

- pratiques agricoles chez les Vignerons de Buzet. Rapport d'activité scientifique, Université de Pau et des Pays de l'Adour. 19
- Vinzi, V. E., Trinchera, L., and Amato, S. (2010). PLS Path Modeling: From Foundations to Recent Developments and Open Issues for Model Assessment and Improvement. In Esposito Vinzi, V., Chin, W. W., Henseler, J., and Wang, H., editors, *Handbook of Partial Least Squares*, pages 47–82. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-540-32827-8_3. 140, 141
- Viret, O., Dubuis, P., Frabre, A., Bloesch, B., Siegfried, W., Naef, A., Huber, M., Bleyer, G., Kassemeyer, H., Breuer, M., and Krause, R. (2011). www.agrometeo.ch an interactive platform for a better management for grapevine diseases and pests. *Bull. IOBC/wprs*, 67:85–91. 71
- Walliser, B. (1977). Système et environnement. Chapitre 1. In *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes*. Seuil edition. 20
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., and Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34 (1):22, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>. 2, 70, 72, 160
- Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. 59, 78, 107
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T., Miller, E., Bache, S., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D., Spinu, V., Takahashi, K., Vaughan, D., Wilke, C., Woo, K., and Yutani, H. (2019). Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43):1686, DOI: 10.21105/joss.01686. 56, 59, 78, 107
- Wilson, C. and Tisdell, C. (2001). Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs. *Ecological Economics*, 39(3):449–462, DOI: 10.1016/S0921-8009(01)00238-5. 69, 98, 149
- Wilson, G. A. (2007). *Multifunctional agriculture: a transition theory perspective*. CABI, Cambridge, MA. OCLC: ocm80358348. 99, 104
- Wilson, G. A. (2008). From ‘weak’ to ‘strong’ multifunctionality: Conceptualising farm-level multifunctional transitional pathways. *Journal of Rural Studies*, 24(3):367–383, DOI: 10.1016/j.jrurstud.2007.12.010. 22, 23, 24, 98, 160, 210
- Yvoz, S., Petit, S., Biju-Duval, L., and Cordeau, S. (2020). A framework to type crop management strategies within a production situation to improve the comprehension of weed communities. *European Journal of Agronomy*, 115:126009, DOI: 10.1016/j.eja.2020.126009. 161
- Zhu, X., Liu, W., Chen, J., Bruijnzeel, L. A., Mao, Z., Yang, X., Cardinael, R., Meng,

- F.-R., Sidle, R. C., Seitz, S., Nair, V. D., Nanko, K., Zou, X., Chen, C., and Jiang, X. J. (2020). Reductions in water, soil and nutrient losses and pesticide pollution in agroforestry practices: a review of evidence and processes. *Plant and Soil*, 453(1-2):45–86, DOI: 10.1007/s11104-019-04377-3. [73](#)
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., and Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Statistics for Biology and Health. Springer New York, New York, NY, DOI: 10.1007/978-0-387-87458-6. [78](#)

Annexes

Annexe A

Supplementary material chapitre 2

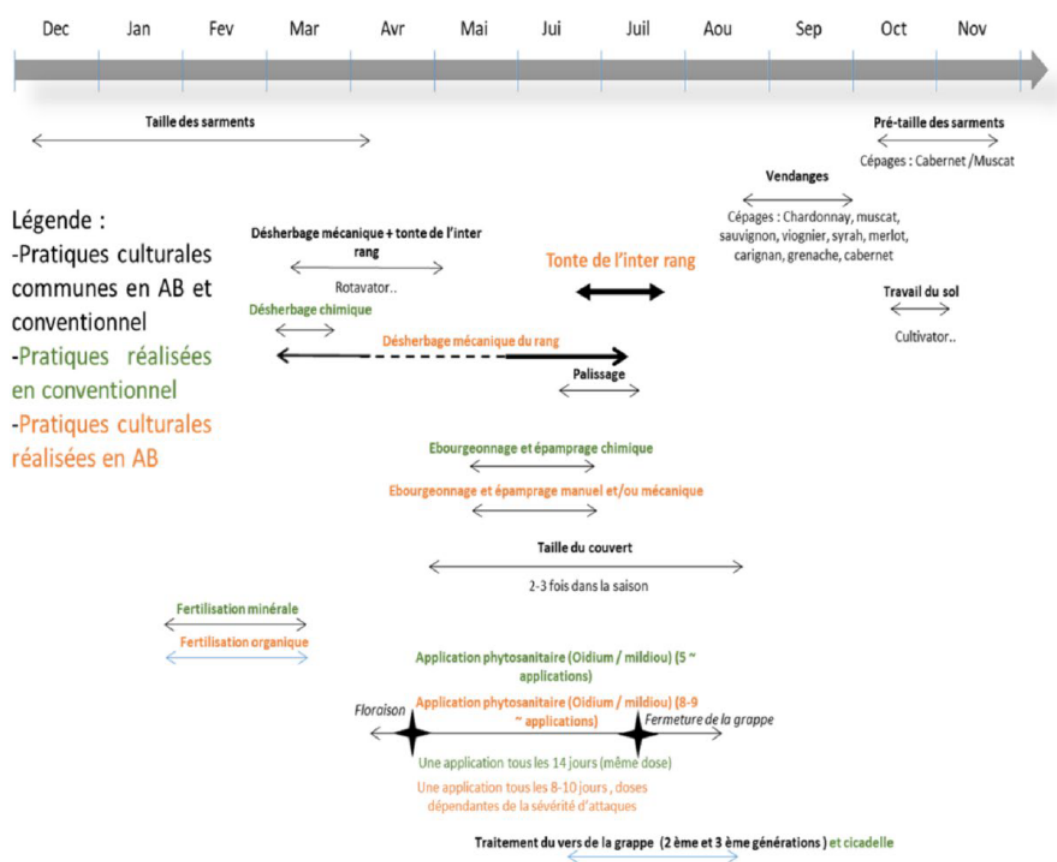


Figure A.1 Itinéraire technique viticole d'une parcelle menée en agriculture biologique et conventionnelle, réalisée par Margaux Guy pendant son stage de fin d'étude

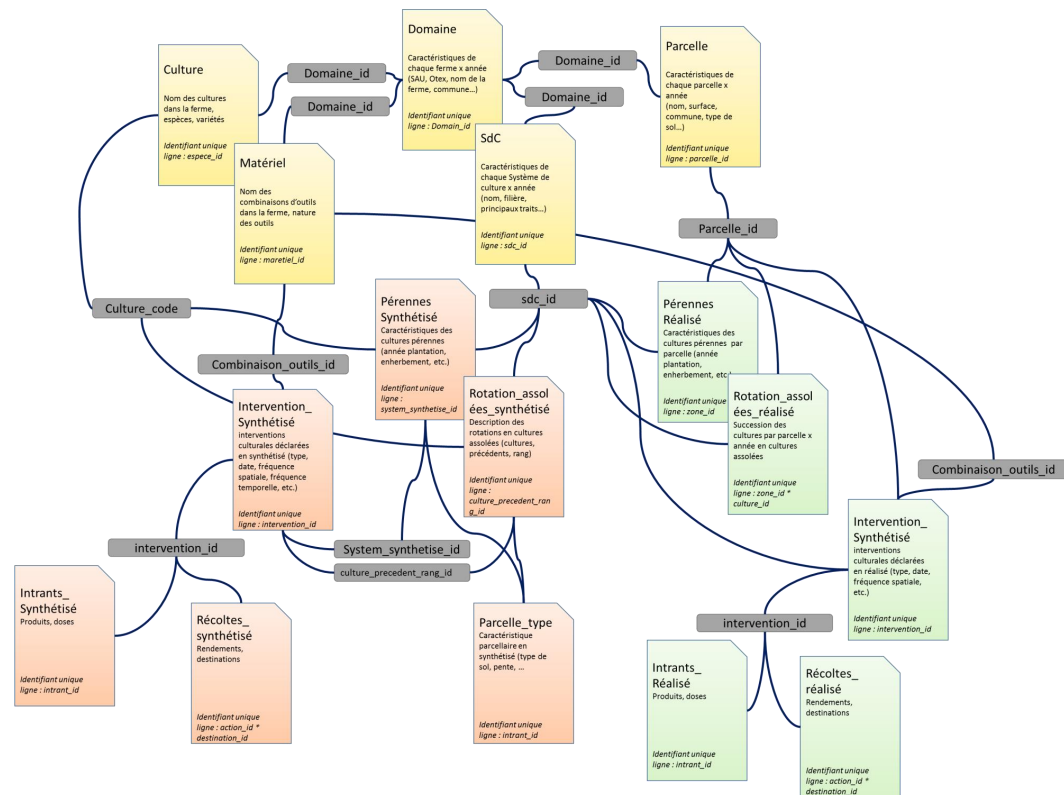


Figure A.2 Schéma représentant la structure de la base de données AGROSYST et les fichiers qui la composent

Table A.1 Correspondance entre bassins viticoles DEPHY et bassins viticoles AGRESTE

2010	2013	2016	2019	Départements associés
Alsace	Alsace	Alsace	Alsace	67 ; 68
Beaujolais	Beaujolais	Beaujolais	Beaujolais	69 ; 71
Bordelais	Bordelais	Bordelais	Bordelais	33
Bouches-du-Rhône	Bouches-du-Rhône	Bouches-du-Rhône	Bouches-du-Rhône	13
Bourgogne	Bourgogne	Bourgogne	Bourgogne	21 ; 89 ; 71
Beaujolais	Beaujolais	Bugey-Savoie	Bugey-Savoie	01 ; 38 ; 73 ; 74
Midi-Pyrénées	Cahors	Cahors	Cahors	46
Champagne	Champagne	Champagne	Champagne	10 ; 51
Charentes	Charentes	Charentes	Charentes	16 ; 17
Val de Loire	Cher	Cher	Cher	18
PACA 83-84	PACA 83-84	Corse	Corse	2A ; 2B
Languedoc hors PO	Côtes-du-Rhône Nord	Côtes-du-Rhône Nord	Côtes-du-Rhône Nord	Nord 07 et 26
Languedoc hors PO	Côtes-du-Rhône Sud	Côtes-du-Rhône Sud	Côtes-du-Rhône Sud	Sud 07 et 26
Dordogne	Dordogne	Dordogne	Dordogne	24
Midi-Pyrénées	Gaillac	Gaillac	Gaillac	81
Midi-Pyrénées	Gers	Gers	Gers	32
Bourgogne	Bourgogne	Jura	Jura	39
Languedoc	Languedoc hors PO	Languedoc hors PO	Languedoc hors PO	30 ; 34 ; 11
Bordelais	Lot-et-Garonne	Lot-et-Garonne	Lot-et-Garonne	47
PACA 83-84	PACA 83-84	Provence (Var-Vaucluse)	Provence (Var-Vaucluse)	83 ; 84
Pyrénées-Orientales	Pyrénées-Orientales	Pyrénées Orientales	Pyrénées Orientales	66
Val de Loire	Val de Loire	Val de Loire	Val de Loire	37 ; 41 ; 44 ; 49

Présentation générale de l'EA

1/ Présentation générale

- Contexte général
- Certification
- Motivation d'entrée dans DEPHY
- Quel est le poids économique de la vigne dans l'EA ?

2/ Parcellaire

Représentation du parcellaire

- Cépage
- Type de sol
- Eloignement
- Difficulté à travailler cette parcelle
- Appellation/certification

3/ Matériel et outil

Liste du matériel à compléter

- Pratiques sous-traitées/CUMA/intervention extérieure ?
- Autonomie pour le matériel ?

4/ Commercialisation

Est-ce que le mode de commercialisation a évolué ? Quel est le mode de commercialisation ?

Itinéraire techniques / pratiques

Frise pratique de 2020 à compléter

- Retracer les pratiques : taille, phyto, travaux en vert, fertilisation, vendange
- Abonnement à un BSV ? Observation des parcelles ? Utilisation d'OAD ?
- Qu'est-ce qui va motiver le premier traitement ? Découper par cible : oïdium, mildiou, botrytis, cicadelles, ~~eudemis~~ maladie du bois
- Quelles sont les méthodes de pulvérisation ? Combien de rangs sont traités ? Comment est nettoyé la cuve ?
- Mise en place d'essai erreur ?
- Gestion du rang et de l'IR.

Identification des changements

Comparaison frise 2020 / frise des 10 ans /IFT

- Identification des changements
- Est-ce que ces changements ont engendré une complexité au niveau de la réduction des phyto ?
- Replacer les pics de travail

Frise travail

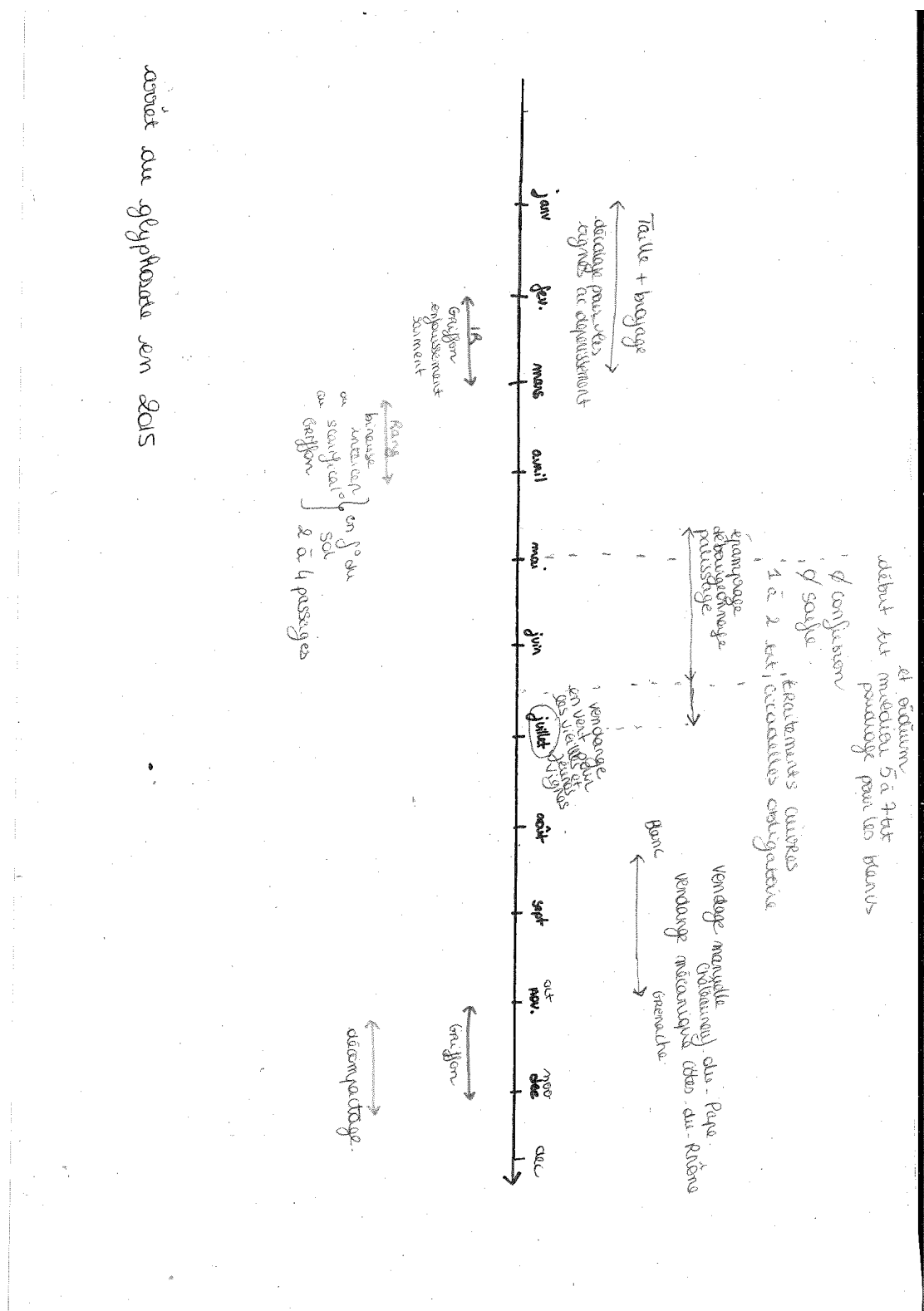
Qualification de l'évolution des performances

- Comment ont évolués les objectifs (rendements.) ? Est-ce qu'ils ont été atteint ?
- Les rendements sont-ils satisfaisant partout ?

Autoévaluation

- D'après vous, quels ont été les changements majeurs dans votre EA au cours des 10 dernières années ?

Figure A.3 Trame d'enquête



Annexe B

Supplementary material chapter 3

Table B.1 Description of the variables used for the study

Name of the variable	Definition	Variable status	Unit	Database
Year	Year of the intervention	quantitative	year	Agrosyst
Date	Date of the intervention	quantitative	days-month	Agrosyst
Cropping system	Name of the cropping system	qualitative	$\emptyset$	Agrosyst
Winegrowing region	Winegrowing region for a given cropping system	qualitative	$\emptyset$	Agrosyst
Type of agriculture	Type of farming : conventional, organic farming or in conversion	qualitative	$\emptyset$	Agrosyst
Product_Name	Name of the sprayed product	qualitative	$\emptyset$	Agrosyst
Dose sprayed	Dose sprayed	quantitative	$kg\,ha^{-1}$ or $L\,ha^{-1}$ or $Unite\,ha^{-1}$	Agrosyst
Dose recommanded	recommended doses per product and per target pest/disease	quantitative	$kg\,ha^{-1}$ or $L\,ha^{-1}$ or $Unite\,ha^{-1}$	E-phy
Type of product	Type of product sprayed : insecticide, fungicide or insecticide	qualitative	$\emptyset$	Agrosyst
Target	Targeted pest (<i>e.g.</i> downy mildew, weeds)	qualitative	$\emptyset$	Agrosyst
Area sprayed	Area concerned by the treatment (ratio)	quantitative	$\emptyset$	Agrosyst
Area total	Total area on the field	quantitative	$\emptyset$	Agrosyst
Biocontrole	1 if the product is a biocontrol product, 0 if not	qualitative	$\emptyset$	E-phy
Number of CMR product	Number of CMR product used in a cropping season	quantitative	Number of product	Agrosyst
Yield	yield observed for a given year	qualitative	$hL\,ha^{-1}$	Agrosyst

Table B.2 Results from the statistical tests (t-test and linear mixed model) for the TFI and yield evolution. Results from the linear mixed model following Eq(2) with the estimates, the standard Error, the Confidence Interval (CI – 95%) and the pvalue

	TFI evolution – linear mixed model				Yield evolution – linear mixed model			
	Estimate	Standard Error	CI – 95%	p-value	Estimate	Standard Error	CI - 95%	p-value
Intercept	638.7	219.27	[208, 1.07]	<0.01	-2.028	1.275	[-4.53 , 474]	0.112
Year	-0.31332	0.10	[-0.53, -0.10]	<0.001	1.607	0.633	[-0.21, 2.3]	0.044
Winegrowing Region				<0.001				<0.001
Year:Winegrowing Region				<0.001				<0.001
Year:Bordeaux	-0.33	0.147	[-0.62,-0.04]	<0.05	-0.9525	0.8126	[-2.5, 0.67]	0.255
Year:Bouches-du-Rhône	0.23179	0.198	[-0.16, 0.062]	0.24	-0.7107	1.019	[-2.7, 1.3]	0.486
Year:Bugey-Savoie	-0.14021	0.182	[-0.50, 0.22]	0.44	-2.534	0.9489	[-4.4, -0.67]	<0.01
Year:Burgundy	-0.08578	0.138	[-0.36, 0.18]	0.53	-2.542	0.7506	[-1.0, -1.1]	<0.001
Year:Champagne	-0.08881	0.129	[-0.34,0.16]	0.49	-0.014	0.7261	[-1.4, 1.4]	0.988
Year:Charente	-0.76392	0.137	[-1.0, -0.49]	<0.001				
Year:Côtes-du-Rhône-Sud	-0.63678	0.254	[-1.1, -0.14]	<0.05	1.853	1.102	[-0.87, 4.6]	0.181
Year:Gaillac	0.43415	0.164	[0.11, 0.76]	<0.001	-0.562	0.9327	[-2.4, 1.3]	0.547
Year:Languedoc	0.15520	0.182	[-0.20, 0.51]	0.39	-1.946	1.199	[-4.3, 0.41]	0.104
Year:Loire Valley	-0.37024	0.137	[-0.64, -0.10]	<0.001	-1.501	0.7450	[-3.0, -0.04]	0.044
Year:Provence	0.05728	0.138	[-0.21, 0.33]	0.68	-3.013	0.7614	[-4.5, 1.5]	<0.001

Table B.3 Results from the statistical tests (t-test and linear mixed model) for the TFI and yield evolution. Results from the T-test for the TFI and yield evolution

Winegrowing Region	TFI evolution - t.test	Yield evolution - t.test
	p-value	p-value
Alsace	0.024	0.694
Bordeaux	0.012	0.471
Bouches-du-Rhône	0.286	0.67
Burgundy	0.206	0.233
Bugey-Savoie	0.096	0.027
Champagne	0.158	0.977
Charentes	<0.001	
Côtes-du-Rhône-Sud	0.409	0.301
Gaillac	0.157	0.054
Languedoc	0.517	0.956
Provence	0.01	<0.001
Loire Valley	0.022	0.084

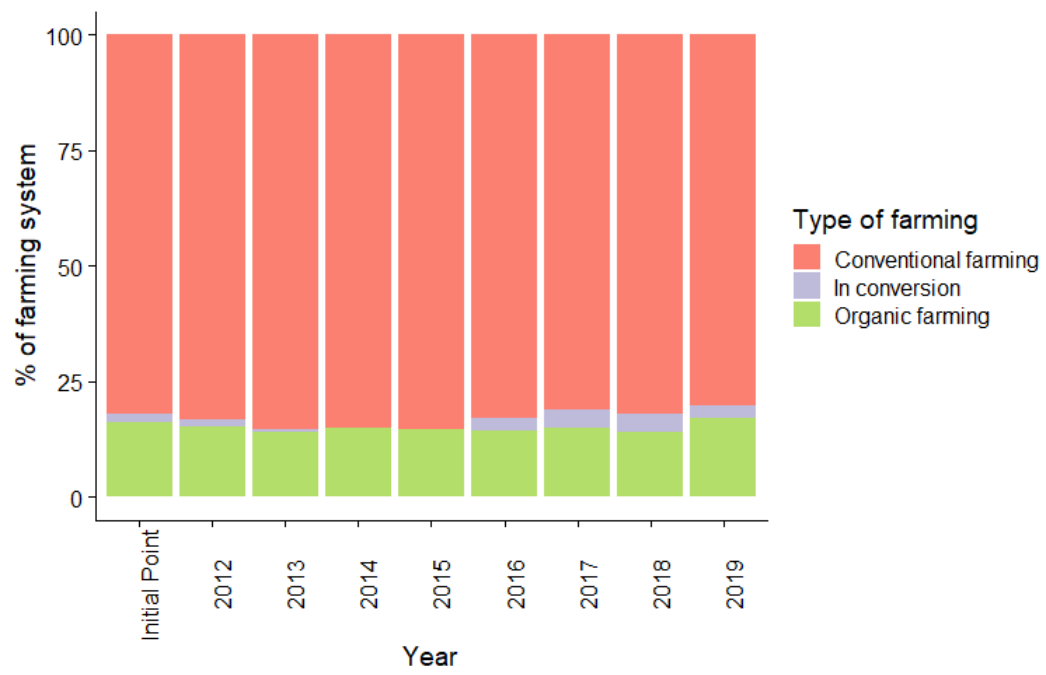


Figure B.1 Percentage of type of farming per year

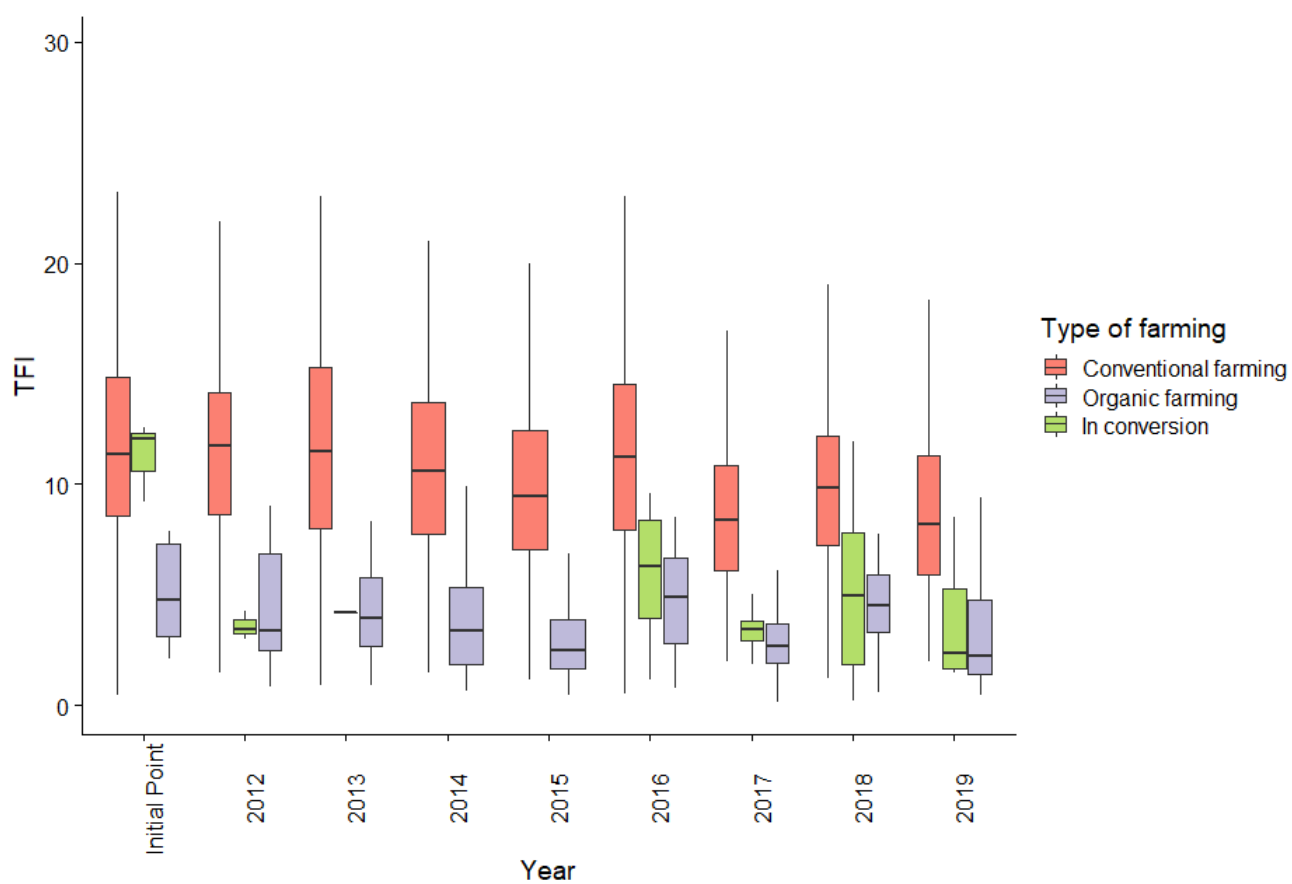


Figure B.2 Evolution of TFI depending on the type of farming

Table B.4 Coefficient of variation of the TFI_f over space and time

Spatial CV	
Initial Point	48.0
2012	54.8
2013	51.1
2014	47.2
2015	55.4
2016	50.8
2017	54.3
2018	40.6
2019	80.3
Temporal CV	
Alsace	50.3
Bordeaux	44.3
Bouches-Du-Rhône	38.3
Burgundy	47.2
Bugey-Savoie	56.5
Champagne	58.9
Charente	35.5
Côtes-du-Rhône-Sud	31.4
Gaillac	32.6
Languedoc	37.5
Provence	50.5
Loire Valley	37.4

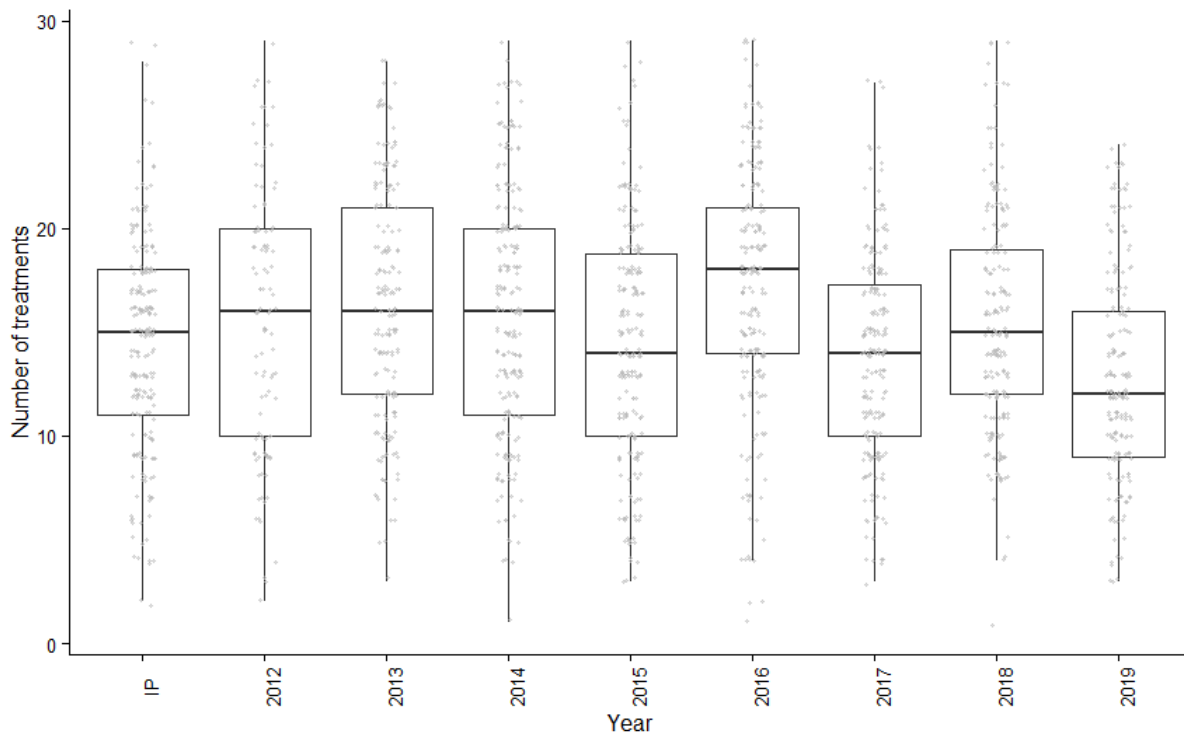


Figure B.3 Evolution of the number of treatments over time. P-value < 0.05 , the p-value correspond to the results of the linear model (see Eq(2))

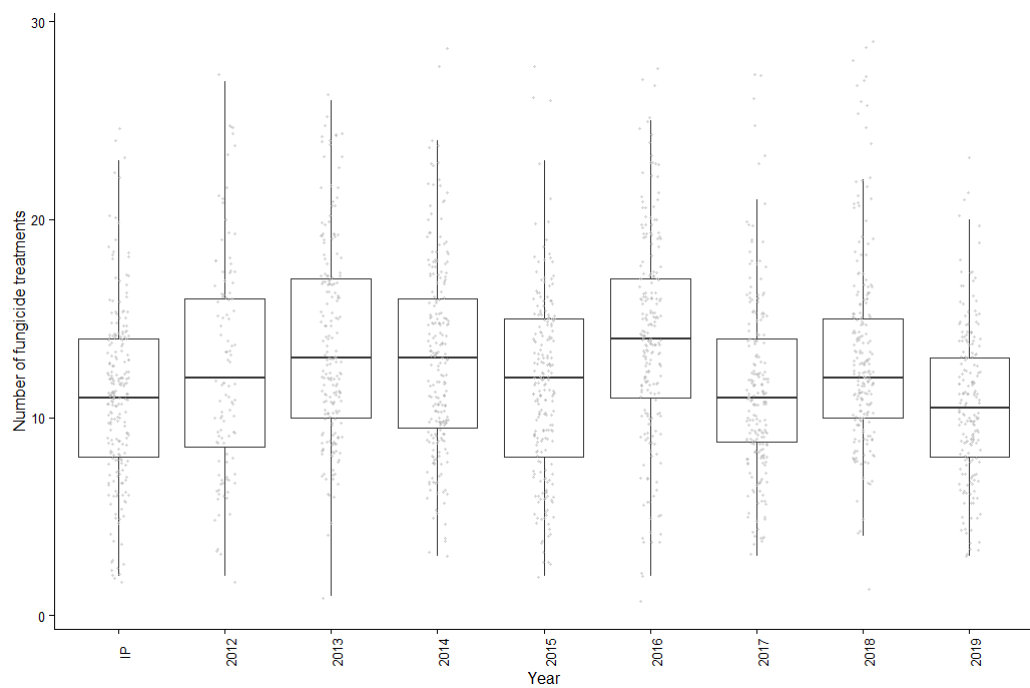


Figure B.4 Evolution of the number of fungicides treatment. P-value = 0.64, the p-value correspond to the results of the linear model (see Eq(2))

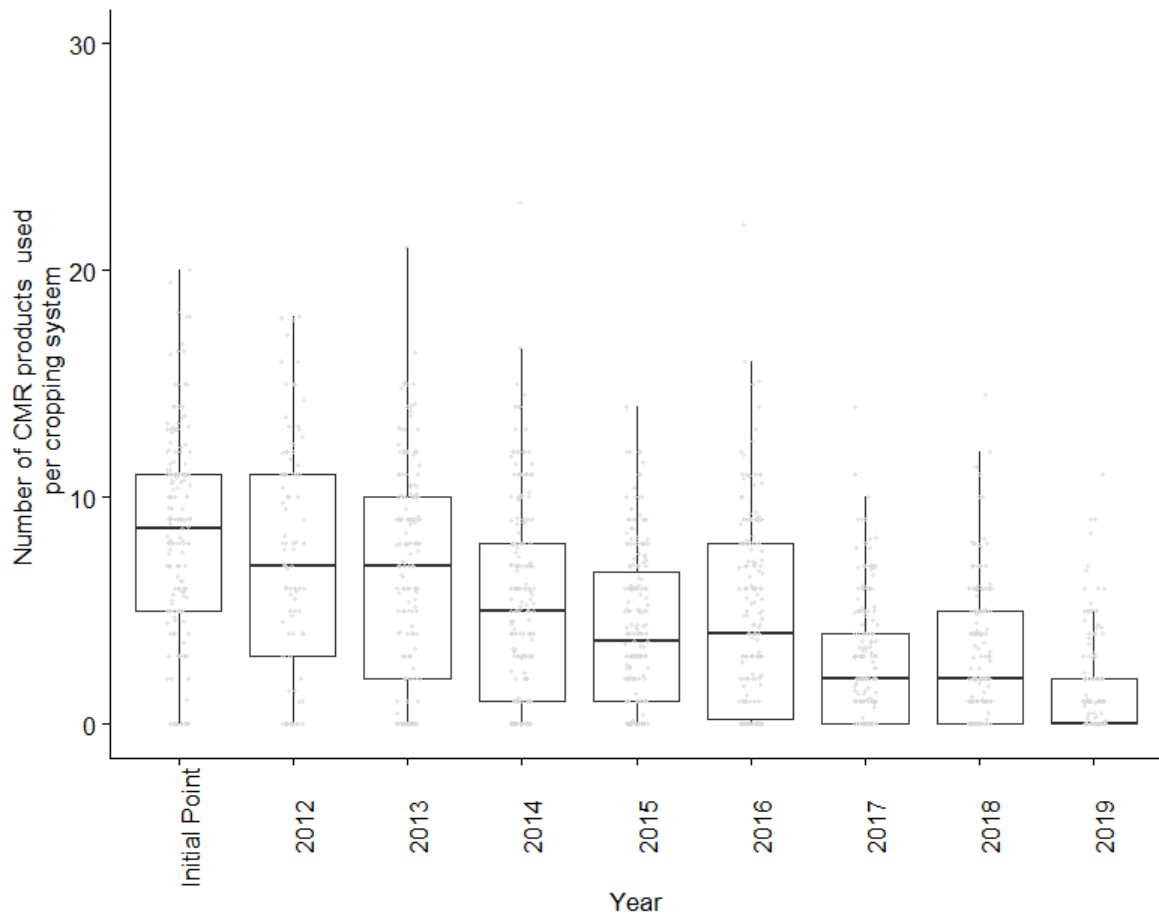


Figure B.5 Evolution of the number of CMR product used per farming system. P-value < 0.001 , the p-value correspond to the results of the linear model (see Eq(2))

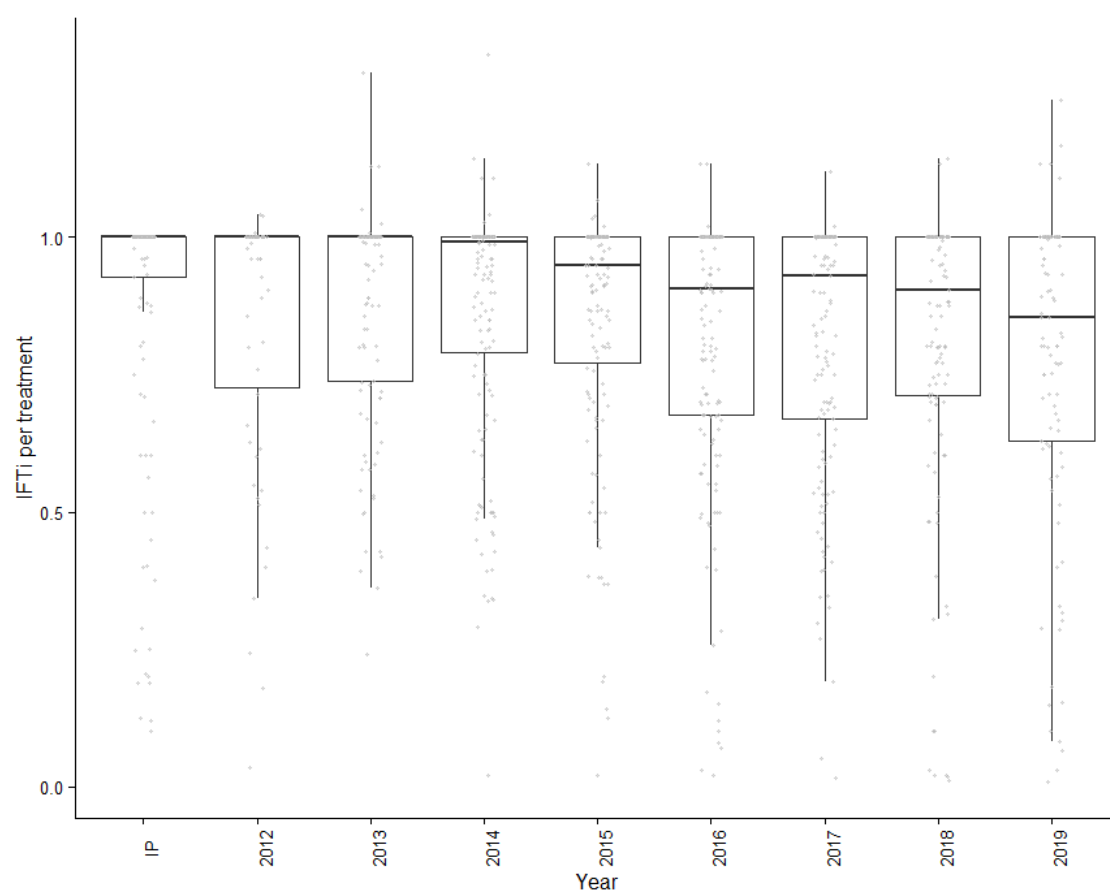


Figure B.6 Evolution of the TFI_i per treatments. P-value = 0.84, the p-value correspond to the results of the linear model (see Eq(2))

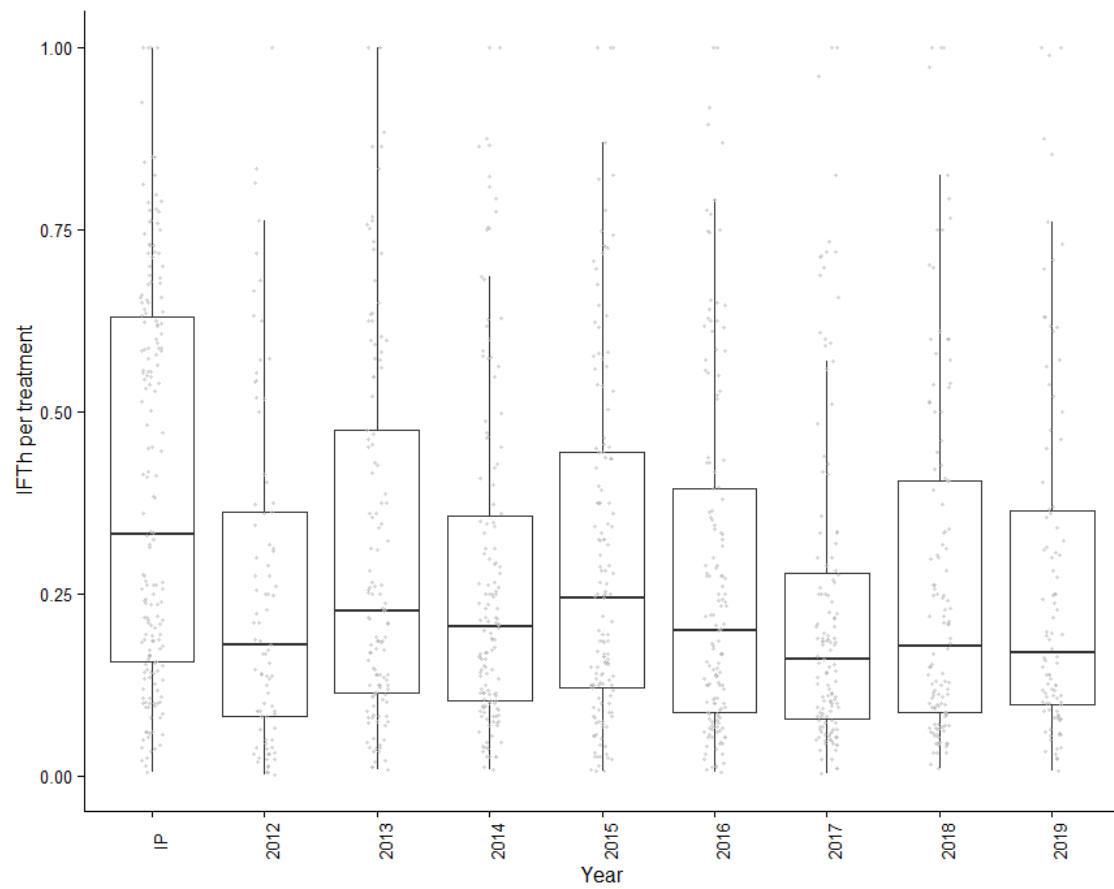


Figure B.7 Evolution of the TFI_h per treatments. P-value < 0.01 , the p-value correspond to the results of the linear model (see Eq(2))

Annexe C

Supplementary material chapter 4

Table C.1 Description of the variables used for the study

Name of the variable	Definition	Variable status	Unit	Database
Year	Year of the intervention	quantitative	year	Agrosyst
Date	Date of the intervention	quantitative	days-month	Agrosyst
Cropping system	Name of the cropping system	qualitative	Ø	Agrosyst
Winegrowing region	Winegrowing region for a given cropping system	qualitative	Ø	Agrosyst
Type of agriculture	Type of farming : conventional, organic farming or in conversion	qualitative	Ø	Agrosyst
Product_Name	Name of the sprayed product	qualitative	Ø	Agrosyst
Dose sprayed	Dose sprayed	quantitative	$kg\,ha^{-1}$ or $L\,ha^{-1}$ or $Unite\,ha^{-1}$	Agrosyst
Dose recommended	recommended doses per product and per target pest/disease	quantitative	$kg\,ha^{-1}$ or $L\,ha^{-1}$ or $Unite\,ha^{-1}$	E-phy
Type of product	Type of product sprayed : insecticide, fungicide or insecticide	qualitative	Ø	Agrosyst
Target	Targeted pest (downy mildew, weeds. . .)	qualitative	Ø	Agrosyst
Area sprayed	Area concerned by the treatment (ratio)	quantitative	Ø	Agrosyst
Area total	Total area on the field	quantitative	Ø	Agrosyst
Biocontrole	1 if the product is a biocontrol product, 0 if not	qualitative	Ø	E-phy
Number of CMR product	Number of CMR product used in a cropping season	quantitative	Number of product	Agrosyst
Yield	yield observed for a given year	qualitative	$hL\,ha^{-1}$	Agrosyst

Table C.2 Description of the variable used to characterized the three clusters

Name of the variable	Definition	Variable status	Unit
TFI per treatment	TFI for a treatment. This variable is separate by target (fungicide, herbicide, insecticide)	quantitative	Ø
TFIh	TFI for the herbicide products sprayed	quantitative	Ø
TFIi	TFI for the insecticide products sprayed	quantitative	Ø
TFIf	TFI for the fungicide products sprayed	quantitative	Ø
Number of CMR product	Number of CMR product used in a cropping season	quantitative	Number of products
Quantity of copper sprayed	Quantity of copper sprayed over a given year	quantitative	gha^{-1}
Quantity of sulfur sprayed	Quantity of sulfur sprayed over a given year	quantitative	gha^{-1}
Biocontrole rate	Share of TFI biocontrol over the total TFI (chemical and biocontrol) for a given year	qualitative	Ø

Table C.3 Distribution of calculated indicators for the 3 identified clusters

	Statistical test	p-value	Cluster 1 (n=75) $\bar{X} \pm SD$	Cluster 2 (n=53) $\bar{X} \pm SD$	Cluster 3 (n=33) $\bar{X} \pm SD$
Initial TFI	Kruskal-Wallis	<0.001	0.95 ± 0.42	0.79 ± 0.52	1.7 ± 0.52
Final TFI	ANOVA	<0.001	10.1 ± 2.8	4.9 ± 2.22	8.3 ± 3.2
Slope	ANOVA	<0.001	-0.24 ± 0.43	-0.33 ± 0.43	-1.36 ± 0.25
Max_var	Kruskal-Wallis	<0.001	0.34 ± 0.16	0.87 ± 0.6	0.42 ± 0.26
SSD	Kruskal-Wallis	<0.001	14.5 ± 14.9	17.8 ± 18.5	113.1 ± 43.5
Slope change	Kruskal-Wallis	<0.001	0.69 ± 2.74	-1.0 ± 2.55	-1.78 ± 3.27

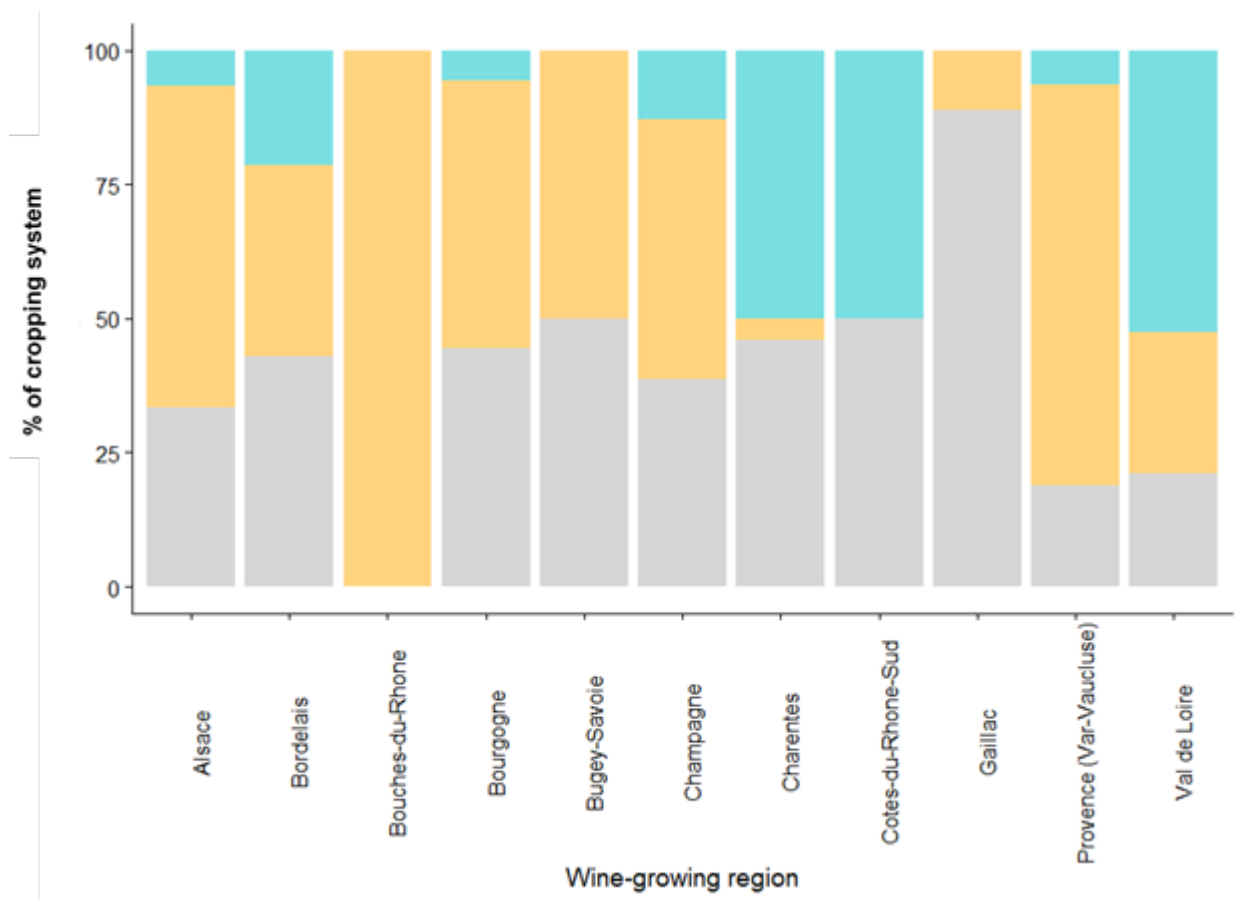


Figure C.1 Distribution of farm depending on the winegrowing region and the identified clusters

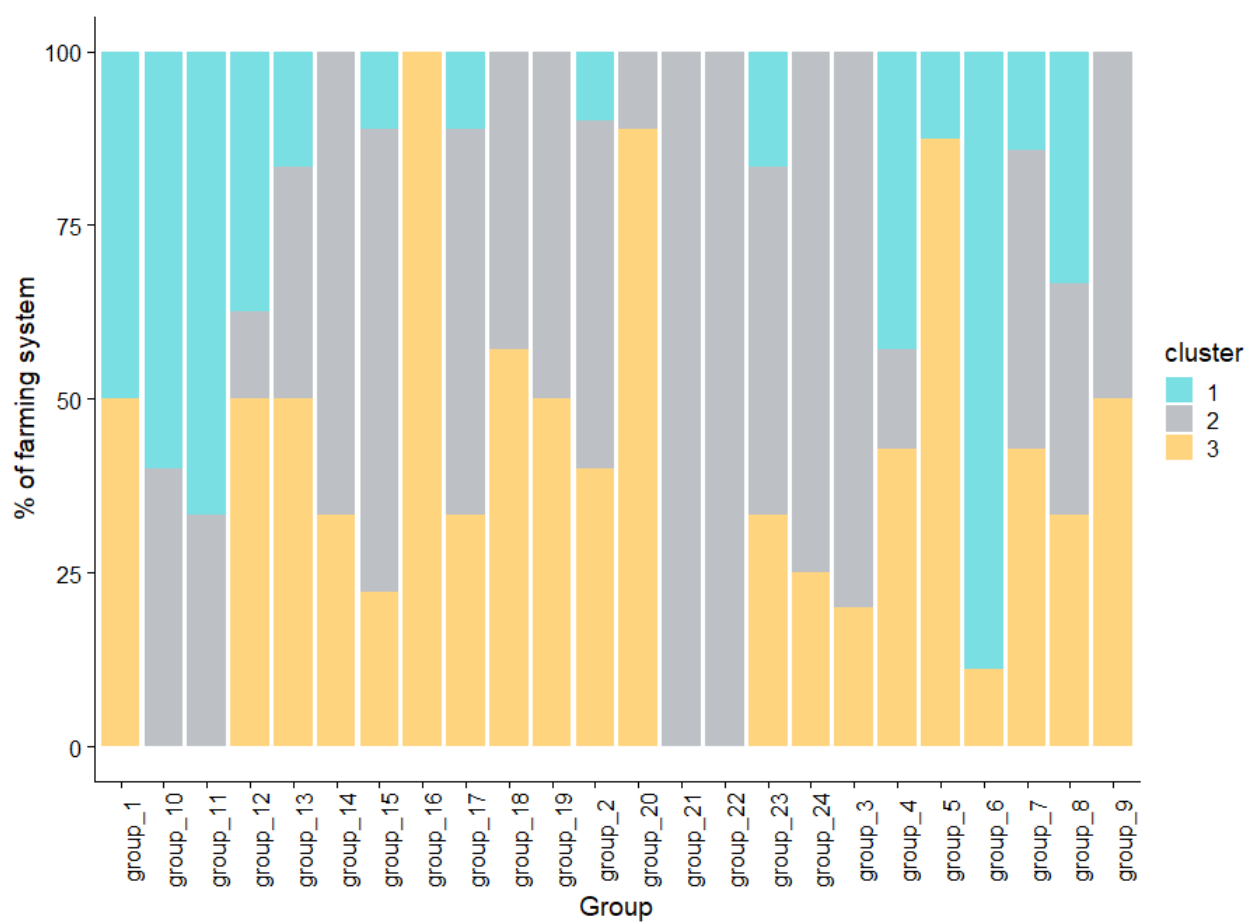


Figure C.2 Distribution of the farm depending on the DEPHY-group and the cluster

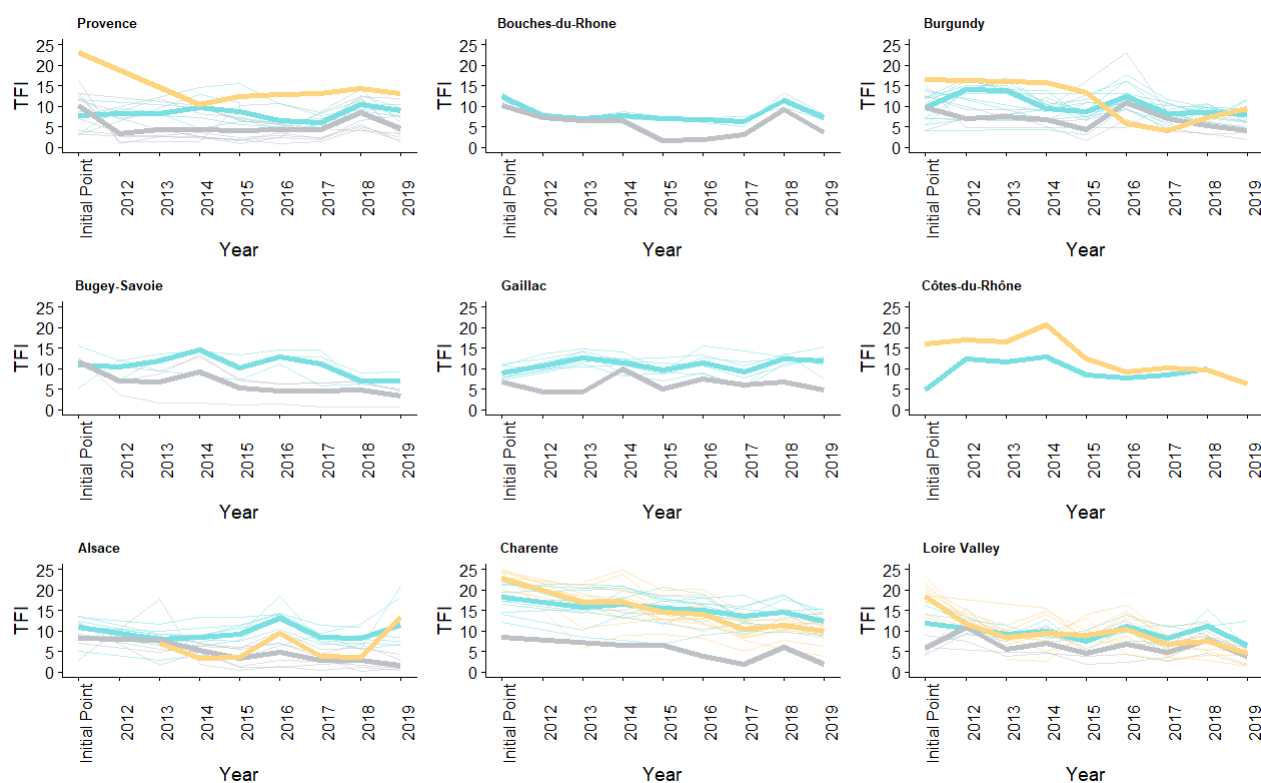


Figure C.3 Evolution of the TFI per cluster depending on the wine-growing region

Annexe D

Supplementary material chapter 6

Table D.1 Levers identified in the interviews with related target and compartment (1)

Lever	Target	Compartment
Stopping the use of CMR products in favor of pesticide chemical products remaining on the same target	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Replacement of some CMR products by phytosanitary products	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Stop using CMR products in favor of copper products, biocontrol while remaining on the same target	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Replacement of neonicotinoids with another insecticide	Insecticides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Stopping the use of antibotrytis products (not replaced by another practice)	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Stopping the use of grape moth treatments (not replaced by another practice)	Insecticides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Replacement of some chemical pesticides by biocontrol products	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Reduction in the number of anti-botrytis treatments	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Replacement of antibotrytis treatment by leaf removal	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Introduction of foliar fertilizer to decompact the bunches and avoid antibotrytis treatments	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Replacement of chemical pruning by manual or mechanical pruning	Herbicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Increase in the number of biocontrol treatments (sulfur...)	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Introduction of natural defenses stimulators in the treatment program combined with biocontrol	Total	Phytosanitary treatment against pest and disease
Use of lime against budworms to limit insecticide treatments	Insecticides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Replacement of chemical insecticides products by sexual confusion	Insecticides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Replacement of chemical insecticides products with biological control (trichogramma)	Insecticides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Replacement of chemical insecticides products to control green leafhoppers with clay	Insecticides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Introduction of copper products into the treatment program	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Increase in the number of copper treatments replacing chemical plant protection products	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Replacement of certain plant protection products with copper-based foliar fertilizer	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Use of a product containing less sulfur	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Use of a wetting agent to reduce the sprayed dose	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Fungicide reduction linked to PCR test on grape leaves to detect the presence of powdery mildew (Trial with a technical institute)	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Stopping the use of systemic products	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Use of Decision Support Tools	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Dose reasoning (without DSS)	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Increase of copper doses	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Reduction of sulfur doses	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Decrease in the amount of copper applied	Fongicides	Phytosanitary treatment against pest and disease
Reduction of the number of rows treated with the sprayer	Total	Phytosanitary treatment against pest and disease
Optimization of sprayer settings	Total	Phytosanitary treatment against pest and disease
Switching to confined spraying	Total	Phytosanitary treatment against pest and disease
Switch to face-to-face spraying	Total	Phytosanitary treatment against pest and disease
Installation d'une station phyto	Total	Phytosanitary treatment against pest and disease
Purchase of equipment to be able to treat faster (in addition to the current equipment)	Total	Phytosanitary treatment against pest and disease
Rinsing the sprayer tanks in the plots	Total	Phytosanitary treatment against pest and disease

Table D.2 Levers identified in the interviews with related target and compartment (2)

Lever	Target	Compartment
Trial of seeding under the row to limit tillage	Herbicides	Row managment
Mechanical work under the row following a stop of herbicides	Herbicides	Row managment
Mechanical work under the row following a reduction of herbicides	Herbicides	Row managment
Use of biocontrol herbicide products to replace chemical herbicides	Herbicides	Row managment
Stopping the use of root weeding	Herbicides	Row managment
Stopping antigerminants	Herbicides	Row managment
Test of electric weeding	Herbicides	Row managment
Sowing of cover crop in the inter-row following a stop of herbicides	Herbicides	Inter-row management
Sowing cover crop on the inter-row in addition to mechanical weeding	Herbicides	Inter-row management
Spontaneous cover on IR following herbicide cessation	Herbicides	Inter-row management
Spontaneous cover on IR (in addition to tillage)	Herbicides	Inter-row management
Mechanical work on the inter-row linked to a stop of herbicides	Herbicides	Inter-row management
Increase of the areas sown with cover crops	Herbicides	Inter-row management
Reflection on seeding managment	Herbicides	Inter-row management
Grazing with sheep in the inter-row	Herbicides	Inter-row management
Change of the canopy destruction modality	Herbicides	Inter-row management

Table D.3 Levers identified in the interviews with related target and compartment (3)

Lever	Target	Compartment
Staggered pruning to avoid treatments	Other	Vineyard
Increased selection of branches (pruning)	Other	Vineyard
Soft pruning as a lever against wood diseases	Other	Vineyard
Change of the pruning method for a better aeration of the bunches	Other	Vineyard
Raising of the trellis wires for a better aeration of the bunches	Other	Vineyard
Installation of hedges around the plots	Other	Agrobiodiversity
tits and bat shelters	Other	Agrobiodiversity
Purchase of plots closer to the farm and removal of distant plots	Other	Organisation
Planting of resistant grape varieties	Other	Organisation
Abandonment of frozen plots and purchase of plots on the hillsides	Other	Organisation

RÉSUMÉ

Analyse des changements de pratiques, de leurs trajectoires et des performances associées dans les systèmes viticoles du réseau DEPHY

La transition vers des systèmes agricoles à faible utilisation de pesticides est une étape clé pour améliorer la durabilité de la viticulture. Les viticulteur·ice·s doivent changer leurs pratiques pour réduire durablement leur utilisation d'intrants. Un grand nombre de pratiques agroécologiques existent déjà mais les agriculteur·ice·s peuvent rencontrer des difficultés lors de leur mise en œuvre.

Cette thèse en agronomie propose d'étudier les mécanismes de changements de pratiques dans le temps et leurs impacts sur la dynamique des performances, en focalisant cette étude sur des viticulteur·ice·s engagé·e·s dans une démarche de réduction des pesticides, dans le but de mieux comprendre et accompagner la transition agroécologique. Ce travail est fondamental pour identifier les trajectoires conduisant à des stratégies de gestion associées à un faible usage de pesticides au sein de la viticulture conventionnelle mais aussi au sein de la viticulture biologique.

Elle propose une démarche originale combinant analyse de base de données et enquêtes de viticulteur·ice·s engagé·e·s au sein du réseau DEPHY. Sur la base des données du réseau national DEPHY, une évaluation des performances techniques, économiques et environnementales des viticulteur·ice·s et leurs trajectoires a été faite. Ces analyses ont permis de démontrer que les fermes DEPHY réduisaient leur IFT de 33% en moyenne sans que cette baisse n'impacte les rendements. Dans un deuxième volet complémentaire, une analyse des changements de pratiques mis en œuvre par les viticulteur·ice·s pour réduire les intrants et améliorer leurs performances environnementales a été réalisée par enquêtes. Nous avons montré que les leviers étaient implémentés pas-à-pas et reposaient principalement sur de l'efficacité et de la substitution. L'étude des trajectoires de pratiques a permis l'identification d'une trajectoire générique conduisant à une réduction des pesticides.

L'approche mise en place au cours de ce travail de thèse a permis de produire des résultats génériques à l'échelle de la filière vigne grâce à la combinaison d'analyses sur base de données nationale à large échelle et d'analyses plus spécifiques à l'échelle de l'exploitation suite aux enquêtes. Le faible niveau de reconception observé soulève des questions sur l'accompagnement des viticulteur·ice·s au cours de leur démarche de réduction des pesticides mais aussi sur la production de connaissances sur les pratiques innovantes.

Mots clefs : transition agroécologique, réseau de ferme, trajectoire, réduction des pesticides, *Vitis vinifera*

ABSTRACT

Analysis of changes in practices, their trajectories and associated performances in the DEPHY network winegrowing systems

Transition towards low pesticide farming systems is a key issue to improve viticulture sustainability. Farmers have to gradually change their practices to engage in this transition. A large number of agroecological practices are already existing but farmers can encounter obstacles during their implementation.

This thesis in agronomy proposes to study the mechanisms of changes of practices over time and their impacts on the dynamics of performance by focusing on winegrowers committed to a pesticide reduction approach, in order to better understand and support the agroecological transition. This work is fundamental to identify the trajectories leading to management strategies associated with low pesticide use in conventional viticulture but also in organic viticulture.

It proposes an original approach combining database analysis and surveys of winegrowers involved in the DEPHY network. On the basis of data from the national DEPHY network, an evaluation of the technical, economic and environmental performance of the winegrowers and their trajectories was carried out. These analyses showed that the DEPHY farms reduced their IFT by 33% on average without this reduction affecting yields. In a second complementary part, an analysis of the changes in practices implemented by the winegrowers to reduce inputs and improve their environmental performance was carried out by surveys. We showed that the levers were implemented step by step and were mainly based on efficiency and substitution. The study of practice trajectories allowed the identification of a generic trajectory leading to a reduction of pesticides.

The approach proposed during this thesis allowed to produce generic results at vineyard sector scale by combining analyses on a large-scale national database and more specific analyses at the farm level with surveys. The low level of redesign observed raises questions about the support given to winegrowers during their pesticide reduction process, but also about the production of knowledge on innovative practices.

Mots clefs : agroecological transition, farm network, trajectory, pesticide use reduction, *Vitis vinifera*.