



**HAL**  
open science

**Réduire les pesticides en viticulture? Co-conception, expérimentation à la ferme et co-évaluation de stratégies de protection du vignoble moins dépendantes des pesticides avec la participation de viticulteurs coopérateurs du Sud -Ouest de la France**

Mickaël Perez

► **To cite this version:**

Mickaël Perez. Réduire les pesticides en viticulture? Co-conception, expérimentation à la ferme et co-évaluation de stratégies de protection du vignoble moins dépendantes des pesticides avec la participation de viticulteurs coopérateurs du Sud -Ouest de la France. Agronomie. Institut Agro Montpellier; Université de Montpellier, 2024. Français. NNT : . tel-04903413

**HAL Id: tel-04903413**

**<https://hal.inrae.fr/tel-04903413v1>**

Submitted on 21 Jan 2025

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

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

# 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 mixte de recherche ABSys

Réduire les pesticides en viticulture ?  
Co-conception, expérimentation à la ferme et co-  
évaluation de stratégies de protection du vignoble moins  
dépendantes des pesticides avec la participation de  
viticulteurs coopérateurs du Sud-Ouest de la France

Présentée par Mickaël PEREZ  
Le 02 Décembre 2024

Sous la direction de Aurélie METAY  
et l'encadrement de Marie-Hélène ROBIN

Devant le jury composé de

Marie THIOULET-SCHOLTUS, Ingénieur de recherche, INRAE  
Ivan SACHE, Professeur, AgroParisTech  
Sébastien ZITO, Docteur, INRAE  
Frédéric NORMAND, Chargé de recherche, CIRAD  
Aurélie METAY, Professeure, Institut Agro Montpellier  
Marie-Hélène ROBIN, Professeure, EI PURPAN  
Pauline LACAPELLE, Responsable R&D, VINOVALIE R&D

Rapporteuse  
Rapporteur et président du jury  
Examineur  
Examineur  
Directrice de thèse  
Co-encadrante de thèse  
Invitée



UNIVERSITÉ  
DE MONTPELLIER

L'INSTITUT  
agro Montpellier



# Avant-propos

Cette thèse CIFRE a été réalisée de novembre 2020 à novembre 2024. L'entreprise d'accueil est la filiale de Recherche et Développement VINOVALIE R&D de la coopérative VINOVALIE et les deux laboratoires de recherche sont l'UMR ABSys et l'UMR AGIR. Au cours des quatre années, la majorité de mon temps (90%) a été passé au sein de la coopérative pour mener à bien ce travail. Ce travail a été cofinancé par la région Occitanie au travers du projet VITI OBS et l'Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie.

Cette thèse a été dirigée par Christian Gary (UMR ABSys) au cours de la première année puis par Aurélie Metay (UMR ABSys) et co-encadrée par Marie-Hélène Robin (UMR AGIR). Au sein de l'entreprise d'accueil, l'encadrement a été réalisé par Pauline Lacapelle. Cette thèse a bénéficié des conseils avisés des membres du comité de suivi individuel au cours de trois réunions : Sylvaine Simon, Laure Hossard, Pierre-Eric Lauri, Pierre Casadebaig et Philippe Tixier.

## Valorisation des travaux de thèse

### Article publié dans une revue à comité de lecture

Perez M, Hossard L, Gary C, Lacapelle P, Robin MH, Metay A, 2024. A participatory approach to involve winegrowers in pesticide use reduction in viticulture in the south-western region of France. *Ital. J. Agron.* 18:2209. DOI: <https://doi.org/10.4081/ija.2023.2209>

Perez M., METAY A., METRAL R., Gary C., Lacapelle P, Robin MH, (*in prep.*). Agronomic performances and fungicides costs of co-designed management strategies to reduce pesticide use in the south-western region of France.

### Communication et poster dans des Congrès

Participation à la Conférence OF2 2021 (Congrès international)

Acceptation pour une présentation Poster au Congrès de l'ESA à Postdam en 2022 de l'article « A participatory approach to involve winegrowers in pesticide use reduction in viticulture in the south-western region of France ». Mais je n'ai pas pu m'y rendre pour raisons professionnelles car les vendanges des parcelles expérimentales débutées au moment du congrès et que je devais être présent dans les vignes pour la bonne réalisation de celle-ci. Je suis en train de soumettre deux contributions pour le congrès du GIESCO qui aura lieu en juillet 2025.

### Diffusion des résultats de la thèse

Résultats des essais 2021. Décembre 2021 à l'occasion du bilan de vendange de chacune des caves de la coopérative VINOVALIE. Gaillac, Cahors et Fronton.

Résultats des essais 2022. Décembre 2022 à l'occasion du bilan de vendange de chacune des caves de la coopérative VINOVALIE. Gaillac, Cahors et Fronton.

## Stages encadrés et mémoires associés

Wang, X. (2021). *Modélisation des effets des pratiques culturales, du climat et de l'environnement de la parcelle sur la maladie oïdium pour la prévision des dégâts de la vigne* [Mémoire de fin d'études]. Université de Reims Champagne-Ardenne.

Farra, S. (2022). *Modélisation qualitative des facteurs épidémiologiques de Guignardia bidwellii, pathogène responsable du Black rot, pour la prédiction des dégâts sur la vigne* [Mémoire de fin d'études]. UFR de Sciences et Technologies de Reims.

Kebe, A. (2023). *Modélisation qualitative des facteurs épidémiologiques de P.viticola, champignon responsable du mildiou de la vigne, pour la prédiction des dégâts sur grappes* [Mémoire de fin d'études]. Université de Picardie Jules Verne.

# Remerciements

Je remercie l'ensemble des personnes qui m'ont accompagné dans ce très long travail débuté en Novembre 2020.

# Table des matières

Avant-propos.....	ii
Remerciements .....	iv
Table des figures.....	ix
Table des tableaux.....	xii
Liste des sigles et abréviations .....	xiv
Introduction générale.....	1
PARTIE I État de l’art et problématique de recherche .....	3
1 Un constat d’échec de la réduction de l’utilisation des pesticides .....	4
1.1 L’utilisation des pesticides et les problèmes liés à leur utilisation en agriculture et en viticulture .....	4
1.2 Une tentative infructueuse de réduction de l’utilisation des pesticides .....	8
2 Les principales maladies fongiques considérées dans la thèse.....	10
2.1 Le mildiou .....	10
2.2 L’oïdium .....	11
2.3 Le black rot .....	13
3 Les leviers disponibles en viticulture et leur efficacité relative pour réduire le recours des pesticides .....	15
3.1 Les leviers classés selon le cadre ESR .....	15
3.2 Un état des lieux des leviers réellement mobilisés par les viticulteurs dans une démarche de réduction des pesticides.....	20
3.3 La combinaison de ces leviers pour permettre une réduction de l'utilisation des pesticides	24
3.4 Les freins au déploiement des leviers de réduction de l'utilisation des pesticides dans les vignobles.....	25
4 La conception et l’évaluation de système de culture à bas niveaux de pesticides : .....	27
4.1 Le cadre conceptuel de la conception de système de culture .....	27
4.2 L’évaluation des systèmes issus d’une démarche de conception .....	29
5 La modélisation pour accompagner les viticulteurs sur la réduction de l’utilisation des pesticides .....	31
5.1 Des exemples de modèles développés pour chacune des trois maladies : mildiou, oïdium et black rot.....	31
5.2 Les OAD mobilisant des modèles disponibles pour les viticulteurs français.....	33
5.3 La modélisation qualitative pour prendre en compte l’ensemble des facteurs influençant le développement des maladies .....	33

6 Définition de la problématique .....	35
PARTIE II Contexte de la thèse et démarche générale de la thèse .....	37
1 Contexte de la thèse : trois vignobles du Sud-Ouest de la France (Cahors, Fronton et Gaillac) et la coopérative VINOVALIE, un acteur majeur du Sud-Ouest .....	38
1.1 Présentation de la zone d'étude .....	38
1.2 Présentation de VINOVALIE, un acteur majeur du Sud-Ouest .....	39
2 Démarche générale de la thèse.....	40
2.1 Les ateliers de co-conception et de co-évaluation.....	41
2.2 L'expérimentation à la ferme .....	42
2.3 La modélisation .....	44
PARTIE III Résultats.....	46
Chapitre 1 : A participatory approach to involve winegrowers in pesticide use reduction in viticulture in the South-Western region of France.....	47
Abstract .....	48
1. Introduction.....	48
2. Materials and Methods .....	50
2.1 Study area.....	50
2.2 Methodological approach .....	52
3. Results .....	59
3.1 Co-design and co-validation of the management strategies (steps A.1 and A.2) .....	59
3.2 Implementation and co-evaluation of the strategies (steps B and C.2).....	61
4. Discussion .....	63
4.1 A participatory approach that allows the involvement of diverse stakeholders and a strong commitment from winegrowers .....	64
4.2 A participatory approach that allows a significant reduction in the use of pesticides based on limited innovation levers.....	65
4.3 Relevance and limitations of the method for large-scale adoption of these management strategies .....	66
5. Conclusion .....	67
Chapitre 2 : Agronomic performances and fungicides costs of co-designed management strategies to reduce pesticide use in the South-Western region of France.....	68
Abstract .....	69
1. Introduction.....	69
2. Material and methods.....	71
2.1 Study area.....	71
2.2 Characteristics of the years .....	72
2.3 Characteristics of the co-designed management strategies and implementation by winegrowers.....	72

2.4 Data collected to evaluate the performance of the management strategies.....	74
2.5 Data analysis.....	75
3. Results .....	76
3.1 The four management strategies led to a significant reduction in pesticide use .....	76
3.2 Three management strategies resulted in satisfactory disease control .....	80
3.3 A compromise between reducing pesticide use, preserving yield, and controlling fungicide cost .....	82
4. Discussion .....	84
4.1 Co-designed management strategies have successfully reduced the pesticide use (TFIt) by decreasing the fungicide use (TFIf) .....	85
4.2 Co-designed management strategies have successfully controlled diseases .....	86
4.3 In most situations, co-designed management strategies have successfully maintained yields while reducing the cost of fungicides.....	86
4.4 Discussion about the method of OFE .....	87
4.5 Perspectives for further adoption of the management strategies .....	88
5. Conclusion .....	89
Acknowledgments .....	90
Chapitre 3 : Modélisation qualitative des facteurs influençant le développement de trois maladies de la vigne (mildiou, oïdium et black rot) pour la prédiction des dégâts sur les grappes de la vigne .....	91
1. Modélisation qualitative des facteurs influençant le développement de <i>Guignardia bidwellii</i> , pathogène responsable du Black rot, pour la prédiction des dégâts sur les grappes de la vigne ....	92
Résumé .....	92
1.1 Introduction.....	92
1.2 Matériel et méthodes.....	94
1.3 Résultats .....	98
1.4 Discussion .....	104
1.5 Conclusion .....	107
Remerciements .....	108
2. Les autres modèles développés dans le cadre de la thèse .....	109
2.1 IPSIM-VIGNE-Mildiou : construction et évaluation .....	109
2.2 IPSIM-VIGNE-Oïdium : en cours de construction .....	119
2.3 Discussion globale de la partie modélisation .....	127
PARTIE IV Discussion générale .....	130
1 Discussion des résultats de la thèse .....	131
1.1 Une démarche de co-conception aboutissant à des stratégies de protection du vignoble mobilisant l'efficacité et la substitution (cadre ESR) pour réduire l'utilisation des pesticides ..	131
1.2 Des stratégies de protection du vignoble qui ont permis de réduire l'utilisation des pesticides et en particulier les fongicides .....	132

1.3 Des stratégies de protection du vignoble qui ont permis de maintenir le rendement grâce à une bonne protection de la vigne et de limiter le coût des fongicides.....	133
1.4 Des modèles IPSIM-VIGNE qui demandent une phase d'amélioration .....	134
2 Retour sur la démarche mise en place et les différentes méthodes utilisées .....	135
2.1 Une démarche pertinente pour répondre aux objectifs fixés.....	135
2.2 Une démarche robuste mais comportant des limites.....	137
3. Perspectives.....	138
3.1 Deux axes de travail pour atteindre l'objectif de réduction des pesticides fixé aux stratégies de protection du vignoble « Raisonné » et « 0 Résidu ».....	138
3.2 Un accompagnement efficace des viticulteurs pour allier réduction de l'utilisation des pesticides et atteinte des objectifs de production.....	140
3.3 Un besoin de valoriser les démarches de réduction des pesticides auprès du consommateur pour une valorisation des efforts des viticulteurs et pour rechercher une meilleure valorisation commerciale pour la coopérative .....	143
Conclusion générale .....	146
Références bibliographiques.....	148
Annexe.....	171
Annexe A : Rapport annuel rendu aux viticulteurs chaque année.....	171
Résumé de la thèse .....	186

# Table des figures

Figure 1 : Consommation agricole de pesticides en millions de tonnes dans le monde de 1990 à 2021 (Statista, 2024a). .....	4
Figure 2 : Evolution de 2009 à 2022 des quantités totales en tonnes de substances actives vendues par type d'usages (Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation, le ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques et le ministère du Logement et de la Rénovation urbaine, 2022). .....	5
Figure 3 : Cycle de développement de <i>P.viticola</i> (Dubos, 2002). .....	11
Figure 4 : Cycle de développement de <i>E.necator</i> (Agrios, 2005). .....	12
Figure 5 : Cycle de développement de <i>G.bidwellii</i> . Schéma librement adapté de (Pirrello et al., 2019) et traduit de l'anglais par (Farra, 2022). .....	14
Figure 6 : Incrémentation des éléments nécessaires pour raisonner ses traitements en viticulture (Fersing, 2016). .....	15
Figure 7 : Les solutions agronomiques contre les agents pathogènes responsables de maladies pour réduire l'utilisation des fongicides (Barbier et al., 2011). .....	18
Figure 8 : Principaux leviers mobilisés dans des systèmes de culture visant à réduire l'utilisation des fongicides en agriculture biologique (AB) et en conventionnel, en nombre de systèmes de culture où le levier est mobilisé au moins une fois sur la période 2017-2020 (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b). .....	21
Figure 9 : Principaux leviers mobilisés dans des systèmes de culture visant à réduire l'utilisation des herbicides en agriculture biologique (AB) et en conventionnel, en nombre de systèmes de culture où le levier est mobilisé au moins une fois sur la période 2017-2020 (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b). .....	21
Figure 10 : Principaux leviers mobilisés dans des systèmes de culture visant à réduire l'utilisation des insecticides en agriculture biologique (AB) et en conventionnel, en nombre de systèmes de culture où le levier est mobilisé au moins une fois sur la période 2017-2020 (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b). .....	22
Figure 11 : Questions de recherche, objectifs de travail de la thèse et organisation des trois chapitres de la partie III Résultats. ....	36
Figure 12 : Carte des vignobles du Sud-Ouest (Interprofession des Vins du Sud-Ouest, 2024b). .....	39
Figure 13 : Démarche générale de la thèse et organisation du manuscrit (chapitres indiqués en bleu) .....	40
Figure 14 : Localisation des parcelles où les stratégies de protection du vignoble ont été mises en œuvre en 2021 et en 2022. Les trois ellipses représentent les limites de chaque région viticole (Cahors en rouge, Fronton en jaune et Gaillac en vert). Les symboles orange représentent les parcelles dédiées à la stratégie de protection du vignoble « Raisonné », les symboles vert clair ceux avec la stratégie « BIO à 2 kg de cuivre », les symboles vert foncé à la stratégie « 0 Résidu » et les symboles violets à la stratégie « Biocontrôle ». .....	43
Figure 15 : Schéma théorique d'une parcelle d'expérimentation distinguant la zone où est appliquée la stratégie de protection du vignoble co-construite (environ 0,25 hectare) et la zone où le viticulteur applique ses traitements habituels (minimum 0,25 hectare). .....	44
Figure 16 : Arbre d'agrégation d'un modèle IPSIM générique. ....	45
Figure 17 : Location of (A) the winegrowing areas in South-Western France included in the study and (B) the fields where management strategies were implemented in 2021. The three ellipses represent the boundaries of each winegrowing region (Cahors in red, Fronton in yellow, and Gaillac in purple).	

The orange symbols represent the fields dedicated to the IPM management strategy and the green symbols represent the fields with the ORG2kgCo management strategy. .... 51

Figure 18 : General framework of the participatory approach with its three main steps: A) Co-design and co-validation of the management strategies, B) Implementation of the management strategies and C) Co-evaluation of the performance of the implemented management strategies. The date of each step is written in month/year format. R&D, Research & Development; INRAE, French National Research Institute for Agriculture and Environment, Food and the Environment; IFV, French Institute of Vine and Wine. .... 52

Figure 19 : Disease control against downy, powdery mildews, black rot and botrytis of IPM management strategy as designed during the co-design workshop step A.1 of the method. The decision rules for applying a treatment are shown in orange and the product to apply in black. The black lines delimited the period to apply this product. DSS, Decision Support System. .... 60

Figure 20 : Insect control (grape berry moths, phytoplasma, green leafhopper) of the two management strategies as designed during the co-design workshop step A.1 of the method. The decision rules for applying a treatment are shown in orange and the product to apply in black. The black lines delimited the period to apply this product. PHN, Plant Health Newsletter (Bulletin de Santé du Végétal in french). .... 61

Figure 21 : Schedule of disease control against downy, powdery mildew, black rot, and botrytis of the 'IPM' management strategy as designed during the co-design workshop. Treatments are positioned according to the vine's phenological stage. The decision rules for applying a treatment are shown in orange and the product to apply or mechanical operation in black. The black lines delimit the period to apply this product. DSS = Decision Support System. .... 73

Figure 22 : Reduction of the TFI<sub>t</sub> in percent according to the management strategies compared to the VITI modality (a) and compared to the HEV reference (b) and reduction of the TFI<sub>f</sub> in percent according to the management strategies compared to the VITI modality (c) and compared to the HEV reference (d). The TFI<sub>f</sub> reduction was equal to -100% for the 'BCT' management strategy so it has not been shown in Figures 21C and 21D. Years are represented by a circle for 2021 and a triangle for 2022. Each dot (n=24 for Figure 21a and 21b / n=20 for Figure 21c and 21d) represents a couple (winegrower and year). The grey circle represents the average by management strategies associated with their standard deviation. In Figures 21a and 21c, the green line represents a non-reduction in TFI<sub>t</sub> compared with the VITI modality. In Figures 21b and 21d, the green line represents the target of 50% TFI reduction (TFI<sub>t</sub> = 7.49). IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol, HEV = High Environmental Value. .... 78

Figure 23: Comparison of the quantity of copper (kg per year) applied to the VITI modality compared to the quantity applied to the ORG2kgCo modality in 2021 (circle) and in 2022 (triangle). Each dot (n=13) represents a couple (winegrower and year). The blue x=y line shows if the 'ORG2kgCo' modality allowed a reduction in the amount of copper applied compared to the VITI modality, while the green line shows the management strategy target of 2kg of copper per year per hectare. ORG2kgCo = Organic with 2 kg of copper. .... 79

Figure 24: Differences (Intensity of management strategy - Intensity of VITI modality) in downy mildew intensity on leaves at the veraison stage according to the management strategies compared to the VITI modality (a), difference in downy mildew intensity on grapes at the veraison stage according to the management strategies compared to the VITI modality (b), and difference in black rot on grapes at the veraison stage according to the management strategies compared to the VITI modality (c). Years are represented by a circle for 2021 and a triangle for 2022. Each dot (n=34) represents a couple (winegrower and year). The grey circle represents the average by management strategies associated with their standard deviation. The green line represents the limit of the difference in intensity (5

points) defined as acceptable by the winegrowers during the co-design workshop. IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol, ORG2kgCo = Organic with 2 kg of copper.....	81
Figure 25: Comparison of the percentage of yield reduction compared to the VITI modality and the percentage of TFI reduction compared to the HEV reference or the percentage reduction in the amount of copper compared to 4kg/ha/year. Each dot (n=29) represents a couple (winegrower and year). The red line represents the target of 50% TFI reduction or 50% amount of copper reduction (2 kg/ha/year). The green line represents the limit of the yield loss percentage (-10%) defined as acceptable by the winegrowers during the co-design workshop. The green box represents a «win-win situation»: TFI or amount of copper reduced by 50% and yield loss below 10%. IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol, ORG2kgCo = Organic with 2 kg of copper, HEV = High Environmental Value. ....	83
Figure 26: Comparison of the percentage of fungicide cost reduction compared to the VITI modality and the percentage of TFI reduction compared to the HEV reference or the percentage reduction in the amount of copper compared to 4kg/ha/year. Each dot (n=32) represents a couple (winegrower and year). The red line represents the target of 50% TFI reduction or 50% amount of copper reduction (2 kg/ha/year). The green line represents the limit of no increase in the fungicide cost. The green box represents a «win-win» situation: TFI or amount of copper reduced by 50% and no increase of fungicide cost. IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol, ORG2kgCo = Organic with 2 kg of copper, HEV = High Environmental Value. ....	84
Figure 27 : Répartition des données composant la base de données selon la sévérité d'attaque du black rot sur grappe à véraison observée et l'année d'observation pour l'évaluation du modèle en août 2022. Une donnée représente une parcelle et une année. ....	96
Figure 28 : Organisation du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot (structure, attributs et valeurs d'échelle). A gauche, la structure hiérarchique du modèle est présentée. Les facteurs non en gras correspondent aux attributs d'entrée saisis par l'utilisateur. Les facteurs en gras sont les attributs agrégés. A droite, les valeurs d'échelle sont présentées pour chaque attribut de IPSIM-VIGNE-Black rot. Le rouge représente la valeur favorable au développement du mildiou et nuisible au développement des grappes. Le noir représente la valeur neutre. Le vert représente la valeur défavorable pour le développement du mildiou et favorable au développement des grappes de la vigne. ....	100
Figure 29 : Interface utilisateur développé sous VBA .....	104
Figure 30 : Organisation du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou (structure, attributs et valeurs d'échelle). A gauche, la structure hiérarchique du modèle est présentée. Les facteurs non en gras correspondent aux attributs d'entrée saisis par l'utilisateur. Les facteurs en gras sont les attributs agrégés. A droite, les valeurs d'échelle sont présentées pour chaque attribut de IPSIM-VIGNE-Mildiou. Le rouge représente la valeur favorable au développement du mildiou et nuisible au développement des grappes. Le noir représente la valeur neutre. Le vert représente la valeur défavorable pour le développement du mildiou et favorable au développement des grappes de la vigne. ....	111
Figure 31 : Répartition des données composant la base de données utilisée pour l'évaluation du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou selon la sévérité observée et l'année d'observation. ....	115
Figure 32 : Organisation du modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium (structure, attributs et valeurs d'échelle). A gauche, la structure hiérarchique du modèle est présentée. Les facteurs non en gras correspondent aux attributs d'entrée saisis par l'utilisateur. Les facteurs en gras sont les attributs agrégés. A droite, les valeurs d'échelle sont présentées pour chaque attribut de IPSIM-VIGNE-Oïdium. Le rouge représente la valeur favorable au développement du mildiou et nuisible au développement des grappes. Le noir représente la valeur neutre. Le vert représente la valeur défavorable pour le développement du mildiou et favorable au développement des grappes de la vigne. ....	123
Figure 33 : Modèle générique IPSIM pour une culture et trois bioagresseurs représentant les interactions sous DEXi (Aubertot & Robin, 2013). ....	129

Figure 34 : Démarche envisagée pour un déploiement à plus grande échelle des stratégies de réduction de l'utilisation des pesticides. ....	141
Figure 35 : Pur&quilibre, gamme Zéro résidu de Pesticides de Vinotalie - IGP Comté Tolosan (Vinotalie, 2022).....	145

## Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des leviers disponibles pour réduire l'utilisation des pesticides.....	22
Tableau 2 : Informations concernant les viticulteurs expérimentateurs et leur exploitation. Ha : hectare, IFTt : Indicateur de Fréquence de Traitement total hors produits de biocontrôle.....	42
Tableau 3 : Treatment frequency index (TFI) data per vineyard. Fronton was not concerned by the study in 2019.....	51
Tableau 4 : Type and role of participants in the three steps of the collaborative study. ....	53
Tableau 5 : Type and number of participants in the three steps of the collaborative study. *The number of winegrowers corresponds to the total number of participants, involved in the co-design of the four management strategies.....	54
Tableau 6 : Detailed content of the six sessions of Step A.1: Co-design of the management strategies. ....	55
Tableau 7 : Questions addressed to all participants (plain text) or winegrowers (italicised text) to co-evaluate the management strategies during the co-evaluation workshop (step C.2).....	58
Tableau 8 : Agronomic, ecological and economic indicators used for the field assessment.....	62
Tableau 9 : Collected data to calculate the performance indicators of the disease management strategies in the field network for each year. TFI <sub>t</sub> = Total Treatment Frequency Index, TFI <sub>f</sub> = Fungicide Treatment Frequency Index. ....	74
Tableau 10: Calculated indicators to evaluate the performance of the disease management strategies in the field network. TFI <sub>t</sub> = Total Treatment Frequency Index, TFI <sub>f</sub> = Fungicide Treatment Frequency Index, HEV = High Environmental Value.....	75
Tableau 11: TFI intervals of the VITI modality by conventional management strategies in 2021 and 2022. TFI <sub>t</sub> and TFI <sub>f</sub> are not significantly different (Kruskal test and Dunn test) between management strategies. IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol. ....	77
Tableau 12: Downy mildew and black rot intensities (in percentage) at the veraison stage of the VITI modality for each management strategy group in 2021 and 2022. For each winegrower, the experimental field was divided into two parts: one managed according to the co-designed management strategy (either 'IPM' or 'ORES' or 'BCT' or 'ORG2kgCo') and the other managed according to the usual strategy of the winegrower (VITI modality). IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol, ORG2kgCo = Organic with 2 kg of copper.....	80
Tableau 13 : Indicateurs statistiques utilisées pour la construction de la matrice de confusion du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot (évaluation de la qualité prédictive du modèle).....	97
Tableau 14 : Synthèse des facteurs influençant le développement du Black rot sélectionnés pour le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot .....	98
Tableau 15 : Convertisseur pour l'attribut « Vigueur du cépage » .....	100

Tableau 16 : Table d'agrégation de l'attribut « Niveau de risque sur grappe de la parcelle année N ».	101
Tableau 17 : Poids normalisés « local » et « global » pour les attributs du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot. Les poids « local » et « global » sont exprimés en %, indiqués pour chaque attribut et distribués en 5 niveaux d'agrégation ordonnés en colonnes. Les termes gras et non gras représentent respectivement les attributs agrégés et les attributs d'entrée. Par exemple, Concernant l'attribut agrégé « niveau de risque sur grappe de la parcelle année N » est expliqué à 71% par l'attribut agrégé « Niveau de risque d'inoculum historique » et à 29% par l'attribut agrégé « Pression annuelle sur grappe dans le vignoble ». Chaque point supplémentaire en amont du nom de l'attribut correspond à un niveau inférieur au précédent.	101
Tableau 18 : Matrice de confusion du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot et distribution des données. Nombres en italique : pourcentage des données sur un total de 82 données. Vert : modélisations parfaites (0 classe de différence entre données observées et données modélisées), Orange : 1 classe de différence entre données observées et données modélisées, Rouge : 2 classes de différence entre données observées et données modélisées.	102
Tableau 19 : Indicateurs statistiques d'évaluation du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot. $\kappa_{QW}$ = Kappa de Cohen pondéré quadratiquement	103
Tableau 20 : Exemple de données d'évaluation de la qualité prédictive de précédents modèles IPSIM.	105
Tableau 21 : Exemple de convertisseur concernant l'attribut « Espacement inter-rang » du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou.	112
Tableau 22 : Table d'agrégation de l'attribut « Efficacité du contrôle de l'inoculum primaire ».	112
Tableau 23 : Poids normalisés « local » et « global » pour les attributs du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou. Les poids « local » et « global » sont exprimés en %, indiqués pour chaque attribut et distribués en 5 niveaux d'agrégation ordonnés en colonnes. Les termes gras et non gras représentent respectivement les attributs agrégés et les attributs d'entrée. Chaque point supplémentaire en amont du nom de l'attribut correspond à un niveau inférieur au précédent.	114
Tableau 24 : Matrice de confusion du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou et distribution des données. Nombre en italiques : pourcentage des données sur un total de 116 données. Vert : modélisations parfaites (0 classe de différence entre données observées et données modélisées), Orange : 1 classe de différence entre données observées et données modélisées, Rouge : 2 classes de différence entre données observées et données modélisées.	116
Tableau 25 : Mesures statistiques pour évaluer le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou. $\kappa_{QW}$ = Kappa de Cohen pondéré quadratiquement.	116
Tableau 26 : Table d'agrégation de l'attribut final du modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium. Le rouge représente la valeur favorable au développement de l'oïdium et nuisible au développement des grappes. Le noir représente la valeur neutre. Le vert représente la valeur bénéfique pour le développement de l'oïdium et préjudiciable pour les grappes de la vigne.	124
Tableau 27 : Poids normalisés « local » et « global » pour les attributs du modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium. Les poids « local » et « global » sont exprimés en %, indiqués pour chaque attribut et distribués en 5 niveaux d'agrégation ordonnés en colonnes. Les termes gras et non gras représentent respectivement les attributs agrégés et les attributs d'entrée. Chaque point supplémentaire en amont du nom de l'attribut correspond à un niveau inférieur au précédent.	126

# Liste des sigles et abréviations

AB : Agriculture Biologique

AOP : Appellation d'Origine Protégée

BSV : Bulletin de Santé du Végétal

CMR : Cancérigènes, Mutagènes et Reprotoxiques

DSS : Decision Support System

HVE : Haute Valeur Environnementale

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitement

IFTf : Indicateur de Fréquence de Traitement fongicide

IFTt : Indicateur de Fréquence de Traitement total

IFV : Institut Français de la Vigne et du vin

IGP : Indication Géographique Protégée

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et de l'Environnement

IPSIM : Injury Profil Simulator

LMR : Limite maximale de résidus de pesticides

OAD : Outil d'aide à la décision

OFE : On-Farm Experimentation

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PDO : Protected Designation of Origin

PNPP : Préparations Naturelles Peu Préoccupantes

R&D : Recherche et Développement

SAU : Surface Agricole Utile

SDC : Système De Culture

TFif : Fungicide Treatment Frequency Index

TFIt : Total Treatment Frequency Index

TNT : Témoin Non traité

VIFA : Variété d'Intérêt à Fin d'Adaptation

# Introduction générale

L'agriculture française est confrontée aujourd'hui à un besoin d'adaptation pour répondre à différentes problématiques telles que le changement climatique, la baisse de la consommation de vin et la réduction de l'utilisation des pesticides. Pour répondre à l'enjeu de la réduction de l'utilisation des pesticides, le gouvernement français au travers des différents plans Ecophyto a encouragé le travail de recherche de leviers pour réduire le recours aux pesticides (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt & Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2015). Malgré ce travail important de recherche, la quantité en tonnes de substances actives vendues ne diminue pas fortement voire même stagne selon les années. La viticulture est soumise à cette problématique et elle est souvent pointée du doigt car elle est l'un des secteurs agricoles les plus intensifs en termes d'utilisation de pesticides (Urruty et al., 2016). De nombreux leviers pour réduire le recours aux pesticides en viticulture ont été explorés mais leur déploiement au sein des vignobles n'est pas suffisamment réalisé par les viticulteurs (Pertot et al., 2017).

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit vise à répondre à la problématique suivante : Comment favoriser la réduction de l'utilisation des pesticides chez des viticulteurs coopérateurs ?

Suite à une étude bibliographique (Etat de l'art du manuscrit), nous tenterons de répondre, grâce à la mise en place d'une démarche participative pour co-construire, expérimenter à la ferme et co-évaluer des stratégies de protection du vignoble moins dépendantes des pesticides avec la participation d'un groupe de viticulteurs du Sud-Ouest de la France et d'un travail de modélisation pour trois maladies de la vigne (mildiou, oïdium et black rot), aux questions de recherche suivantes :

1. Comment co-construire et évaluer avec les viticulteurs des stratégies de protection du vignoble moins dépendantes des pesticides ? (Chapitre 1 de la partie Résultats)
2. Quelles sont les performances agronomiques et le coût des fongicides des stratégies de protection du vignoble co-conçues ? (Chapitre 2 de la partie Résultats)
3. Peut-on simuler par modélisation le profil de dégâts liés aux principales maladies cryptogamiques de la vigne (mildiou, oïdium, black rot) en tenant compte du système technique d'un viticulteur, des conditions pédoclimatiques et de l'environnement de la parcelle ? (Chapitre 3 de la partie Résultats)

Enfin, la partie Discussion générale réalise une synthèse des différents résultats obtenus dans le cadre de cette thèse et interroge la pertinence et la robustesse de la démarche suivie tout au long de la thèse. Elle ouvre sur les perspectives concernant la suite des travaux qui pourront être réalisés pour accompagner les viticulteurs sur la zone d'étude et les voies de valorisation des stratégies de protection du vignoble moins dépendantes des pesticides.



---

# PARTIE I État de l'art et problématique de recherche

---

# 1 Un constat d'échec de la réduction de l'utilisation des pesticides

## 1.1 L'utilisation des pesticides et les problèmes liés à leur utilisation en agriculture et en viticulture

Les pesticides englobent trois catégories de produits : les produits phytopharmaceutiques, les biocides et les produits antiparasitaires (Ministère de la santé et de l'accès aux soins, 2019). Les produits phytopharmaceutiques ou produits phytosanitaires ou produits de protection des plantes correspondent aux produits utilisés en agriculture pour protéger les végétaux ou les produits végétaux contre tous les organismes nuisibles (Ministère de la santé et de l'accès aux soins, 2019). Dans la suite du manuscrit, le terme de pesticide sera utilisé pour nommer les pesticides utilisés en agriculture (produits phytosanitaires). Les pesticides connaissent un premier essor au XIX<sup>e</sup> siècle avec le progrès de la chimie minérale. Un exemple phare de cette nouvelle génération de pesticides est la bouillie bordelaise qui est utilisée à partir de 1885 dans les vignes. Cependant, il faut attendre la Première Guerre Mondiale pour que soit lancée la production de masse de pesticides avec l'avènement de la chimie organique. La production mondiale de pesticides n'a cessé d'augmenter depuis la Seconde Guerre Mondiale. En quarante ans, elle est passée d'environ 1 million de tonnes en 1945 à 3 millions de tonnes en 1985 (Tilman et al., 2002). Cette augmentation n'a cessé de continuer sur l'ensemble de la planète jusqu'à aujourd'hui (Figure 1). Sur la période 1999-2019, cette augmentation varie de +3% en Europe à +143,5% en Amérique du Sud (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2022).

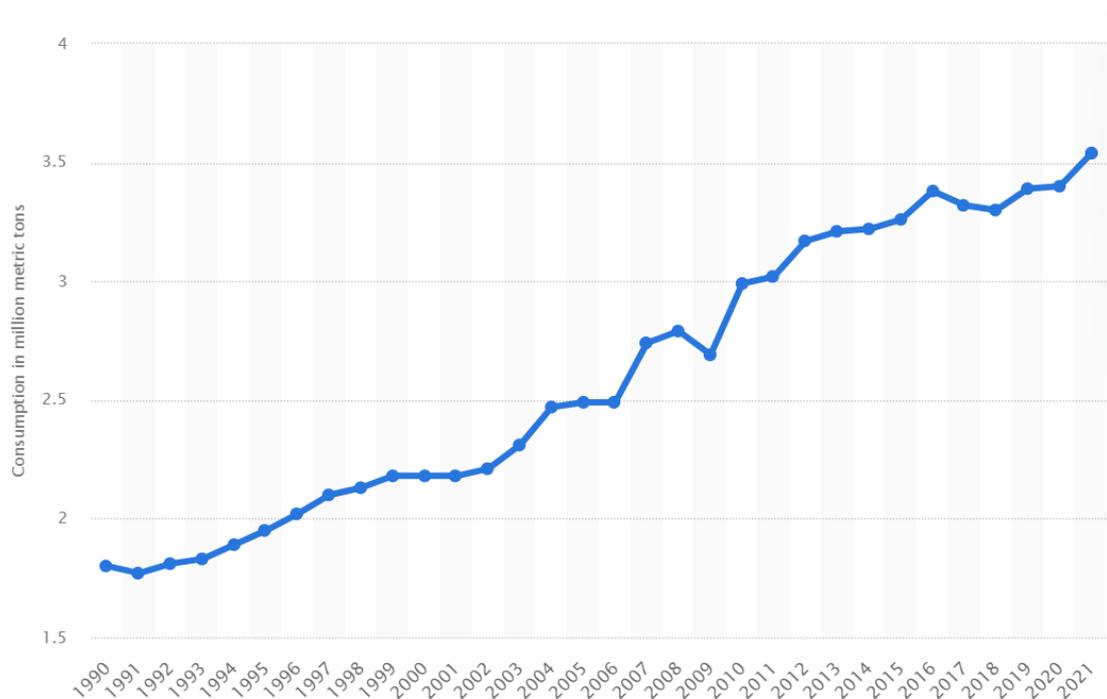


Figure 1 : Consommation agricole de pesticides en millions de tonnes dans le monde de 1990 à 2021 (Statista, 2024a).

Depuis les années 2000 en France, la quantité de matières actives vendues diminue. A partir de 2009, elle tend à se maintenir aux alentours de 60 000-70 000 tonnes (Figure 2), ce qui est deux fois moins qu'en 1999 (Phyteis, 2022). Le pic de vente observé en 2018 s'explique par un achat massif de la part

des agriculteurs pour anticiper la hausse de la redevance pour pollutions diffuses qui a eu lieu au 1<sup>er</sup> janvier 2019. Ce stockage des pesticides de 2018 a engendré mécaniquement une baisse d'achat en 2019 comme observée sur la Figure 2. Depuis 2020, les ventes de substances actives hors usages en agriculture biologique (AB) et hors produits de biocontrôle ont diminuées et stagnent autour 45 000 tonnes par an tandis que les ventes de substances actives utilisables en produits de biocontrôle et/ou en AB continue à progresser (Figure 2). En 2022, la France occupe la 1<sup>ère</sup> place européenne et le 10<sup>ème</sup> rang à l'échelle mondiale en quantité de pesticides utilisés dans le secteur agricole (Statista, 2024b).

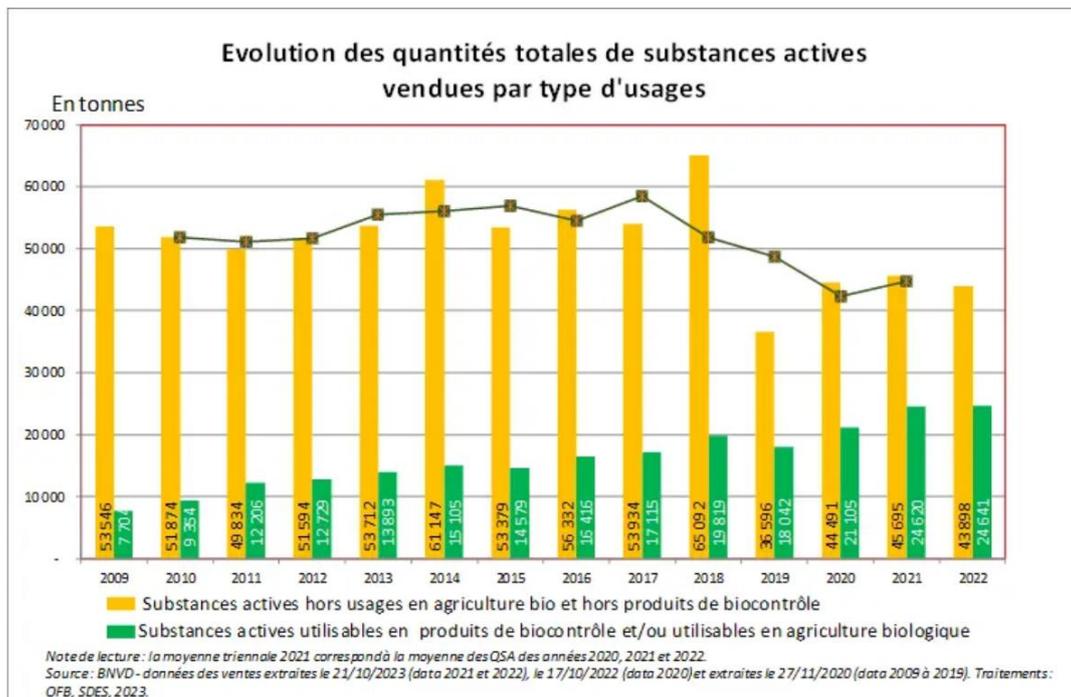


Figure 2 : Evolution de 2009 à 2022 des quantités totales en tonnes de substances actives vendues par type d'usages (Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation, le ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques et le ministère du Logement et de la Rénovation urbaine, 2022).

Cette utilisation accrue des pesticides engendre des problèmes à différentes échelles (environnement, santé humaine et apparition de résistances) (Ministère de la santé et de l'accès aux soins, 2019).

La présence des pesticides dans l'ensemble de la biosphère et son impact sur la biodiversité :

Aujourd'hui, les pesticides se retrouvent dans toute la biosphère et certains impacts sur celle-ci sont avérés. Ils sont présents dans les différents compartiments de l'environnement : l'air, l'eau et le sol. Il n'existe pas de réglementation sur un taux maximum de pesticides dans ces trois compartiments.

L'agriculture est responsable en grande partie de la présence des pesticides dans l'air via trois processus différents : la dérive, la volatilisation post-application et l'érosion éolienne (Atmo Occitanie, 2023). La dérive est le premier processus responsable de la présence des pesticides dans l'air (Guiral, 2014). Selon les pesticides, le transport et la persistance dans l'air varient. Certains d'entre eux qui ont une grande stabilité peuvent être transportés sur de grandes distances et se retrouver dans des lieux vierges de traitements comme les régions polaires (Millet & Bedos, 2016). Depuis 2002, les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) réalisent des mesures des pesticides dans l'air (Hervieu et al., 2024) et publient des rapports annuels (Atmo Occitanie, 2023; Francony, 2022). L'ensemble de ces données sont classées dans la base de données PhytAtmo pilotée par Atmo France (Hervieu et al., 2024).

Lors de l'application des pesticides, une quantité va directement vers le sol. Les pesticides sont plus ou moins persistants dans les sols et l'utilisation sur de longues périodes de pesticides persistants peut engendrer une pollution diffuse. En Europe, des chercheurs ont montré que sur 317 couches arables agricoles testées, plus de 80 % contenaient des résidus de pesticides (Silva et al., 2019).

Les pesticides se retrouvent dans les cours d'eau suite au lessivage des pesticides. Concernant la pollution de l'eau, deux niveaux d'observations sont examinés. Le premier concerne plutôt un impact sur l'environnement avec l'évaluation de la présence de pesticides dans les cours d'eau. Aujourd'hui, la quasi-totalité des eaux de surface en France est contaminée par des pesticides. En métropole, les herbicides et leurs dérivés représentent la majorité des pesticides quantifiés et on observe une diminution de la concentration individuelle de chacun des pesticides quantifiés. Cependant, s'ils sont considérés en mélange, les pesticides continuent d'exercer une forte pression toxique sur les cours d'eau (Sédillot, 2023). Le deuxième niveau concerne l'impact sur la santé humaine avec l'observation de leur présence dans l'eau du robinet. En 2022, 84,6% de la population a été alimentée en permanence par de l'eau respectant les limites de qualité réglementaires pour les pesticides. La majorité des non-conformités depuis 2021 sont dues au métabolite ESA du métolachlore et aux métabolites de la chloridazone (Direction Générale de la Santé, 2023).

Cette présence des pesticides dans l'environnement peut avoir des impacts importants sur la biodiversité. L'agriculture intensive en particulier l'utilisation des pesticides et des fertilisants est la pression majeure causant le déclin des populations d'oiseaux (Rigal et al., 2023). Les insecticides ont des effets létaux et sublétaux sur les pollinisateurs dans des conditions expérimentales contrôlées. Les effets en champ sont plus difficiles à vérifier selon les espèces étudiées et l'usage de pesticides (Potts et al., 2016). Par exemple, les insecticides de la famille des néonicotinoïdes ont un impact néfaste sur les abeilles (Henry et al., 2012; Potts et al., 2016).

#### *L'exposition des humains aux pesticides :*

Pour évaluer le risque de l'exposition des humains aux pesticides, deux paramètres sont pris en compte : la toxicité aiguë et la toxicité chronique. La toxicité aiguë correspond à une exposition courte (inférieure à 24 h) à une dose unique ou plusieurs doses rapprochées. La toxicité chronique résulte d'une exposition d'au moins trois mois avec une administration répétée (Regnault-Roger, 2014). Les sources d'expositions des professionnels (agriculteurs et salariés) sont nombreuses allant de l'achat du produit jusqu'au nettoyage des cuves après le traitement. La phase de préparation de la bouillie est une phase critique d'exposition et la voie cutanée est la première voie d'exposition (Baldi et al., 2013). À la vue des études de ces 40 dernières années, un lien entre l'exposition professionnelle aux pesticides et certaines maladies a été prouvé (Acquavella et al., 1998; Baldi et al., 2013; Inserm, 2021). Les trois méta-analyses suivantes : "Cancer among Farmers: A Meta-Analysis" basée sur 37 études (Acquavella et al., 1998), "Pesticides et effets sur la santé" basée sur l'étude de la littérature scientifique disponible en date du premier semestre 2012 (Baldi et al., 2013) et "Pesticides et effets sur la santé : Nouvelles données" basée sur l'étude de la littérature scientifique disponible depuis 2013 jusqu'au premier trimestre 2020 soit plus de 5 300 documents (Inserm, 2021), ont montré que la population agricole a plus de risques de contracter différentes pathologies telles que le mélanome malin, les cancers de l'estomac, du cerveau, de la prostate, la leucémie, la maladie de parkinson et la maladie de Hodgkins. Une étude sur les troubles neurocomportementaux de la cohorte PHYTONER qui regroupe des ouvriers agricoles de Gironde a permis de mettre en évidence que l'exposition aux pesticides de la famille des organophosphorés engendre une baisse significative des performances cognitives (Baldi & Lebailly, 2013). L'impact sur la fertilité des hommes a été observé pour le dibromochloropropane (nématicide) qui est interdit depuis 1979 (Regnault-Roger, 2014). Cependant le doute subsiste pour les pesticides

utilisés aujourd'hui (Baldi et al., 2013) et les experts rappellent l'importance de réévaluer périodiquement les connaissances dans ce domaine (Inserm, 2021).

La population générale est aussi exposée aux pesticides. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'alimentation représente 80 % de l'exposition quotidienne aux pesticides pour les humains et l'eau potable, 10 %. Cette exposition est causée par les résidus de pesticides que l'on peut retrouver dans les produits alimentaires et l'eau. Un exemple de contamination de la population générale via l'alimentation est le cas du chlordécone, un insecticide utilisé dans les Antilles françaises. Une présomption forte d'un lien entre le risque de survenue d'un cancer de la prostate et l'exposition au chlordécone a été confirmée (Inserm, 2021).

Pour protéger le consommateur de tous les risques liés aux résidus de pesticides, des limites maximales de résidus de pesticides (LMR) ont été fixées. Si la présence d'un résidu dépasse sa LMR, alors le produit alimentaire ne peut pas être commercialisé (Regnault-Roger, 2014). Pour le vin, les LMR n'existent pas donc il faut que les résidus soient inférieurs aux LMR fixées pour le raisin. Une étude a analysé des vins issus des vignobles européens de toutes origines et de toutes couleurs. La base de données était constituée de 4579 résultats dont une proportion non précisément connue des données provenait de vins biologiques (environ 15% des données). Sur l'ensemble des vins analysés, aucun ne dépasse les LMR. 68% des vins contenaient au moins un résidu de pesticides et 25% des vins contenaient plus de cinq résidus. Les molécules retrouvées étaient des fongicides et aucun insecticide et herbicide n'ont été retrouvés (Grinbaum et al., 2019).

L'impact d'une exposition à des cocktails de résidus de pesticides est difficile à mesurer et doit être un axe d'amélioration (Baldi et al., 2013). Une étude sur l'exposition de souris mâles et femelles pendant un an à un cocktail de six pesticides via l'alimentation a montré que cette exposition engendre des troubles métaboliques significatifs (Lukowicz et al., 2018).

#### *Le développement de phénomènes de résistance des bioagresseurs :*

Le dernier risque lié aux pesticides est le développement de phénomènes de résistance des bioagresseurs. La résistance aux pesticides est la capacité héritable d'un individu d'une espèce à survivre à un traitement d'un pesticide appliqué en respectant les recommandations du fabricant (R4P, 2020). En pratique, elle se mesure par une baisse de l'efficacité d'un pesticide, alors qu'il est appliqué en suivant les recommandations du fabricant (R4P, 2020).

Les cas de résistances touchent les trois types de pesticides (insecticide, herbicide et fongicide). Les premières observations de résistances ont été faites sur les insecticides. Le développement de la résistance peut aller très vite. Par exemple, le nombre d'espèces de moustiques résistantes aux pesticides de la famille des organochlorés sont passées de 14 en 1948 à 500 en 1990 (Regnault-Roger et al., 2005). Au niveau mondial, le nombre de cas de résistance des adventices ne cessent d'augmenter chaque année (Heap, 2024a). En France, 34 cas de résistance des adventices sont recensés (Heap, 2024b). Les fongicides sont fortement utilisés en vigne, ce qui engendre l'apparition de résistance. Des cas de résistance sont observés pour le mildiou, l'oïdium et le botrytis cinerea (IFV et al., 2024). Le nombre de substances actives disponibles se réduit au fil des années et cette tendance ne semble pas être inversée dans les années à venir (Stef, 2024). Cette diminution risque d'engendrer une utilisation accrue de certaines familles de pesticides et donc d'augmenter les résistances des bioagresseurs (Stef, 2024).

Les différentes études sur les risques pour l'environnement et la santé humaine de l'utilisation des pesticides ont pour effet d'informer la société et aujourd'hui, leur utilisation est fortement décriée (Inserm, 2021; Pesticide Action Network Europe, 2023). La société exprime le souhait de leur réduction

voire de leur interdiction (Pesticide Action Network Europe, 2023). De nombreuses émissions et articles ont été réalisés sur les pesticides au cours des dernières années, ce qui a contribué à renforcer l'inquiétude des consommateurs. La société Monsanto a été pour la première fois condamnée par un tribunal américain à verser plus de 70 millions d'euros à un malade touché par un lymphome non hodgkinien. En France, une affaire a fait grand bruit en 2014 et en 2019. Elle concerne le procès de deux châteaux bordelais (un en agriculture conventionnelle et l'autre en agriculture biologique) pour « utilisation inappropriée de produits phytopharmaceutiques ». A la suite de l'épandage de fongicides sur des vignes voisines d'une école en mai 2014, des élèves et une enseignante se sont plaints de picotements des yeux et de maux de gorge (Grimonprez & Terryn, 2021). Les deux viticulteurs ont été condamnés à une amende de 5000€ avec sursis après un non-lieu, puis une relaxe en première instance (Grimonprez & Terryn, 2021). Ces deux exemples d'affaires concernant l'impact des pesticides sur la santé contribuent à alimenter la peur des citoyens.

## 1.2 Une tentative infructueuse de réduction de l'utilisation des pesticides

Comme évoqué précédemment, la mise en évidence des impacts sur l'environnement, la santé humaine des pesticides et la demande sociétale qui est de plus en plus forte ont engendré une action de la part du gouvernement français et de l'Union européenne. En France, deux plans se sont succédés ces dernières années avec pour objectif de réduire l'utilisation des pesticides.

A la sortie du Grenelle de l'environnement fin 2007, le plan Ecophyto I est rédigé en 2008. Il vise à réduire de moitié l'utilisation des pesticides en 2018 par rapport à 2008 (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt & Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2015). Il s'inscrit dans le cadre de la directive européenne 2009/128 d'utilisation des produits phytopharmaceutiques compatibles avec le développement durable (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt & Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2015). Pour remplir ces objectifs, différents outils sont mis en place :

- Le certificat individuel de produits phytopharmaceutiques (Certiphyto) qui est obtenu suite à une formation qui fait la promotion des bonnes pratiques d'utilisation des pesticides et des leviers permettant de réduire leur utilisation,
- La mise en ligne des bulletins de santé du végétal (BSV) par région qui alertent les producteurs sur l'arrivée des bioagresseurs,
- La création d'un réseau de fermes pilotes pour mutualiser les bonnes pratiques
- Un programme de contrôle de tous les pulvérisateurs qui sont utilisés pour l'application des pesticides (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt & Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2015).

Le plan Ecophyto I ne donne pas des résultats immédiats en termes de réduction de l'utilisation des pesticides. Sur la période 2009 à 2014, une légère augmentation de 5% de leur emploi est observée (Hossard et al., 2017; Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt & Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2015). Cet « échec » est dû à un « verrouillage sociotechnique » autour des systèmes intensifs en intrants chimiques freinant le développement d'alternatives qui n'a pas été déverrouillé par les actions mises en œuvre par le plan Ecophyto I (Guichard et al., 2017).

Le plan Ecophyto II naît en 2015 pour prendre la relève du plan Ecophyto I. Il a pour objectif de réduire de 50% le recours aux pesticides d'ici 2025 et de passer à 20% de Surface Agricole Utile (SAU) en

agriculture biologique en 2020. Cette réduction doit se faire en deux étapes. En 2020, une réduction de 25% est envisagée par une optimisation des techniques utilisées aujourd'hui. Puis en 2025, une réduction de 50% qui sera le fruit de changements importants des systèmes de production et des filières. Le plan Ecophyto II conserve et consolide les outils mis en place par le plan Ecophyto I (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt & Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2015). Le plan Ecophyto II se décompose en six axes qui visent à :

- Faire évoluer les pratiques et les systèmes ;
- Amplifier les efforts de recherche, de développement et d'innovation ;
- Réduire les risques et les impacts des pesticides sur la santé humaine et sur l'environnement ;
- Supprimer l'utilisation de pesticides partout où cela est possible comme les jardins, les espaces végétalisés et les infrastructures ;
- Encourager, en favorisant une mobilisation des acteurs, la déclinaison territoriale du plan en cohérence avec les contraintes et potentialités locales, renforcer l'appropriation du plan par les acteurs du territoire et des filières, veiller à la cohérence des politiques publiques ;
- S'appuyer sur une communication dynamique et des approches participatives, pour instaurer un débat citoyen constructif quant à la problématique des pesticides, et instaurer une gouvernance simplifiée (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt & Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2015).

En 2018, le plan Ecophyto II+ est élaboré, complétant et adaptant le Plan Ecophyto II afin d'intégrer les actions prévues par le plan d'action sur les pesticides et une agriculture moins dépendante aux pesticides du 25 avril 2018 ainsi que dans le plan de sortie du glyphosate annoncé le 22 juin 2018 (Ministère de la Transition écologique et solidaire & Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, 2018).

Comme évoqué précédemment, la consommation de pesticides n'a pas baissé depuis le lancement du plan Ecophyto I et la viticulture suit cette tendance. Pour évaluer la quantité de pesticides appliqués sur un champ, l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) (Pingault et al., 2009) est calculé. L'IFT varie selon les années mais une tendance à la stagnation se dégage en moyenne sur l'ensemble du vignoble français. En 2010, il était de 12,8 puis 15,5 en 2016 pour finir à 12,6 en 2019 (Simonovici, 2019; Simonovici & Caray, 2023). Dans les vignobles, les fongicides représentent plus de 80 % des pesticides, suivis par les insecticides (15 %) et les herbicides (5 %) (Mailly et al., 2017). De plus, la viticulture est pointée du doigt car elle est l'un des secteurs agricoles les plus intensifs en termes d'utilisation de pesticides en France (Urruty et al., 2016). Par exemple, l'IFT en viticulture est environ deux fois plus élevé qu'en grande culture (données pour la viticulture en 2019 (Simonovici & Caray, 2023) et pour les grandes cultures en 2017 (Crisan, 2019) respectivement).

Aujourd'hui, l'utilisation des pesticides en agriculture et en viticulture est critiquée à cause des différents problèmes environnementaux et sur la santé humaine liés à leur utilisation et de ce fait, elle n'est pas durable. Pour accompagner les viticulteurs sur la réduction de l'emploi des pesticides, deux plans ECOPHYTO consécutifs ont été mis en place mais cela n'a pas permis d'amorcer une diminution nette de l'utilisation des pesticides à l'échelle nationale.

## 2 Les principales maladies fongiques considérées dans la thèse

En viticulture, les pesticides sont majoritairement utilisés pour protéger la vigne contre les maladies (plus de 80 % des pesticides sont des fongicides) (Mailly et al., 2017). Les trois principales maladies de la vigne qui peuvent engendrer des dégâts importants (Fermaud et al., 2016) et qui sont aujourd'hui essentiellement contrôlées par le recours aux fongicides sont : le mildiou (*Plasmopara viticola*), l'oïdium (*Erysiphe necator*), et le black rot (*Guignardia bidwellii*).

### 2.1 Le mildiou

Le mildiou est un terme générique qui est utilisé pour un grand nombre de maladies cryptogamiques des plantes cultivées. Le mildiou de la vigne, causé par *Plasmopara viticola* (*P.viticola*) est une maladie redoutable originaire d'Amérique du Nord qui affecte aussi bien la quantité que la qualité de la récolte mais peut également affaiblir la plante pour l'année suivante en cas de fortes attaques. *P.viticola* est un oomycète biotrophe obligatoire et inféodé de la vigne. C'est un parasite qui se multiplie sur son hôte en réalisant plusieurs cycles dont le nombre dépend des conditions climatiques. Son cycle de développement comprend une phase de reproduction sexuée et une phase asexuée (Figure 3). L'expansion du pathogène est assurée par la phase de reproduction asexuée (Gessler et al., 2011). Chaque phase permet au pathogène de produire différents types de spores. Les spores issues de la phase de reproduction sexuée sont à l'origine des contaminations primaires tandis que celles issues de la reproduction asexuée sont responsables des contaminations secondaires.

Pour sa survie durant l'hiver, le pathogène se retrouve sous la forme d'oospores dans le sol ou sur les feuilles mortes présentes au sol. A la fin de l'hiver, les oospores deviennent matures ce qui va leur permettre de pouvoir germer et de produire des sporanges où les zoospores se forment (Gessler et al., 2011). Ces zoospores sont libérées et projetées depuis le sol grâce aux éclaboussures engendrées par les gouttes de pluie, ce phénomène est appelé « splashing ». Elles vont alors contaminer les jeunes organes de la vigne : feuille, inflorescence, jeunes baies et jeunes rameaux. Dès qu'ils sont sur les feuilles, ils vont produire un mycélium qui va permettre l'entrée dans l'épiderme de la feuille par les stomates. Les jours qui suivent l'infection, des hyphes mycéliens vont se développer et coloniser l'épiderme ce qui correspond à l'incubation. Elle dure plusieurs jours et varie selon la température. A la fin de l'incubation, les symptômes sont visibles avec la présence d'une tache d'huile sur la face supérieure de la feuille qui va se nécroser au fil du temps. Par la suite sur la face inférieure, un duvet blanc correspondant aux sporangiophores porteurs de sporanges va apparaître ce qui correspond à la sporulation du mildiou. Les sporangiophores peuvent aussi se développer sur les inflorescences et les jeunes baies, on parle du symptôme « rot gris ». Ces différents symptômes correspondent aux contaminations primaires au printemps. Les sporanges vont émettre des zoospores qui vont contaminer les organes sains du même cep voir des ceps adjacents de proche en proche. On parle alors de la contamination secondaire qui est réalisée par la reproduction asexuée du mildiou. Les symptômes sur les feuilles sont les mêmes tandis que les baies contaminées plus tardivement vont exprimer le symptôme dit « rot brun ». Quand les feuilles sont atteintes plus tardivement durant la campagne, on observe le symptôme dit de « mildiou mosaïque ». Dans le cas de conditions non favorables à la sporulation (sécheresse ou sénescence des feuilles à l'automne), la production d'oospores est favorisée pour permettre la source d'inoculum primaire pour l'année suivante (phase sexuée de la reproduction du mildiou).

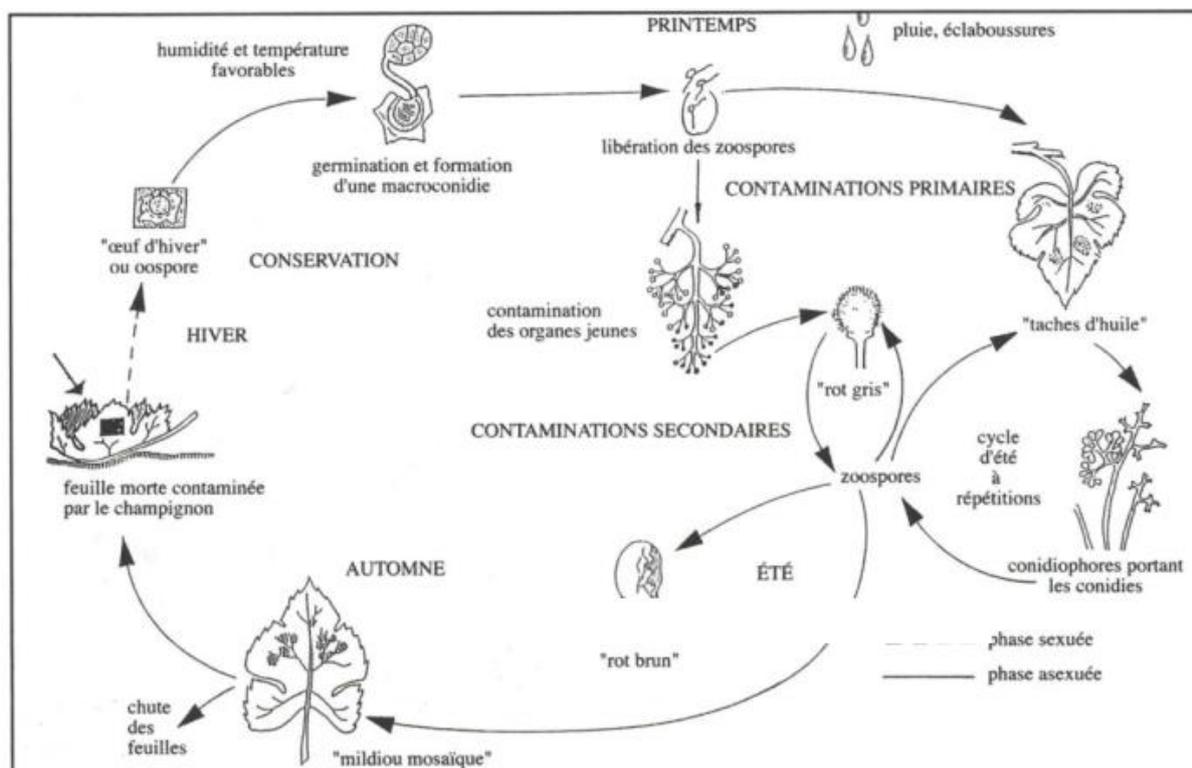


Figure 3 : Cycle de développement de *P.viticola* (Dubos, 2002).

## 2.2 L'oidium

L'oidium peut s'attaquer à la plupart des plantes cultivées et sauvages et il possède une capacité de multiplication végétative rapide (Schnee, 2008). L'oidium de la vigne, causé par *Erysiphe necator* (*E.necator*) est aujourd'hui présent dans presque tous les vignobles du monde entier. Il est originaire d'Amérique et il est arrivé en France en 1847. Cette année-là, la production de vin française a chuté de 80% (Dubos, 2002). *E.necator* peut affecter tous les stades de croissance et tous les organes végétaux de la vigne. La principale espèce de vigne cultivée, *Vitis vinifera*, est très sensible à l'oidium (Gadoury et al., 2012). En France, l'épidémie d'oidium est le plus souvent observée dans les vignobles des régions méridionales, comme les vignobles méditerranéens, mais des vignobles septentrionaux peuvent également être gravement touchés certaines années. L'oidium peut entraîner une diminution de la récolte (Calonne et al., 2004; Guilpart, 2014) et il peut aussi altérer la qualité de la vendange avec une réduction de l'accumulation du sucre et des anthocyanes dans les baies.

*E.necator* appartient à l'ordre des érysiphacées, ce sont des ascomycètes et un ectoparasite obligatoire de Vitacea (Dubos, 2002). Le cycle de *E.necator* est présenté sur la Figure 4. L'oidium est présent généralement sous deux formes de conservation hivernale : le mycélium dans des bourgeons dormants et les ascospores portées dans les cléistothèces (Guilpart, 2014). Les cléistothèces peuvent se former sur tous les tissus infectés à la fin de l'été et au début de l'automne. La plupart des cléistothèces se cachent dans l'écorce durant l'hiver. La fréquence de la formation des cléistothèces dépend principalement du niveau de la maladie à la véraison : plus le niveau de maladie est élevé pendant la période de véraison, plus les cléistothèces peuvent se former tôt sur la vigne (Angeli et al., 2009). Lorsque le printemps arrive avec des pluies, les cléistothèces éclatent pour libérer les ascospores (cycle de reproduction sexuée). Les symptômes apparaissent dans les 10 à 15 jours après la libération des ascospores (Constant, 2013) ce qui constitue la contamination primaire. Ces infections primaires peuvent également être dues au mycélium. Lorsque les vignes reprennent leur croissance au

printemps, le mycélium dormant dans le bourgeon reprend son activité. Les conidies se séparent du mycélium, ce qui correspond au cycle de reproduction asexuée. Par la suite, elles colonisent d'autres tissus verts de la vigne et forment un bourgeon drapeau sur les jeunes pousses. Le vent et les gouttes de pluie permettent la dispersion des conidies (Dubos, 2002; Schnee, 2008). Ces deux formes d'inoculum peuvent produire des spores qui deviendront la source d'infection secondaire. Les spores forment des hyphes à la surface de la plante pour produire de nouvelles conidies par multiplication végétative, afin de réaliser une infection cyclique. Les contaminations secondaires ne peuvent débuter que lorsque la concentration en conidies atteint un certain seuil. Le champignon peut traverser au moins trois cycles d'infection avant que les symptômes foliaires ne soient détectés pour la première fois dans les vignobles. Le cycle d'infection de l'oïdium prend généralement de 8 à 15 jours selon les conditions d'infection (Halleen & Holz, 2001).

L'oïdium apparaît généralement sur la surface verte des vignes sous forme de mycélium. Les feuilles sont très sensibles à l'oïdium, le nombre de feuilles formées est positivement corrélé avec la sévérité de l'infection par l'oïdium (Calonnec et al., 2006). La sensibilité des feuilles et des grappes augmente progressivement avec le risque de l'infestiosité de l'oïdium qui atteint son maximum lorsqu'il y a 9 à 15 feuilles étalées (Dubuis et al., 2014). Les jeunes feuilles contaminées deviendront vert foncé et les feuilles seront déformées. Habituellement, des hyphes grises se trouvent généralement sur la surface inférieure des feuilles exposées ou sur les deux côtés des feuilles bien ombragées (Halleen & Holz, 2001). Les bourgeons infectés germent un peu plus tard que ceux non infectés au printemps (Halleen & Holz, 2001). Une fois le bourgeon contaminé, il se recouvre de mycélium blanc à la surface. Les inflorescences peuvent être infectées autour de la floraison, un duvet blanc apparaît comme si du sucre glace avait été saupoudré ce qui entraîne leur avortement. Les fleurs et les jeunes baies sont très sensibles à l'oïdium. Par la suite, les jeunes baies touchées vont éclater et sécher.

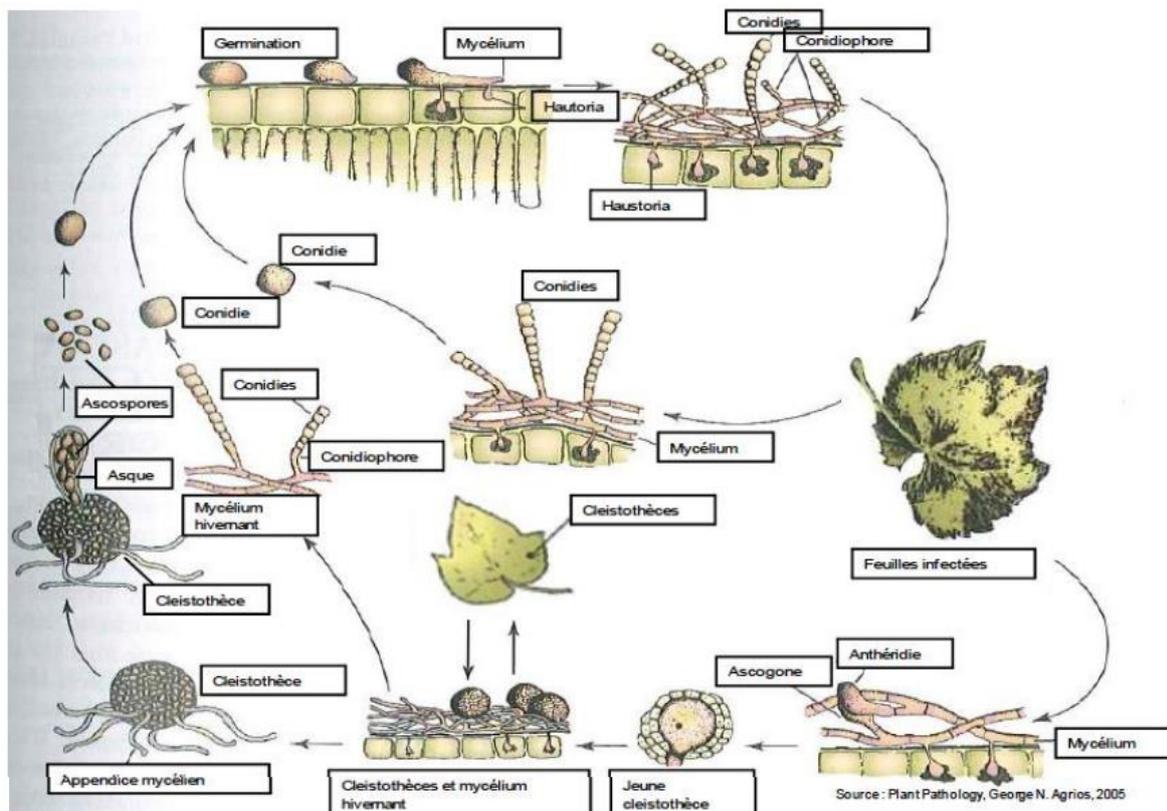


Figure 4 : Cycle de développement de *E. necator* (Agrios, 2005).

## 2.3 Le black rot

La première souche du pathogène a été découverte en 1853 aux Etats-Unis en Alabama (Price, 1892). La description biologique du champignon a évolué au fil des années et a été de nombreuses fois revue par différents auteurs (Onesti, 2015). Cette nomenclature a été plus récemment remise à jour comme expliqué ci-après par Onesti (2015) : «Dans le cas de l'agent du black rot, le nom le plus ancien, *Phyllosticta ampellicida*, a été choisi à la place de celui de *Guignardia bidwellii* (*G.bidwellii*). Cependant, plusieurs auteurs au cours des dernières années ont continué à nommer l'agent pathogène *G.bidwellii*». Dans un esprit de continuité, la nomination *G.bidwellii* a été choisie dans ce manuscrit. Le champignon appartient à l'embranchement des Ascomycètes, à la classe des Dothideomycetes, à l'ordre des Botryosphaeriales, à la famille des Botryosphaericeae et au genre *Guignardia* (Schoch et al., 2006).

Les pertes économiques ne sont dues qu'aux attaques sur grappe (Ries, 1999). Tous les cépages commercialisés de *Vitis vinifera* sont considérés comme sensibles à la maladie (Ullrich et al., 2009; Wilcox, 2003). Le Black rot peut infecter tous les organes herbacés en croissance : les feuilles mais aussi les baies, les vrilles et jeunes sarments (Pirrello et al., 2019).

Le cycle de développement de *G.bidwellii* est résumé dans la Figure 5. Les conidies et ascospores sont produits sur les inocula hibernants (Hoffman et al., 2004). Les trois types de spores sont dispersés de façon répétée et provoquent l'infection primaire sur les jeunes pousses (Onesti et al., 2017). A cause du caractère abondant des conidies, les fructifications ayant passé l'hiver sur des rameaux peuvent être une source d'inoculum primaire plus importante que les baies momifiées au sol (Becker & Pearson, 1996). En présence d'eau libre ou de forte humidité, les pycnides expulsent les conidies (Onesti et al., 2017). Les conidies sont ensuite dispersées par des pluies contaminatrices et provoquent des infections secondaires (Onesti et al., 2017).

Le nombre de cycles infectieux potentiel par saison est limité car la période d'incubation de *G.bidwellii* est plus étendue comparée aux autres pathogènes de la vigne tel que le mildiou. Cette longue période d'incubation est due aux paramètres spécifiques nécessaires pour le succès de la colonisation du black rot. Sur feuille, ce phénomène est directement lié à la température (Molitor et al., 2012). A des températures supérieures à 20°C, la période d'incubation sur feuille passe en dessous de 9 jours. Une durée d'incubation supérieure à 20 jours est peu probable sous les conditions climatiques des régions viticoles actuelles (Molitor et al., 2012). Les tâches nécrotiques sont visibles après environ 1 à 2 semaines d'incubation. Dans ces lésions, les pycnides deviennent visibles qu'après une autre période d'incubation qui peut être très variable (Onesti et al., 2017). Si les conditions météorologiques sont favorables, une infection initiale à la floraison peut être à l'origine de 2 voire 3 cycles infectieux sur une même grappe. Les contaminations primaires et secondaires se superposent jusqu'à ce que les fructifications aient épuisé leur réserve de spores et que les organes deviennent non réceptifs (Motais & Girad, 2015).

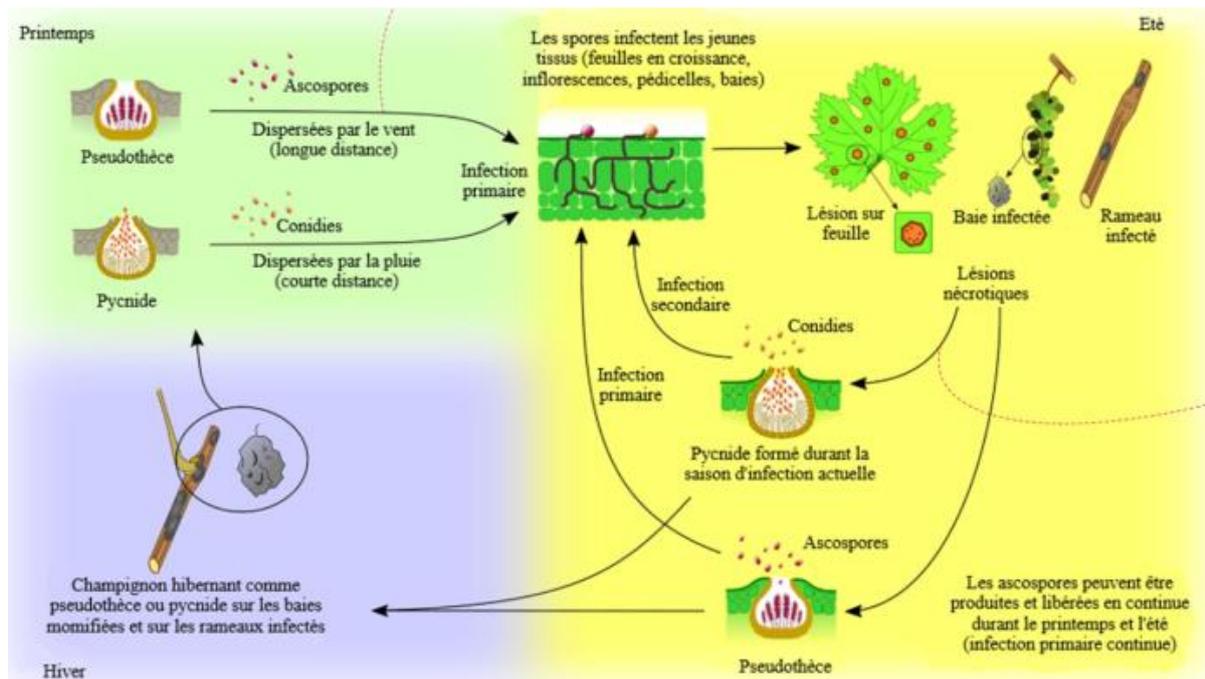


Figure 5 : Cycle de développement de *G. bidwellii*. Schéma librement adapté de (Pirrello et al., 2019) et traduit de l'anglais par (Farra, 2022).

Le Black rot n'attaque pas toutes les feuilles ou grappes d'un cep en même temps. C'est une maladie dite « de foyer ». Il apparaît d'abord isolé puis se disperse de façon irrégulière. Les infections de début de saison détruisent les fleurs et engendrent la chute des jeunes baies en développement. Les infections plus tardives attaquent les grappes en « cluster » (Ries, 1999). Sur la face supérieure des feuilles, les symptômes sont des tâches circulaires de beige à marron-rouges (Motais & Girad, 2015). La présence de points noirs répartis sur la zone permet de distinguer le Black rot d'un autre pathogène ou carence. Sur les baies, des tâches blanche-grisâtres ou rosée sont visibles formant des zones de décoloration plus ou moins circulaires (Blancard et al., 2015). Les baies infectées se momifient en 4 à 5 jours (Roznik et al., 2017). Les baies momifiées ont la caractéristique de rester fermement attachées à la tige. La fenêtre de sensibilité des grappes s'étend de la mi-floraison jusqu'à 2 à 10 semaines plus tard (Onesti, 2015).

# 3 Les leviers disponibles en viticulture et leur efficacité relative pour réduire le recours des pesticides

Malgré une non réduction de l'utilisation des pesticides à l'échelle du vignoble français, les différents plans évoqués ci-dessus ont permis d'étudier et d'explorer de nombreux leviers pouvant être mobilisés par les viticulteurs pour réduire le recours aux pesticides. Une première partie va présenter les leviers explorés en France. Ensuite, un état des lieux des leviers mobilisés par les viticulteurs dans le cadre du projet DEPHY FERME sera effectué. Et pour finir, une présentation d'exemples de combinaison de ces leviers sera faite. Dans la dernière partie, les freins au déploiement de ces leviers seront évoqués.

## 3.1 Les leviers classés selon le cadre ESR

Les leviers peuvent être classés dans les trois catégories du cadre Efficience-Substitution-Redesign (ESR) développé par (Hill & MacRae, 1996). L'Efficiencce correspond à l'amélioration des modalités de prise de décision ou techniques de pulvérisation pour améliorer l'efficacité de l'utilisation des pesticides. La Substitution consiste à remplacer les pesticides de synthèse par des techniques alternatives aux pesticides qui peuvent être des produits de biocontrôle ou d'autres techniques culturales. La Reconception (Redesign en anglais) concerne la reconception globale du système impliquant la mobilisation de plusieurs leviers de gestion complémentaires dans un système dont la cohérence d'ensemble est repensée. Dans cette partie, des exemples de leviers classés par catégories sont présentés.

### 3.1.1 Les leviers relevant de l'Efficiencce

L'amélioration de l'efficiencce des traitements est réalisée par une réduction des traitements et des doses appliquées. Pour raisonner les traitements contre les maladies cryptogamiques, les ravageurs et les adventices, les viticulteurs prennent en compte différentes informations, observations et ils font appel à de nombreuses connaissances (Figure 6).

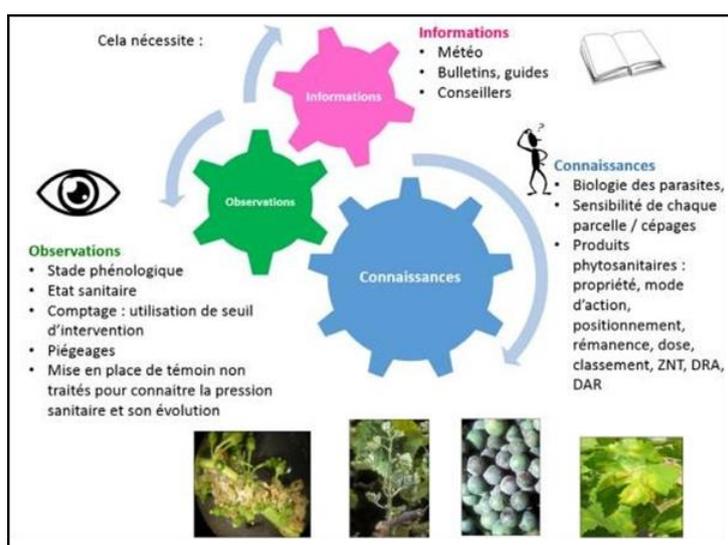


Figure 6 : Incrémentation des éléments nécessaires pour raisonner ses traitements en viticulture (Fersing, 2016).

Les informations viennent de différentes sources : les prévisions météorologiques, les stations météo physiques, la modélisation, les outils d'aide à la décision (OAD) et le bulletin de santé du végétal. Comme évoqué précédemment, le risque de présence des maladies est fortement dépendant de la météo à venir. En effet, les traitements sont raisonnés en fonction des prévisions météorologiques venant de différents sites internet, applications mobiles ou de stations physiques.

En plus de ces informations météorologiques, des outils sont à la disposition des viticulteurs pour les accompagner dans ce raisonnement. Tout d'abord le BSV, outil de suivi des cultures et de leurs maladies mis en place dans le cadre du plan Ecophyto et édité par les chambres d'agriculture, apporte les informations nécessaires pour aider les viticulteurs dans le raisonnement de leurs traitements. C'est une synthèse hebdomadaire en libre accès de l'état sanitaire des cultures à un moment donné (stades de développement, observations des ravageurs et maladies, présence de symptômes) et une évaluation du risque phytosanitaire pour les jours à venir. Cette évaluation est réalisée en prenant en compte les informations de modélisation de trois modèles concernant le mildiou : Potentiel Système, EPI 89-01 et Milstop (Carretier, 2022b). La modélisation des événements contaminants liés aux bioagresseurs de la vigne se démocratise au travers de la mise en vente des OAD pour les viticulteurs combinant des modèles sur les bioagresseurs et d'autres outils pour décider et positionner au mieux les traitements pour les maladies cryptogamiques (Pertot et al., 2017) et les ravageurs (Picart et al., 2015). En France, différents OAD sont accessibles aux viticulteurs grâce à un abonnement payant : DéciTrait®, Movida®, Agroclim® et RimPro® (Ducourt, 2023). Par exemple, l'utilisation de DéciTrait® permet une réduction de l'IFT fongicide de l'ordre de -50% en moyenne (Davy et al., 2020).

Les observations peuvent correspondre aux stades phénologiques de la vigne et aux états sanitaires des parcelles et de témoins non traités dans certains cas. En effet, la présence ou l'absence de symptômes des maladies sur feuilles et sur grappes est une information importante pour la décision du traitement à effectuer.

Les connaissances concernent les bioagresseurs, la sensibilité des parcelles et des cépages et les pesticides. Les cépages possèdent une sensibilité différente aux maladies (Dubos, 2002). Les parcelles sont plus ou moins sensibles selon leur situation géographique et leur environnement comme les parcelles situées dans les bas fond (Dubos, 2002).

La réduction des doses appliquées à la vigne se raisonne en fonction de l'équipement du viticulteur et tout au long du cycle végétatif de la vigne. La pulvérisation est un axe majeur d'amélioration pour réduire le recours aux pesticides. Le parc des pulvérisateurs est diversifié en termes de technologie de pulvérisation (pneumatique, jet porté ...) et de configuration (voûte, aéroconvecteur, face par face ...). Cette diversité se retrouve aussi concernant la qualité de pulvérisation. Par exemple, les pulvérisateurs avec les panneaux récupérateurs ou confinés permettent de récupérer la bouillie qui n'est pas appliquée sur la vigne ce qui permet de réduire la quantité de pesticides appliqués (Auvergne et al., 2017). Au travers du dispositif Performance Pulvé, les viticulteurs ont accès à une classification des pulvérisateurs viticoles selon leurs performances en termes de potentiel de réduction des doses de pesticides (A+, A, B et C). Les pulvérisateurs sont classés en fonction de leur capacité à réduire la quantité de pesticides utilisée à l'hectare tout en maintenant des dépôts, sur la végétation, au moins équivalents à ceux produits par une voûte pneumatique utilisée tous les deux rangs au vignoble. Par exemple, la classe A+ correspond à un maintien du dépôt avec une réduction de dose de -50% tandis que la classe B correspond au maintien du dépôt avec une pleine dose appliquée (Codis et al., 2024). Pour l'ensemble des pulvérisateurs, un bon réglage permet d'améliorer la qualité de pulvérisation et de réduire la quantité de produit appliquée (Codis et al., 2016).

La modulation de dose appliquée lors du traitement permet d'être au plus proche de la dose nécessaire pour le stade végétatif correspondant. En France, les doses homologuées sont fixes durant toute la campagne. Elles correspondent à la dose dont l'efficacité est démontrée dans tous les cas de figure. En Europe, certains pays ont mis en place une modulation de dose en fonction du stage végétatif. Une comparaison des doses françaises avec l'Allemagne, l'Espagne, la Suisse et l'Italie ont permis de montrer qu'en général, les doses homologuées sont supérieures en France. Le système suisse et le système allemand apparaissent plus cohérents que le système français dans l'objectif d'apporter une dose adaptée à la végétation à traiter (Codis et al., 2013). L'Institut Français de la Vigne et du vin (IFV) a initié dès 1999 un travail sur un système prenant en compte le stade végétatif, la pression des maladies et le volume de végétation pour moduler la dose. Ce système se nomme OPTIDOSE® (Codis et al., 2013). Entre 2002 et 2008, une réduction proche de -50 % de l'IFT a pu être faite pour le mildiou et l'oïdium. En cas de faible pression, le risque pris est faible. Cependant dans le cas de forte pression, la réduction de dose doit être bien suivie car une baisse de rendement peut avoir lieu (Raynal et al., 2013).

### 3.1.2 Les leviers disponibles pour la Substitution des pesticides de synthèse

La substitution des pesticides se réalise grâce à l'utilisation du biocontrôle, de la prophylaxie et de pratiques culturales alternatives. Tout d'abord, le biocontrôle repose sur des agents et des produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Ils se classent en quatre familles : les macro-organismes (invertébrés, insectes, acariens ou nématodes), les micro-organismes (champignons, bactéries et virus), les médiateurs chimiques (phéromones d'insectes et kairomones) et les substances naturelles composées de substances présentes dans le milieu naturel d'origine végétale, animale ou minérale (Aveline, 2024). Les micro-organismes, les médiateurs chimiques et les substances naturelles composent les pesticides de biocontrôle. En vigne, il existe au moins un produit de biocontrôle pour chaque bioagresseur (Aveline, 2024). Concernant les maladies, différentes substances actives sont homologuées contre le mildiou et l'oïdium comme les phosphites, le soufre, l'huile essentielle d'orange douce, le bicarbonate de potassium par exemple (Pertot et al., 2017). Les produits de biocontrôle permettent de réduire la quantité des autres pesticides tout en conservant une protection équivalente (Aveline et al., 2022). La confusion sexuelle contre les tordeuses de la grappe (eudémis et cochylis) fait partie des produits de biocontrôle. Pour les adventices, il existe un produit de biocontrôle non homologué en agriculture biologique, le Beloukha® (Aveline, 2024).

En plus des produits de biocontrôle, la prophylaxie regroupant plusieurs leviers mobilisables en amont de la réalisation des traitements permet de les limiter. La prophylaxie correspond à l'ensemble des moyens mis en œuvre dans le but de prévenir l'apparition, la propagation ou l'aggravation des maladies (Chambres d'agriculture Auvergne- Rhône-Alpes/Occitanie/Corse/Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2022). Elle est d'autant plus importante en viticulture, du fait de la pérennité de la vigne. Par exemple, le non retrait des rafles momifiées touchées par le black rot sur les souches lors de la taille sera une source d'inoculum pour l'année suivante qui ne fera que renforcer l'intensité de l'attaque si les conditions climatiques sont réunies (Chambres d'agriculture Auvergne- Rhône-Alpes/Occitanie/Corse/Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2022). En termes de réduction de l'utilisation des pesticides, leur efficacité est difficilement quantifiable mais leurs effets sur la prévention des maladies sont documentés. Les solutions agronomiques peuvent être classées en trois groupes en fonction de leur lieu d'action : rompre le cycle pour gérer l'inoculum primaire, maîtriser la vigueur et créer un microclimat défavorable pour les maladies (Figure 7) :

- Rompre le cycle de l'agent pathogène pour gérer l'inoculum primaire

L'objectif est de réduire au maximum la présence des formes de conservation hivernale des maladies qui sera l'inoculum primaire pour l'année suivante. La taille de la vigne permet de retirer des organes porteurs de spores de champignons qui pourront être à l'origine du début des contaminations l'année suivante. Comme évoqué précédemment, le retrait des grappes momifiées atteintes par le black-rot a pour objectif de réduire l'inoculum primaire de pathogène. Le travail du sol en améliorant la perméabilité du sol et l'enherbement (facilite l'infiltration) sont importants car ils permettent d'éviter la formation de mouillères et de favoriser le drainage des excès d'eau dans la parcelle qui favorisent le développement des maladies.

- La maîtrise de la vigueur de la vigne

Le couvert végétal et le raisonnement de la fertilisation permettent de maîtriser la vigueur de la vigne. En effet, la concurrence pour les ressources nutritionnelles a un effet sur sa croissance en diminuant l'expression végétative. Les pathogènes ont ainsi moins de temps pour s'attaquer aux organes de la vigne, dans un climat plus aéré. La maîtrise de la vigueur se réalise aussi au moment de la plantation avec le choix du porte-greffe et du clone du cépage. En effet, il existe des porte-greffes et des clones plus ou moins vigoureux (Chambres d'agriculture Auvergne- Rhône-Alpes/Occitanie/Corse/Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2022).

- La création d'un microclimat défavorable pour les maladies

Si la taille est primordiale pour maîtriser le nombre de grappes et le rendement, elle est également très importante pour la gestion des maladies. Elle permet en effet de répartir la végétation afin d'éviter les entassements et de favoriser l'aération des feuilles et des grappes. L'effeuillage permet de diminuer l'humidité dans la zone des grappes (Percival et al., 1994) et la pénétration des pesticides, permettant ainsi de limiter les maladies cryptogamiques. Il faut cependant faire attention au risque d'échaudage des grappes en cas de forte chaleur (Chambres d'agriculture Auvergne- Rhône-Alpes/Occitanie/Corse/Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2022). L'épamprage est particulièrement important puisqu'il évite la montée des maladies du sol jusqu'aux organes. En effet lorsque les pampres sont proches du sol, elles sont très sensibles à l'effet « splash » et donc aux contaminations primaires précoces (Dubos, 2002).

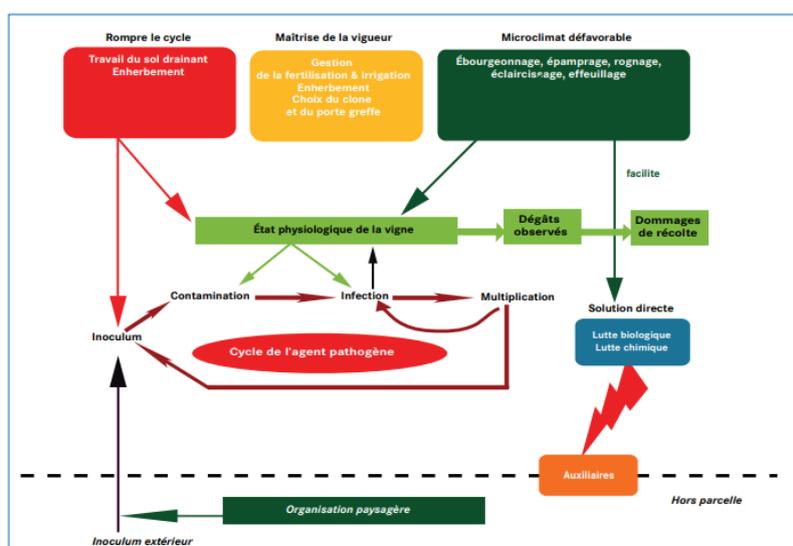


Figure 7 : Les solutions agronomiques contre les agents pathogènes responsables de maladies pour réduire l'utilisation des fongicides (Barbier et al., 2011).

La filière viticole travaille depuis de nombreuses années pour trouver des alternatives au désherbage chimique. La gestion de l'enherbement se gère à deux zones de la parcelle : l'inter-rang qui est l'espace entre deux rangs de vignes et sous le rang qui correspond à l'entretien entre les ceps. L'enherbement de l'inter-rang est de plus en plus pratiqué par les viticulteurs. Il peut être implanté en semant un couvert végétal ou en laissant s'implanter un couvert végétal naturel. L'enherbement peut engendrer une baisse de rendement et de vigueur donc sa gestion doit être adaptée au millésime et au sol (Garcia et al., 2018). Il possède de nombreux avantages : source importante de matières organiques qui favorise l'activité et la vie biologique du sol et une meilleure structure du sol (Garcia et al., 2018), améliore la portance du sol dans des conditions humides (Polge De Combret - Champart et al., 2013), protection des parcelles des ruissellements et limitation de l'érosion et du transfert de pesticides provoqués par les pluies (Battany & Grismer, 2000). L'enherbement sous le rang et total sont largement moins pratiqués. Pour gérer l'enherbement, l'entretien mécanique est une alternative au désherbage chimique qui est répandue dans les vignobles. Il se décompose en deux modalités de gestion de l'enherbement : le travail du sol et le désherbage mécanique. Le travail du sol permet le décomptage du sol, la remise à plat du sol, l'enfouissement d'une fumure ou d'un engrais vert et la préparation d'un semis. Le désherbage mécanique permet de détruire les adventices et il est réalisé plusieurs fois dans la campagne. Il favorise la prospection racinaire en profondeur (Dartigoeyte, 2006). Lors des premières années de mise en place, le système racinaire superficiel va être détruit pouvant réduire la vigueur de la vigne et baisser le rendement (Gaviglio, 2009). Il existe d'autres formes de désherbage qui sont bien moins développées comme le désherbage thermique et le désherbage électrique.

### 3.1.3 La Reconception des systèmes viticoles pour réduire les pesticides

La plantation de variétés résistantes a été classée dans la Reconception car elle correspond à la plantation de nouveaux cépages. L'utilisation de la génétique est un levier qui est utilisé dans toutes les cultures. Le principe est de rendre les plantes résistantes à une maladie grâce à un ou plusieurs gènes de résistance. Depuis les milieux des années 70, l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement (INRAE) travaille sur la création de cépages résistants en utilisant des vignes sauvages américaines ou asiatiques porteuses de gènes de résistance au mildiou et à l'oïdium. Cette première phase a donné naissance 25 ans plus tard à la collection « Bouquet » porteuse d'un gène majeur de résistance pour chaque maladie. Dès le début des années 2000, l'INRAE a travaillé sur la collection « Resdur » avec une résistance « polygénique » ou « oligogénique ». Depuis 2018, quatre cépages à résistance polygénique au mildiou et à l'oïdium sont inscrits au catalogue : Artaban, Vidoc pour les cépages noirs et Floreal, Voltis pour les cépages blancs (Yobregat, 2022). Ces cépages permettent une réduction de l'IFT fongicide hors produits de biocontrôle de -87% à -95% selon les millésimes par rapport à la référence nationale 2016 (Miclot et al., 2022). Une deuxième génération de cépages résistants comportant 5 cépages issue du programme ResDur 2, a été inscrite au catalogue en 2022. Cette génération dispose de résistances polygéniques au mildiou et à l'oïdium et présente une moindre sensibilité au Black rot. Actuellement, les viticulteurs français peuvent planter plus de 40 variétés résistantes (Yobregat, 2022). En 2022, 1035 hectares de variétés résistantes sont plantés en France (Yobregat, 2022). La dynamique de plantation continue et un total de 2000 hectares de cépages résistants en France sont plantés en 2024. Les cépages résistants sont présents dans différents cahiers des charges. En effet, 23 IGP (Indication Géographique Protégée) ont ajouté des variétés résistantes à leur cahier des charges et 16 AOP (Appellation d'Origine Protégée) les ont inscrites à leur cahier des charges à titre d'expérimentation dans le cadre de la directive « Variété d'intérêt à fin d'adaptation » (VIFA) dans la limite de 10 % des assemblages et 5 % des surfaces de l'exploitation (Perrot, 2024).

La conversion de parcelles en agriculture biologique est un autre exemple de Reconception. Les viticulteurs doivent suivre un cahier des charges qui proscrit le recours aux pesticides et aux engrais de synthèse. Cette interdiction demande une réorganisation du système et une implémentation d'une combinaison de leviers techniques pour réussir la gestion de l'herbe sans désherbage chimique, la gestion des maladies avec des fongicides de contacts et la gestion des ravageurs avec des insecticides d'origine naturelle moins efficaces que ceux de synthèse.

Un autre exemple de Reconception est l'agroforesterie qui a pour principe d'associer une production agricole à des plantations sylvicoles (Bourgade et al., 2018). La mise en place de parcelles en agroforesterie est plus simple lors d'une nouvelle plantation mais des parcelles peuvent être converties en créant de la place aux arbres (Bourgade et al., 2018).

Un dernier exemple de Reconception est le viti-pastoralisme qui associe deux systèmes : la viticulture et le pastoralisme (Bosch et al., 2021).

## 3.2 Un état des lieux des leviers réellement mobilisés par les viticulteurs dans une démarche de réduction des pesticides

L'ensemble des leviers présentés précédemment ne sont pas utilisés de manière égale par les viticulteurs. Au travers du projet DEPHY FERME, un état des lieux sur la mobilisation des leviers par les viticulteurs travaillant sur la réduction de l'utilisation des pesticides a été réalisé sur la période 2017-2020. L'intensité de recours à un levier est estimée par le nombre de systèmes de culture (SDC) qui le mobilisent au moins une fois lors des campagnes 2017 à 2020 (sur un total de 397 SDC) (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b). Le Tableau 1 offre une synthèse des leviers disponibles pour réduire l'utilisation des pesticides.

Concernant les fongicides, les leviers mobilisés les plus régulièrement ont pour objectif d'améliorer l'efficacité des traitements avec en priorité une modulation de la dose de fongicides, l'utilisation de bulletins techniques, les observations et les comptages des maladies. D'autres leviers appartenant à ce groupe sont cités dans une moindre mesure comme l'amélioration de la qualité de pulvérisation (pulvérisation face/face, traitements ciblés sur grappes, lance assistée / panneaux récupérateurs), l'utilisation des OAD et la protection différenciée selon les îlots. A noter que le recours à des panneaux récupérateurs est très majoritairement cité par les viticulteurs en agriculture conventionnelle. Dans un second temps, les viticulteurs mobilisent les leviers permettant la substitution des pesticides de synthèse. Ces leviers sont des techniques culturales qui atténuent le risque de développement des maladies comme l'aération du feuillage, la réduction de la vigueur et l'élimination de l'inoculum. Plus de la moitié des SDC utilisent des produits alternatifs tels que les produits de biocontrôle voir les préparations naturelles peu préoccupantes (PNPP) pour réduire le recours aux fongicides de synthèse. Le dernier levier mobilisé par les viticulteurs est la plantation de variétés résistantes (Figure 8).

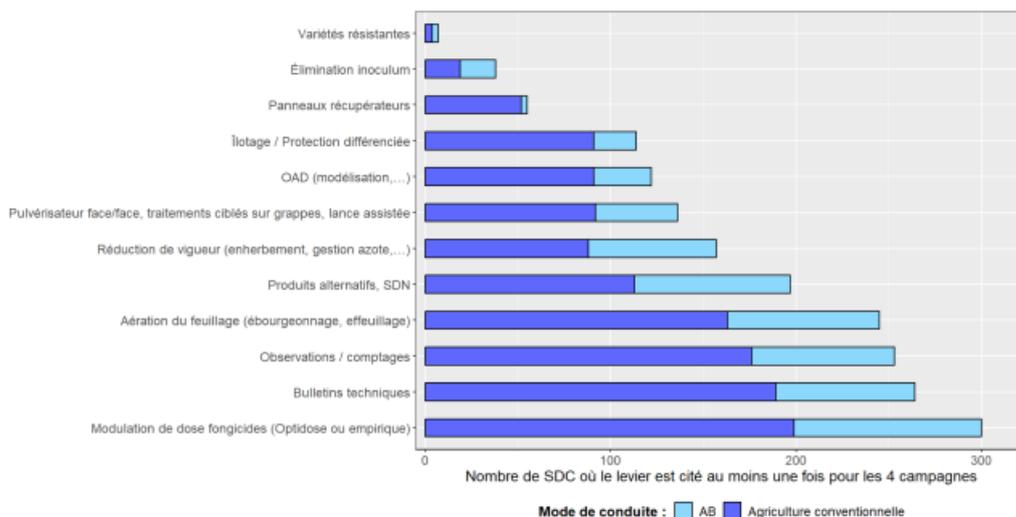


Figure 8 : Principaux leviers mobilisés dans des systèmes de culture visant à réduire l'utilisation des fongicides en agriculture biologique (AB) et en conventionnel, en nombre de systèmes de culture où le levier est mobilisé au moins une fois sur la période 2017-2020 (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b).

La réduction des herbicides est largement effectuée grâce au désherbage mécanique et à l'enherbement que ce soit en agriculture conventionnelle ou biologique (Figure 9). En agriculture conventionnelle, les viticulteurs limitent la quantité d'herbicides appliquée en réduisant la largeur de traitement et en modulant la dose des herbicides. Dans une moindre mesure, l'épamprage manuel ou mécanique est mobilisé par les viticulteurs. Le viti-pastoralisme n'est presque pas mis en place sauf dans quelques cas en agriculture biologique (Figure 9).

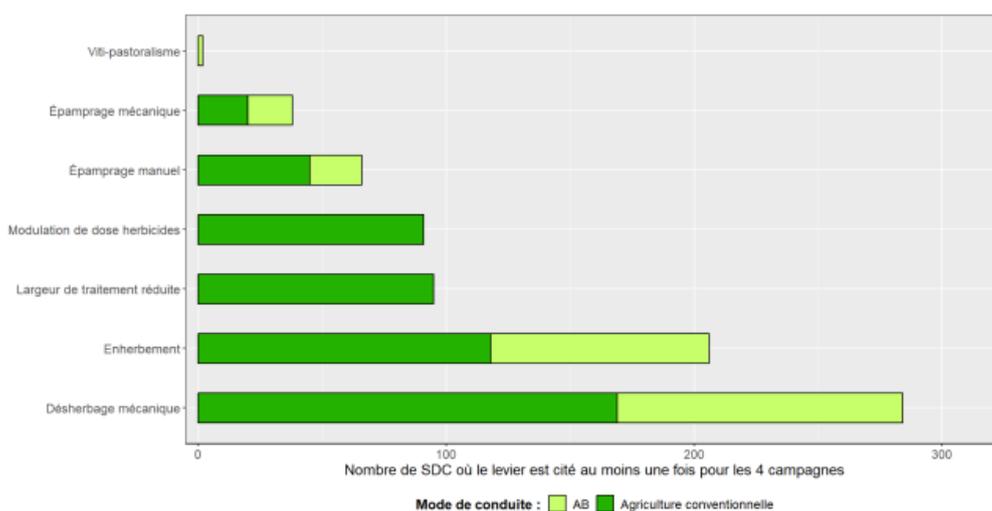


Figure 9 : Principaux leviers mobilisés dans des systèmes de culture visant à réduire l'utilisation des herbicides en agriculture biologique (AB) et en conventionnel, en nombre de systèmes de culture où le levier est mobilisé au moins une fois sur la période 2017-2020 (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b).

Pour réduire les insecticides, les viticulteurs utilisent en premier lieu les observations, les comptages et les piégeages puis les bulletins techniques pour améliorer l'efficacité des traitements (Figure 10). Dans une faible proportion, les viticulteurs améliorent leur qualité de pulvérisation en utilisant des pulvérisateurs face/face, des lances assistées et des panneaux récupérateurs pour améliorer

l'efficacité des traitements. Les viticulteurs utilisent plusieurs leviers relevant de la substitution aux insecticides dans des proportions équivalentes : élimination de l'inoculum (arrache de ceps atteints de la flavescence dorée), confusion sexuelle, aération du feuillage, produits alternatifs et réduction de la vigueur. A noter que l'optimisation des régulations naturelles via la gestion des paysages est majoritairement mise en avant par les systèmes en agriculture biologique.

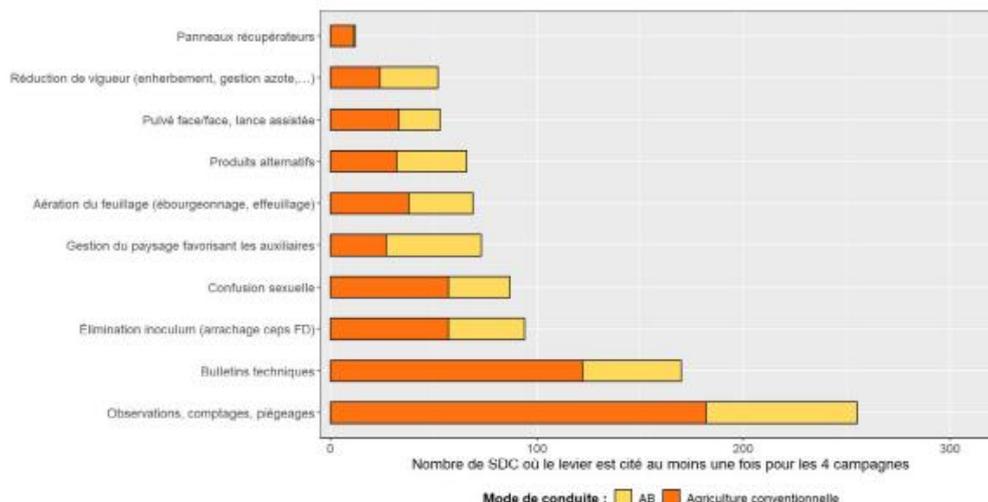


Figure 10 : Principaux leviers mobilisés dans des systèmes de culture visant à réduire l'utilisation des insecticides en agriculture biologique (AB) et en conventionnel, en nombre de systèmes de culture où le levier est mobilisé au moins une fois sur la période 2017-2020 (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b).

Tableau 1 : Synthèse des leviers disponibles pour réduire l'utilisation des pesticides.

Levier	Cadre ESR	Présentation	Type de pesticide visé	Efficacité de réduction de l'utilisation des pesticides (+ = faible, ++ = moyenne, +++ = forte)	Difficultés de mises en œuvre	Classement des leviers mobilisés en fonction du type de pesticides visé par les viticulteurs dans le réseau DEPHY FERME (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023)	Références
<b>Utilisation des OAD</b>	Efficience	La modélisation des événements contaminants liés aux maladies de la vigne a été développée et aujourd'hui elle se démocratise au travers de la mise en vente d'OAD pour les viticulteurs.	Fongicide et insecticide	++	Pas de difficultés techniques de mise en œuvre mais demande un abonnement de l'ordre de 300€ par an.	8/12	(Davy et al., 2020; Ducourt, 2023; Pertot et al., 2017; Picart et al., 2015)
<b>Modulation de la dose</b>	Efficience	La modulation de la dose appliquée peut se faire en prenant en compte le stade végétatif, la pression de maladies et le	Fongicide et herbicide	++	L'outil OPTIDOSE® est gratuit et en libre accès.	1/12 pour les fongicides, 4/7 pour les herbicides.	(Codis et al., 2013)

		volume de végétation.						
<b>Amélioration de la qualité de pulvérisation</b>	Efficiéce	L'objectif est d'améliorer la qualité de pulvérisation soit en réglant bien son pulvérisateur ou soit en achetant un pulvérisateur avec une meilleure qualité de pulvérisation.	Fongicide, insecticide et herbicide	++	Le réglage ne demande aucun investissement à l'inverse de l'achat qui peut être important.	7/12 pour les fongicides, 8/10 et 10/10 pour les insecticides.	(Auvergne et al., 2017; Codis et al., 2016, 2024)	
<b>Réduction de la largeur de traitement</b>	Efficiéce	L'objectif est de réduire la largeur du traitement herbicide.	Herbicide	++	Demande un réglage de la rampe de traitement.	3/7		
<b>Utilisation de produits de biocontrôle</b>	Substitution	En vigne, il existe au moins un produit de biocontrôle pour chaque bioagresseur.	Fongicide, insecticide et herbicide	L'efficacité est variable selon les produits de biocontrôle utilisés.	Les produits de biocontrôle sont généralement plus chers que les autres.	5/12 pour les fongicides, 4/10 pour les insecticides et non cité pour les herbicides.	(Aveline, 2024; Aveline et al., 2022; Pertot et al., 2017)	
<b>Désherbage mécanique</b>	Substitution	Le viticulteur désherbe mécaniquement à l'aide d'outils.	Herbicide	+++	Ce levier demande un investissement en équipements mais aussi une adaptation des vieilles vignes pour éviter l'arrachement de ceps.	1/7	(Dartigoeyt e, 2006; Gaviglio, 2009)	
<b>Enherbement</b>	Substitution	L'objectif est de couvrir une partie du sol et de le gérer.	Herbicide	++	Risque de forte concurrence donc il doit être raisonné selon les parcelles.	2/7	(Battany & Grismer, 2000; Garcia et al., 2018; Polge De Combret - Champart et al., 2013)	
<b>Epamprage mécanique et/ou manuel</b>	Substitution	L'objectif est d'éliminer les pampres manuellement ou mécaniquement.	Herbicide	+++	Ce levier demande un investissement en équipements.	5/7 pour l'épamprage manuel et 6/7 pour l'épamprage mécanique.	(Dubos, 2002)	
<b>Agriculture Biologique</b>	Reconception	L'AB oblige l'arrêt total des pesticides de synthèses.	Fongicide, herbicide et insecticide	+++	Ce levier demande un investissement en équipements.	Non cité.		
<b>Plantation de cépages résistants aux maladies</b>	Reconception	L'amélioration génétique a permis de créer des cépages résistants à certaines maladies.	Fongicide	+++	L'investissement à la plantation est plus important que les cépages traditionnels.	12/12	(Miclot et al., 2022; Yobregat, 2022)	
<b>Viti-foresterie</b>	Reconception				L'investissement à la plantation est plus important qu'une parcelle conventionnelle.	Non cité.	(Bourgade et al., 2018)	

<b>Viti-pastoralisme</b>	Reconception	L'objectif d'utiliser moutons entretenir parcelles l'hiver.	est les pour les durant	Herbicide	++	Il demande une coordination avec l'éleveur importante et surtout la présence d'un troupeau proche.	7/7	(Bosch et al., 2021)
--------------------------	--------------	---	-------------------------	-----------	----	--	-----	----------------------

### 3.3 La combinaison de ces leviers pour permettre une réduction de l'utilisation des pesticides

Comme vu précédemment, il existe de nombreux leviers disponibles pour réduire l'utilisation des pesticides avec des efficacités variables. L'approche système permet de les combiner pour envisager une réduction plus importante (Boulestreau et al., 2021; Jeuffroy, Ballot, et al., 2022).

En France dans le cadre du plan Ecophyto (I et II), deux réseaux DEPHY EXPE (2012-2018) et DEPHY EXPE 2 (2018-2024) ont permis de tester de nombreux systèmes de culture combinant plusieurs leviers pour réduire le recours aux pesticides dans différentes régions viticoles (Delière et al., 2016). Ces deux réseaux sont mis en place en priorité dans les stations expérimentales (40%) puis les lycées agricoles (30%) et chez les producteurs (30%) (Delière et al., 2016).

Au sein de réseau DEPHY EXPE, les leviers mobilisés pour réduire l'utilisation des herbicides sont essentiellement l'enherbement et le désherbage mécanique. Pour réduire les fongicides et les insecticides, les leviers sont nombreux et dépendent des sites d'expérimentations. Ils peuvent être classés en cinq groupes : l'utilisation de règles de décision pour réduire les traitements, la mise en place d'opérations culturales réduisant la sensibilité de la canopée comme la limitation de la vigueur, la substitution des pesticides de synthèse par des produits de biocontrôle, l'action sur l'inoculum en supprimant les bois de l'année et l'inoculum de black rot et pour finir la résistance variétale grâce à la plantation de variétés résistantes (Delière et al., 2016). Ces différents systèmes de culture ont tous permis de réduire l'IFT total hors produits de biocontrôle. Cette réduction varie de -14% à -90% en fonction des millésimes, des systèmes et des sites d'expérimentation. Dans l'ensemble les systèmes permettent de maintenir une bonne protection contre les bioagresseurs (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2019).

A partir de 2018, DEPHY EXPE 2 a remplacé DEPHY EXPE et avait pour objectif d'expérimenter des systèmes agro-écologiques pour un usage des pesticides en ultime recours (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2018). Sur les cinq projets en viticulture, trois étaient menés de 2018 à 2023 (BEE, DIVERVITI et SALSA) et deux étaient prévus de 2019 à 2024 (NextGen' VITI et OPERA). Le projet BEE a permis de réduire de -82% l'IFT total hors produits de biocontrôle en associant le cuivre et les produits de biocontrôle tout au long de la campagne de traitement. La protection contre le mildiou est difficile lors des années à forte pression et très bonne contre le black rot et l'oïdium. En moyenne, il a été observé une baisse de -20% du rendement et une augmentation de +25% du coût de la protection phytosanitaire (Burgun, 2024). Le projet SALSA a permis d'explorer des systèmes de culture basés sur la résistance variétale et combinant des leviers complémentaires. Les systèmes ont permis de réduire fortement l'utilisation des pesticides mais les résultats agronomiques ne sont pas tous satisfaisants avec des cas de non gestion de certains bioagresseurs et de baisse de rendement (Delière & Ley, 2024).

En parallèle de ces deux réseaux, de nombreux viticulteurs se sont engagés dans des groupes pour entamer une démarche de réduction des pesticides au travers du projet DEPHY FERME à partir de 2010 (Delière et al., 2016). Ces groupes de vignerons ont obtenu dans plusieurs régions viticoles françaises en moyenne une réduction de -24.4% pour l'ensemble des pesticides, de -25% pour les fongicides, -

14% pour les insecticides et -41% pour les herbicides, sur 10 ans d'expérimentation à la ferme (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023a). Cette réduction de l'IFT s'accompagne d'une réduction de -82€/hectare en moyenne de l'achat de pesticides. Elle n'engendre pas une maîtrise moins bonne du mildiou même dans les cas de pressions moyennes et fortes (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023a).

### 3.4 Les freins au déploiement des leviers de réduction de l'utilisation des pesticides dans les vignobles

Bien que de nombreux leviers pour réduire l'utilisation des pesticides existent et ont été expérimentés, les viticulteurs ont du mal à les mettre en place et à réduire le recours aux pesticides (Guichard et al., 2017). Cela s'explique par la présence de plusieurs freins qui empêchent le déploiement de ces leviers : techniques, organisationnels, économiques et psycho-sociaux (Aouadi et al., 2015).

Tout d'abord, la mise en place de certains leviers peut être confrontée à des freins techniques. Ces freins peuvent venir de la demande d'une plus grande technicité engendrée par le changement de pratique ou du fait que le levier n'est pas adapté à l'ensemble des parcelles de l'exploitation. Par exemple, le désherbage mécanique, la première alternative au désherbage chimique (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b), demande une prise en main de nouveaux outils qui ont besoin d'une technicité plus importante que les outils utilisés pour effectuer le désherbage chimique. De plus, il est difficile à mettre en place sur des parcelles anciennes à cause de la présence de ceps tordus (F. Jacquet et al., 2019).

Des freins organisationnels peuvent être rencontrés par le déploiement des leviers au sein des exploitations. La mise en place de certains leviers peut engendrer une augmentation du temps de travail ce qui demande une réorganisation des travaux. Par exemple, l'utilisation d'un pulvérisateur avec panneaux récupérateurs engendre régulièrement une augmentation du temps de traitement par rapport à l'existant donc il faut la prendre en compte dans l'organisation du travail (Beauvineau, 2018).

Le déploiement de certains leviers peut faire face à des freins économiques. Premièrement, le changement de pratique peut demander un investissement économique au travers de l'achat de matériels. Par exemple, le prix à l'achat d'un pulvérisateur avec panneaux récupérateurs est plus important qu'un pulvérisateur voûte pneumatique (Beauvineau, 2018). Deuxièmement, il peut engendrer une perte temporaire de rendement donc de revenu du fait du temps de familiarisation avec la nouvelle technique. Par exemple, le déploiement du désherbage mécanique peut détruire des souches et donc impacter la productivité s'il est mal maîtrisé (F. Jacquet et al., 2019).

Pour finir, des freins d'ordre psycho-sociaux peuvent bloquer l'adoption de certains leviers. Les viticulteurs sont attachés à la bonne tenue de leur vigne et à une perception qu'une belle parcelle est une parcelle « propre » correspondant à une maîtrise parfaite de l'enherbement. Cette perception est un frein au déploiement du désherbage mécanique et un moteur au maintien du désherbage chimique (Villain, 2022). Les agriculteurs sont entourés par de nombreux acteurs qui peuvent être un moteur ou un frein à l'adoption de nouvelles pratiques (Compagnone, 2004).

En viticulture, il existe de nombreux leviers pour réduire l'utilisation des pesticides. Ces leviers sont mobilisables à différents moments tout au long de la vie de la vigne : de la plantation à la récolte. De plus, ces leviers doivent être combinés pour permettre une meilleure réduction du recours aux pesticides tout en permettant une protection de la vigne de bonne qualité. Cependant, le

déploiement de ces leviers dans les vignobles rencontre différents freins qui limitent leur transfert aux viticulteurs.

## 4 La conception et l'évaluation de système de culture à bas niveaux de pesticides :

Dans la partie précédente, nous avons pu faire un état des lieux des différents leviers disponibles pour réduire l'utilisation des pesticides et de leur mobilisation par les viticulteurs. Ces leviers peuvent se combiner pour créer une synergie et permettre une plus grande réduction. Cette combinaison peut se réaliser en réfléchissant à la conception de systèmes de culture à bas niveaux de pesticides. Les systèmes conçus sont alors par la suite expérimentés de différentes manières pour évaluer leurs performances.

### 4.1 Le cadre conceptuel de la conception de système de culture

#### 4.1.1 Qu'est-ce que la conception ?

La conception se décompose en trois grands pôles :

- La définition de la problématique de conception permet la formulation du système visé et le diagnostic de la situation actuelle,
- La formalisation des solutions de conception consiste à la fois à générer des solutions de conception et à les explorer,
- La confrontation entre la problématique et les solutions de conception identifiées correspond à l'évaluation et l'implémentation des solutions conçues (L. Prost, 2019).

Dans le cadre de la réduction de l'utilisation des pesticides, ces trois pôles peuvent être identifiés de la manière suivante. Concernant la « définition de la problématique de conception », elle consiste à effectuer la transition de systèmes de culture dépendants aux pesticides vers des systèmes à bas niveaux de pesticides. En France, l'objectif est de réduire de -50% le recours de l'ensemble des pesticides d'ici 2025 dans le cadre d'Ecophyto II+. Le second et le troisième pôle peuvent par exemple être le projet DEPHY EXPE ECOVITI. Ce projet vise à mettre à disposition des professionnels des systèmes de culture viticoles innovants, validés sur des parcelles expérimentales, associant performance agronomique et économique avec une faible utilisation d'intrants phytosanitaires dans différents contextes pédoclimatiques (Delière et al., 2018; Métral et al., 2018; Serrano et al., 2019; Thiollet-Scholtus et al., 2019).

#### 4.1.2 Quelles sont les méthodes de conception ?

Il existe différentes méthodes de conception qui se décomposent en deux grands groupes : la conception « pas-à-pas » et la conception *de novo* (Meynard et al., 2012).

##### La conception « pas-à-pas » :

Elle consiste en une transformation progressive, année après année, d'un système de culture initial vers un système de culture en rupture par rapport à celui de départ et répondant à de nouveaux objectifs (Meynard et al., 2012). Cette amélioration du système se fait au travers de boucles d'apprentissages (Meynard, 2019). Le début de ces boucles est un diagnostic du système initial pour définir les éléments du système à améliorer pour se rapprocher des objectifs visés. Ensuite, une exploration des changements techniques ou organisationnels qui pourraient améliorer les

performances du système est réalisée. Puis, un des changements de la phase exploratoire est sélectionné et mis en œuvre. Ce changement est alors observé et évalué pour savoir s'il peut être intégré dans le système. A la suite, un nouveau diagnostic est réalisé et un nouvel objectif est défini pour engager une nouvelle boucle (Meynard, 2019). Par exemple, le projet DEPHY FERME a engagé 3000 agriculteurs dans une conception « pas-à-pas » de réduction de l'utilisation des pesticides depuis 2010 (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023a).

#### La conception de novo :

La conception *de novo* a comme objectif de construire un système en rupture avec l'existant pour répondre à un objectif ambitieux (Meynard et al., 2012). L'objectif est d'aller explorer des solutions qui ne sont pas aujourd'hui mises en place. Elle peut se réaliser au travers d'ateliers de prototypage participatif (conception à dire d'experts) ou avec l'utilisation de modèles, on parle alors de conception assistée par modèle.

- La conception à dire d'expert

Les experts sont les participants aux ateliers. L'objectif est de mixer différentes parties prenantes pour avoir une expertise diversifiée sur la thématique de travail (Kensing & Blomberg, 1998). Cette démarche se déroule en trois temps (Lançon et al., 2007; Vereijken, 1997). Tout d'abord, un cahier des charges est défini pour cadrer les objectifs à remplir et les contraintes. Puis, la phase de conception a lieu pour définir différents prototypes de systèmes de culture pouvant répondre au cahier des charges défini. Pour finir, ces prototypes sont évalués *a priori* grâce à l'expertise des participants et certains sont sélectionnés pour être mis en expérimentation en station ou à la ferme (Lançon et al., 2007; Vereijken, 1997). En France, dans le cadre du réseau DEPHY EXPE des chercheurs ont construits des systèmes de culture viticoles en rupture à bas niveaux d'intrants puis ils les ont évalués au travers d'une expérimentation en station (Delière et al., 2016).

- La conception assistée par un modèle existant

L'utilisation des modèles permet d'explorer une plus grande diversité de situations qu'avec la conception à dire d'experts. En effet, les modèles sont utilisés pour réaliser une évaluation *ex ante* d'une large gamme de possibilités (Bergez et al., 2010; Keating & McCown, 2001) qui n'auraient pas pu être expérimentée à cause des contraintes spatiales, temporelles et financières (Rossing et al., 1997; Storkey & Cussans, 2007). Par exemple, en France cette approche a été utilisée pour évaluer des stratégies d'adaptation construites collectivement avec les acteurs du bassin versant du Rieutort dans le Sud de la France grâce au modèle WaLIS-GraY (Naulleau et al., 2022) et pour évaluer des scénarios de gestion du phoma du colza avec le modèle SIPPOM-WOSR (Simulator for Integrated Pathogen Population Management) (Hossard et al., 2013). Dans le monde entier, des modèles ont été développés et utilisés lors d'activité de conception de systèmes de cultures (Le Gal et al., 2011).

### **4.1.3 Quels sont les acteurs mobilisables lors d'une démarche de conception ? et quels intérêts à mettre l'agriculteur au centre de la démarche ?**

Dans de nombreuses approches de conception, l'agronome conçoit un système de culture sans ou avec peu d'interaction avec l'agriculteur (Le Gal et al., 2011). En effet, l'innovation en agriculture est historiquement descendante : c'est-à-dire que l'ingénieur/l'agronome/le chercheur innove et l'agriculteur exécute (Salembier et al., 2018). Aujourd'hui, la tendance est plutôt ascendante en faisant participer les parties prenantes pour les aider à résoudre leur problème et pas juste à les faire appliquer une potentielle solution. Cette tendance a lieu car cela augmente les chances de réussite.

La participation peut être d'une intensité plus ou moins forte. Une échelle souvent utilisée pour décrire la relation entre l'agriculteur et le chercheur agronome est l'échelle de Biggs avec un gradient croissant de participation :

- Relation contractuelle : l'agriculteur prête ou loue sa parcelle au chercheur,
- Relation consultative : le chercheur consulte l'agriculteur pour effectuer un diagnostic et lui proposer une solution,
- Relation collaborative : le chercheur et l'agriculteur sont partenaires dans le processus de recherche en collaborant tout au long du processus,
- Relation collégiale : Le chercheur stimule la mise en place d'un processus informel de recherche par l'agriculteur (Lilja & Bellon, 2008).

Une même démarche de conception peut être réalisée avec un niveau de participation différent et donner des résultats différents. Les approches participatives avec la mise en place d'une relation de type collaborative et collégiale sont pertinentes pour encourager le changement et l'innovation (Vall et al., 2016). L'engagement et la participation des agriculteurs permettent de prendre en compte des critères qui sont pertinents pour eux pour évaluer les systèmes et légitimer les systèmes qui sont par la suite mis en expérimentation (Lairez et al., 2020; Salembier et al., 2016). La forte implication des agriculteurs dès le début de la conception favorise leur mobilisation et leur responsabilité vis-à-vis des innovations au travers d'échanges constants (Cerf et al., 2012).

## 4.2 L'évaluation des systèmes issus d'une démarche de conception

Suite à leur conception, les systèmes doivent être évalués avant d'envisager une mise en production chez les agriculteurs. Cette évaluation peut se faire par une expérimentation en station ou à la ferme et par la modélisation. Ces différents types d'évaluation peuvent cohabiter dans l'évaluation des systèmes issus d'une démarche de conception.

### 4.2.1 L'évaluation par une expérimentation « système »

En agronomie, il existe deux principaux types d'expérimentation : l'expérimentation factorielle et l'expérimentation système. L'expérimentation factorielle consiste à faire varier un seul facteur et tout le reste est égal pour étudier seulement l'impact de ce changement sur les autres variables du système (par exemple, la réponse de la culture à une dose d'azote) (Deytieux et al., 2012). Tandis que l'expérimentation système consiste à évaluer une combinaison de techniques composant un itinéraire technique voir un système de culture dans sa globalité par rapport à des objectifs fixés (Deytieux et al., 2012; Landais et al., 1988; Reau et al., 1996).

En plus de cette distinction qui peut être faite entre l'expérimentation factorielle et système, une différence entre une expérimentation en station d'expérimentation ou en parcelle agricole (on-farm expérimentation (OFE) en anglais) existe. L'expérimentation en station a pour objectif de produire des connaissances dans une situation contrôlée qui sont par la suite transférées aux agriculteurs (Meynard, 2016). Alors que l'expérimentation à la ferme a pour objectif de confronter les essais à différentes conditions de production (type de sol, climat, cépage ...) et contextes socio-économiques, avec la prise en compte de l'agriculteur et de ces contraintes (par exemple les équipements à sa disposition comme le pulvérisateur) (Drinkwater, 2002; Kyveryga et al., 2018). L'expérimentation à la ferme dans un réseau de parcelles pluriannuel et multi-local permet d'expérimenter des systèmes de culture dans plusieurs contextes de production et dans les conditions locales pertinentes. Cela renforce la confiance des agriculteurs car les connaissances proviennent d'une véritable ferme (Carton et al., 2022). Grâce à

l'OFE, les agriculteurs apprennent à gérer ces pratiques innovantes. Ils comprennent les risques associés et sont convaincus de la valeur de ces pratiques, ce qui semble conduire à une meilleure adoption des nouvelles pratiques (Catalogna et al., 2018; Kummer et al., 2012; Toffolini & Jeuffroy, 2022).

#### 4.2.2 L'évaluation par modélisation

Comme évoqué précédemment, la modélisation peut être utilisée lors de l'étape de la conception comme un outil d'aide à la conception mais elle peut être seulement utilisée pour évaluer les systèmes à la fin de l'étape de conception. Dans ce cas, l'utilisation de modèles permet d'évaluer les performances des systèmes construits (Jeuffroy et al., 2008). Ce type d'évaluation demande au préalable la construction d'un modèle pouvant donner une réponse aux hypothèses testées.

Il existe de nombreuses méthodes pour concevoir et évaluer des systèmes et l'implication des agriculteurs peut être de différents niveaux. L'implication des agriculteurs à toutes les étapes de la démarche allant de la conception à l'évaluation des systèmes semble permettre de produire des systèmes adaptés aux contraintes pédoclimatiques du territoire d'expérimentation et de permettre une meilleure adoption des nouvelles pratiques par la suite.

# 5 La modélisation pour accompagner les viticulteurs sur la réduction de l'utilisation des pesticides

La mise en place de systèmes combinant différents leviers d'action demande de prendre en compte l'impact du changement de pratiques sur l'ensemble des bioagresseurs. En effet, une technique peut défavoriser un bioagresseur et en favoriser un autre. Pour concevoir des systèmes de culture adaptés, il est primordial de prendre en compte le profil de dégâts (défini comme un ensemble de symptômes causés par un cortège de bioagresseurs) dans son ensemble (Savary et al., 2006). Pour prendre en compte la complexité des interactions entre les pratiques culturales, le pédoclimat, l'environnement et les bioagresseurs au sein de l'agroécosystème de la vigne, la modélisation semble la démarche la plus pertinente. En effet, elle permet de synthétiser la connaissance sur les maladies de la vigne et les interactions avec l'agroécosystème, de simuler et de prédire des phénomènes et d'aider à concevoir et à évaluer de nouveaux systèmes de culture.

La plupart des modèles conçus pour représenter les maladies en viticulture sont des modèles épidémiologiques pour aider les viticulteurs à positionner leurs traitements (Rossi et al., 2010). Ces modèles ne prennent que peu en compte les pratiques culturales (parfois le cépage est pris en compte par exemple) et l'environnement de la parcelle. Ils ont pour objectif de prédire le risque de contamination d'une maladie en fonction de données climatiques (par exemple la température, la pluviométrie et l'humidité). De nos jours, ces modèles sont intégrés dans des OAD pour aider les utilisateurs à prendre des décisions tactiques concernant la protection de la vigne (Rossi et al., 2012). Dans un premier temps, une présentation d'exemples de modèles et d'OAD est effectuée dans cette partie. Dans un second temps, une présentation de la modélisation qualitative au travers du modèle IPSIM (Injury Profil Simulator) et de ses intérêts est réalisée.

## 5.1 Des exemples de modèles développés pour chacune des trois maladies : mildiou, oïdium et black rot

### 5.1.1 La modélisation du mildiou

Le mildiou étant une maladie présente sur l'ensemble des vignobles du monde, de nombreux modèles ont été développés pour simuler une partie (maturation des oospores, contamination primaire et contamination secondaire) de son cycle ou l'ensemble de son cycle pour permettre de prédire le risque de contamination tout au long du stade de sensibilité de la vigne.

Le premier modèle par ordre chronologique pour décrire le début des infections de mildiou est la règle des 3-10 inventée par Baldacci en 1947 dans le Nord de l'Italie (Caffi et al., 2007). Il faut que la température moyenne soit égale ou supérieure à 10°C, que la pluviométrie à 24h-48h soit supérieure à 10mm et que la longueur des pousses de la vigne soit supérieure à 10cm pour déclencher le début de contamination de mildiou. Cette règle est bien trop simplificatrice pour décrire le processus complexe du développement du mildiou. Cependant, elle est simple à appliquer par les viticulteurs et elle a montré son efficacité ce qui fait qu'elle est encore aujourd'hui utilisée dans les vignobles (Mian et al., 2021). Par la suite, de nombreux modèles ont été développés prenant en compte plus d'informations pour prédire les infections de mildiou.

En France, le modèle EPI (Etat Potentiel d'Infection) a été développé dans les années 80 et permet de calculer la date de maturation des oospores en fonction de la pluviométrie et des températures du 1er octobre au 31 Mars puis de définir une infection potentielle du 1er Avril au 31 Août en fonction de l'humidité relative et la température (Caffi et al., 2007). Dans la continuité, les modèles Potentiels Systèmes ont été créés sur plusieurs maladies. Le modèle pour le mildiou prend en compte la température et la pluviométrie car la valeur d'humidité relative souffrait d'erreurs importantes lors de la création de ce modèle pour prédire la maturité des œufs de mildiou et les épisodes contaminants (Strizyk, 1994). Aujourd'hui, ce modèle est utilisé dans le cadre des bulletins de santé du végétal en France pour réaliser la modélisation épidémiologique du mildiou (Carretier, 2022b). Certains modèles simulent l'ensemble du cycle du mildiou en fonction des conditions climatiques comme le modèle DMCAST aux Etats-Unis (Park et al., 1997), le modèle UCSC en Italie (Caffi et al., 2007) et le modèle VitiMétéo Plasmopara en Suisse (Bleyer et al., 2008).

### 5.1.2 La modélisation de l'oïdium

Concernant l'oïdium, plusieurs modèles ont été développés. Par exemple, pour simuler la première application de fongicides avec le modèle OiDiag en Allemagne (Kast, 1997) et au Québec avec un modèle basé sur l'accumulation de degré jours (Carisse et al., 2009). Un autre modèle a été construit pour simuler les conditions minimales pour la décharge des ascospores à partir des cléistothèces (Gadoury & Pearson, 1990).

Plus récemment, un modèle combinant la croissance de la vigne avec la propagation de l'oïdium a été développé (Calonnec et al., 2008) et une mise à jour du modèle OiDiag (OiDiag2.2) a été effectuée en prenant en compte la résistance ontogénique des grappes (Kast & Bleyer, 2010). Deux modèles dynamiques totalement mécanistes ont été construits pour prédire la maturation des cléistothèces (Legler et al., 2012) et la dynamique de l'infection liée aux ascospores (Caffi et al., 2011). Une approche holistique quantitative de l'ensemble du cycle de vie de *Erysiphe necator* a été développée permettant une vision globale du pathosystème en tant que processus dynamique (Legler et al., 2010).

Dernièrement, un modèle probabiliste de réseau d'apprentissage bayésien combinant des facteurs environnementaux (temps, climat), pathogènes (stades de développement) et hôtes (sensibilité spécifique du cépage) a été proposé (Lu et al., 2020).

### 5.1.3 La modélisation du black rot

Le black rot est considéré comme une maladie secondaire car elle n'est pas présente sur l'ensemble des vignobles et qu'elle est souvent maîtrisée grâce aux traitements réalisés contre le mildiou et l'oïdium. Les travaux de modélisation sont moins nombreux et plus récents que pour les autres maladies.

Le premier modèle a été construit en 1977 et il définit le temps d'infection du black rot sur feuille en fonction de la température et de l'humectation des feuilles (Spotts, 1977). D'autres modèles simples ont été développés par la suite pour prédire le moment d'une épidémie probable du black rot prenant en compte des données climatiques comme la pluviométrie, l'humidité relative et les données de température (Ellis et al., 1986; Maurin et al., 1991). Certains modèles prennent en compte des données supplémentaires concernant le cycle biologique du black rot et le cycle phénologique de la vigne pour prédire les risques de contamination du black rot ce qui permet d'augmenter la qualité de prédiction des modèles (Molitor et al., 2016; Rossi et al., 2015).

Actuellement, aucun modèle n'a été validé en France et des travaux de validation sont menés au travers du projet ZéroBlackRot (2021-2024) (Dupin et al., 2023).

## 5.2 Les OAD mobilisant des modèles disponibles pour les viticulteurs français

Aujourd'hui, il existe de nombreux outils d'aide à la décision permettant de programmer les traitements en fonction des risques de contamination des maladies sur le marché français. L'OAD DeciTrait® a été développé par l'IFV et est disponible depuis 2020. Il intègre les modèles Potentiels Systèmes sur le mildiou et l'oïdium et d'autres informations comme l'historique parcellaire et le type de production (agriculture biologique ou conventionnelle) dans ces règles de décisions. Il n'intègre le black rot que par une information qualitative sur l'efficacité de la protection mildiou et oïdium vis-à-vis du black rot (Davy et al., 2020). Movida GrapeVision®, anciennement Movida®, est commercialisé par la société Bayer et propose une composante mildiou, oïdium et black rot (Chambre d'Agriculture de la Gironde & IFV, 2021). Ces différents outils d'aide à la décision ne demandent pas de station météo physique ce qui limite l'investissement pour le viticulteur.

A l'inverse, les OAD Rimpro® et AgroClim® demandent de posséder une station physique pour fonctionner (Ducourt, 2023). Rimpro® en plus des données climatiques de base (température, pluviométrie) prend en compte la donnée d'humectation du feuillage pour définir le risque de contamination (Bazireau, 2020) comparé aux trois autres OAD. Le prix de l'abonnement pour un viticulteur varie entre 75€ et 350€ (Ducourt, 2023).

L'ensemble de ces OAD permettent seulement de raisonner les traitements fongiques en fonction de la pression de l'année mais ils ne prennent pas en compte l'environnement et les pratiques culturales effectuées autre que les traitements.

## 5.3 La modélisation qualitative pour prendre en compte l'ensemble des facteurs influençant le développement des maladies

L'ensemble des modèles présentés précédemment sont essentiellement des modèles épidémiologiques qui ne tiennent pas compte des pratiques culturales du viticulteur et de l'environnement de la parcelle. Ce constat a été fait sur le blé et a conduit au développement d'une démarche qualitative prenant en compte l'ensemble de l'agroécosystème.

Cette démarche a donné lieu à la création du modèle IPSIM (Injury Profil Simulator) (Robin et al., 2013). Ce modèle qualitatif et hiérarchique prend en compte l'ensemble des facteurs influençant le développement d'un bioagresseur. Le modèle IPSIM a été développé pour plusieurs maladies de différentes cultures comme les maladies du blé d'hiver (Robin, 2014), du tournesol (Vedy-Zecchini, 2020) et du pommier (Demestihis, 2017). Il a été aussi développé pour des ravageurs comme le carpocapse et le puceron cendré du pommier (Demestihis, 2017), la mouche des fruits sur la chayote (Deguine et al., 2021) et sur une adventice, le *Cirsium arvense* (Lacroix et al., 2021).

L'adaptation du modèle IPSIM à la viticulture permettrait de prendre en compte l'agroécosystème viticole dans son ensemble et de ne pas raisonner qu'à l'échelle du pathogène comme c'est le cas dans les modèles épidémiologiques. Comme évoqué précédemment la réduction de l'utilisation des pesticides est plus efficace quand plusieurs leviers sont mobilisés dans les trois catégories du cadre ESR (Hill & MacRae, 1996), ce modèle permettrait de simuler leur combinaison et pourrait accompagner les viticulteurs dans la conception de système moins dépendant des pesticides.

Aujourd'hui, pour accompagner les viticulteurs dans la conception de systèmes viticoles moins dépendants des pesticides, il faut prendre en compte l'ensemble des facteurs qui ont une influence sur le développement des bioagresseurs. Actuellement, les modèles et les OAD se concentrent sur les facteurs épidémiologiques influençant le développement des maladies. A l'inverse, le modèle IPSIM permet de prendre en compte cette multitude de facteurs sous l'angle qualitatif. En effet, certains facteurs ne sont pas renseignables de manière quantitative alors que le qualitatif permet d'y répondre.

## 6 Définition de la problématique

Dans un contexte sociétal, environnemental et réglementaire qui demande la réduction de l'utilisation des pesticides et de non-réussite du transfert de leviers et de stratégies de traitement permettant aux viticulteurs de réduire le recours aux pesticides, il est nécessaire de les accompagner directement au sein de leur exploitation pour les encourager à les réduire. Dans ce contexte, la coopérative VINOVALIE, un acteur majeur des vins du Sud-Ouest ( voir partie II 1.2), a décidé d'accompagner ses adhérents dans la réduction de l'utilisation des pesticides au travers du projet VITI OBS dans lequel la thèse s'inscrit.

Cette thèse vise premièrement à développer et tester une démarche participative originale combinant des ateliers de co-conception, des expérimentations à la ferme et des ateliers de co-évaluation impliquant différentes parties prenantes dont les viticulteurs. Deuxièmement, elle vise à développer et évaluer les modèles IPSIM pour trois maladies de la vigne : mildiou, oïdium et black rot.

Ce travail de thèse a pour objectif de répondre à la problématique générale suivante :

### **Comment favoriser la réduction de l'utilisation des pesticides chez des viticulteurs coopérateurs ?**

Pour répondre à cette problématique, trois hypothèses de travail ont été posées :

- H1 : La co-conception de stratégies de protection du vignoble avec les viticulteurs est efficace pour réduire le recours aux pesticides en mobilisant différentes catégories de leviers.
- H2 : Les stratégies de protection du vignoble co-construites permettent de réduire l'utilisation de pesticides, mais peuvent conduire à une plus grande incidence des maladies et donc à une perte de rendement, ainsi qu'à une augmentation du coût de la protection contre les maladies avec l'utilisation de produits de biocontrôle.
- H3 : La modélisation IPSIM qualitative et agrégative des dégâts liés aux maladies selon les pratiques, le climat et l'environnement est un outil d'évaluation et de co-conception de stratégies réduisant le recours aux pesticides.

En cohérence avec ces hypothèses, la problématique générale de thèse a été découpée en trois questions de recherche (Figure 11) :

- QR1 : Comment co-construire et évaluer avec les viticulteurs des stratégies de protection du vignoble moins dépendantes des pesticides ?
- QR2 : Quelles sont les performances agronomiques et le coût de la protection contre les maladies des stratégies de protection du vignoble co-conçues ?
- QR3 : Peut-on simuler par modélisation le profil de dégâts liés aux principales maladies cryptogamiques de la vigne (mildiou, oïdium, black rot) en tenant compte du système technique d'un viticulteur, des conditions pédoclimatiques et de l'environnement de la parcelle ?

Pour répondre aux questions de recherche, la thèse se fixe trois objectifs de travail (Figure 11) :

1. Créer et conduire une démarche participative combinant des ateliers de co-conception, des expérimentations à la ferme et des ateliers de co-évaluation impliquant différentes parties prenantes dont les viticulteurs.
2. Evaluer les stratégies de protection du vignoble expérimentées à la ferme lors des ateliers de co-évaluation.
3. Développer et évaluer le modèle IPSIM-VIGNE concernant les principales maladies cryptogamiques de la vigne (mildiou, oïdium, black rot).

Le manuscrit est organisé en 4 parties : Etat de l'art et définition de la problématique, Contexte de la thèse et démarche générale de la thèse, Résultats divisé en trois chapitres de résultats et la discussion générale. Le chapitre 1 de la partie Résultats correspond à la construction et à l'utilisation de la démarche participative de co-construction des stratégies de protection du vignoble, le chapitre 2 de la partie Résultats est axé sur l'évaluation des stratégies protection du vignoble co-conçues et pour finir le chapitre 3 de la partie Résultats concerne la création des trois modèles IPSIM pour chacune des maladies et le modèle IPSIM-VIGNE (Figure 11).

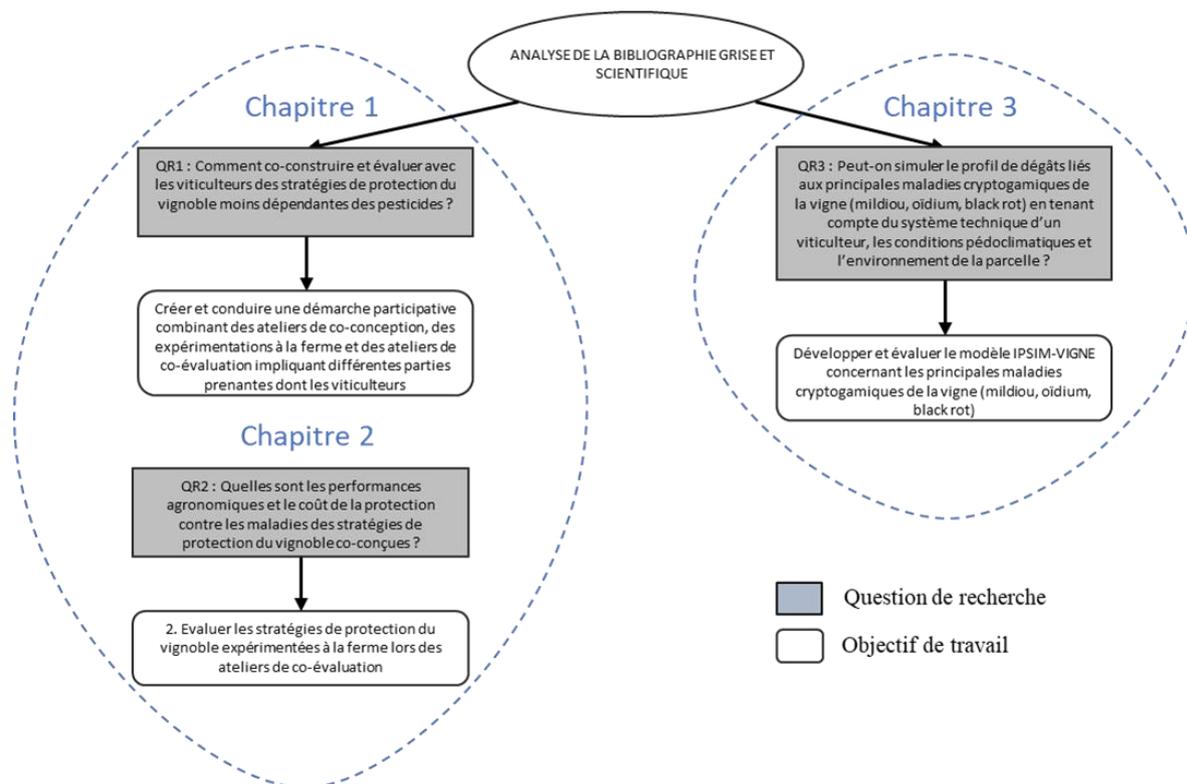


Figure 11 : Questions de recherche, objectifs de travail de la thèse et organisation des trois chapitres de la partie III Résultats.

---

## **PARTIE II Contexte de la thèse et démarche générale de la thèse**

---

# 1 Contexte de la thèse : trois vignobles du Sud-Ouest de la France (Cahors, Fronton et Gaillac) et la coopérative VINOVALIE, un acteur majeur du Sud-Ouest

## 1.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est constituée de trois vignobles de la région viticole du Sud-Ouest de la France : Gaillac, Fronton et Cahors. Cette région s'étend du département de l'Aveyron à l'Est jusqu'au département des Landes à l'Ouest. Elle est présente dans 13 départements et 2 régions (Figure 12). En 2021, la région viticole du Sud-Ouest s'étend sur 55 040 hectares soit 7.3% des surfaces nationales et la production des vignobles du Sud-Ouest est d'environ 2.7 millions d'hectolitres par an soit 7.9% de la production française (Interprofession des Vins du Sud-Ouest, 2024c). Elle est composée de 16 AOP et 11 IGP répartis dans 6 bassins (Interprofession des Vins du Sud-Ouest, 2024b). La répartition de la production par couleur est dominée par les vins blancs (56% de la production), puis les vins rouges (30%) et les vins rosés (14%) (Interprofession des Vins du Sud-Ouest, 2024c).

Les vignobles du Sud-Ouest offrent une grande diversité de cépages : 300 cépages sont référencés dans le Sud-Ouest, dont 120 cépages autochtones (Interprofession des Vins du Sud-Ouest, 2024a). Le vignoble de Gaillac est connu pour sa diversité de cépages rouges et blancs. Alors que les vignobles de Fronton et de Cahors ont un cépage « roi » : la négrette pour Fronton et le malbec pour Cahors (Interprofession des Vins du Sud-Ouest, 2024b). Les trois vignobles ont une production qui s'oriente majoritairement vers le rouge. Cependant, la production de rosé est importante à Fronton (44% de la production totale). Et à Gaillac, la production de blanc et de rosé n'est pas négligeable en représentant respectivement 26% et 14% de la production totale (Interprofession des Vins du Sud-Ouest, 2024b).

Les trois vignobles sont soumis à un climat océanique tempéré (Cfb) dans la classification de Köppen (Beck et al., 2018) avec une pluviométrie annuelle variant de 600 mm à 800 mm par an (moyenne annuelle de référence 1991-2020) (METEO FRANCE, 2024). Cette pluviométrie engendre une pression maladie qui peut être importante selon les années. La maladie principale est le mildiou mais le black rot devient problématique dans certaines conditions. L'oïdium ne pose en général pas de problèmes sauf pour certaines parcelles. Ces cas proviennent de parcelles avec des cépages très sensibles ou ayant un historique fort suite à des dégâts importants d'oïdium sur grappes lors des années précédentes (Serrano et al., 2019).

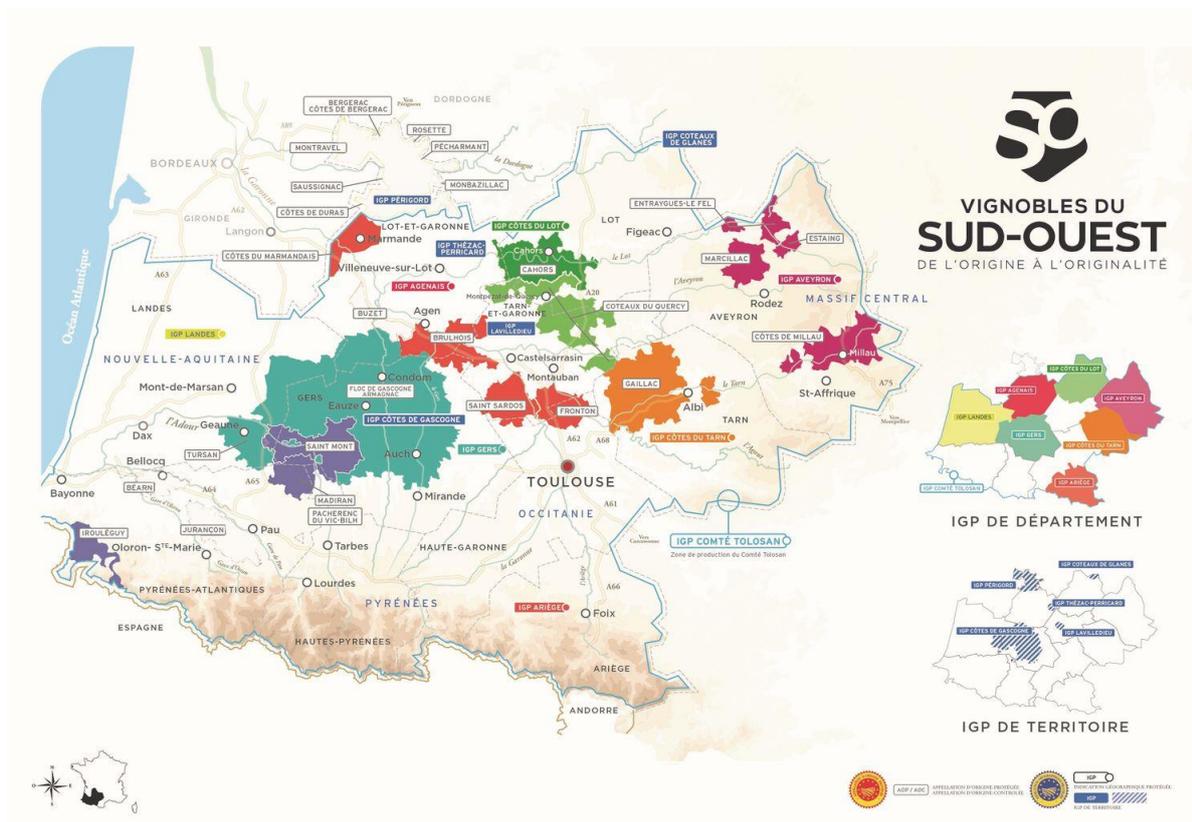


Figure 12 : Carte des vignobles du Sud-Ouest (Interprofession des Vins du Sud-Ouest, 2024b).

## 1.2 Présentation de VINOVALIE, un acteur majeur du Sud-Ouest

Le groupe VINOVALIE, né en 2006 de la fusion de quatre caves coopératives (Rabastens, Técou, Fronton et Côtes d’Olt), est le premier producteur de vin du Sud-Ouest en rouge et en rosé avec un volume commercialisé autour de 200 000 hl (Vinovalie, 2024). En 2023, Il regroupe 315 vigneron qui cultivent 3850 hectares de vignes sur les trois vignobles du Sud-Ouest de la zone d’étude : Cahors, Gaillac et Fronton (Vinovalie, 2024).

Depuis sa création, VINOVALIE soutient l’innovation de la vigne au vin. En 2016, la Recherche et Développement (R&D) prend un nouveau tournant chez VINOVALIE avec la création de la filiale VINOVALIE R&D. Une des priorités de VINOVALIE R&D est la réduction de l’utilisation des pesticides chez les coopérateurs de VINOVALIE (Vinovalie, 2024). Pour y répondre, le projet « Ambition zéro phyto » a été lancé en 2017. A travers ce projet, VINOVALIE veut inciter ses coopérateurs à conduire leurs vignes avec un itinéraire culturel à mi-chemin entre l’agriculture conventionnelle et l’agriculture biologique. De 2017 à 2020, un nombre restreint de parcelles d’expérimentation (maximum quatre parcelles) est mis en place chez des viticulteurs expérimentateurs. En 2020, le projet VITI OBS est lancé permettant la création d’un observatoire piloté de quatre stratégies de protection du vignoble visant à réduire le recours aux pesticides avec un niveau de réduction gradué. La thèse a été proposée dans le cadre de ce projet pour permettre une valorisation auprès de la filière.

## 2 Démarche générale de la thèse

La démarche mise en œuvre dans cette thèse combine trois grands types de méthode d'agronomie systémique : les ateliers de co-conception et de co-évaluation, l'expérimentation à la ferme et la modélisation (Figure 13).

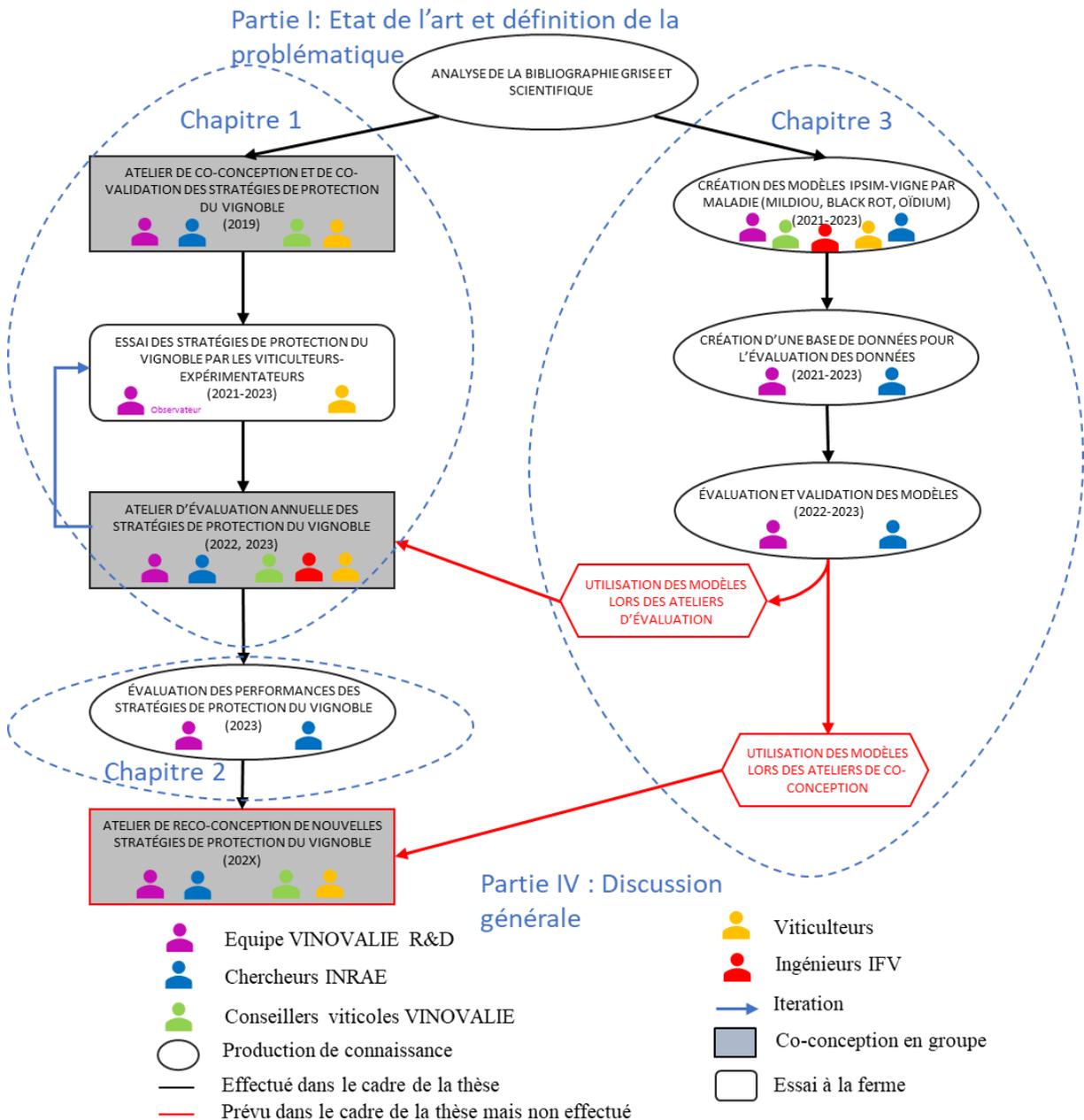


Figure 13 : Démarche générale de la thèse et organisation du manuscrit (chapitres indiqués en bleu)

## 2.1 Les ateliers de co-conception et de co-évaluation

La méthode de conception suivie dans cette thèse mêle conception *de novo* et pas-à-pas. En effet, les stratégies de protection du vignoble ont été construites en partant de zéro avec comme objectif de construire des stratégies en rupture avec l'existant pour répondre à un objectif ambitieux (Meynard et al., 2012). Cette conception s'est réalisée au travers d'ateliers de prototypage participatif (conception à dire d'experts). Par la suite, une phase de conception « pas-à-pas » (Meynard et al., 2012) a lieu avec l'expérimentation à la ferme des stratégies de protection du vignoble par les viticulteurs et avec leur amélioration continue avec des ateliers de co-évaluation annuels.

Un résumé du déroulement des ateliers est fait dans cette partie et le détail est présenté dans le chapitre 1 de la partie III Résultats. Les viticulteurs (personnage jaune sur la Figure 13) sont au centre de toutes les étapes de la démarche participative. Ils participent aux ateliers de co-conception et de co-évaluation des stratégies de protection du vignoble, mènent l'expérimentation à la ferme. Ils sont également associés à la construction des modèles IPSIM au travers d'une participation de certains viticulteurs aux ateliers d'experts (Figure 13).

Tout d'abord, un atelier de co-conception a eu lieu en novembre 2019 avant le début de la thèse et du projet VITI OBS. Il rassemblait l'ensemble des parties prenantes identifiées de l'étude sauf les ingénieurs de l'IFV qui ont été associés à l'étude au démarrage du projet VITI OBS en novembre 2020. L'objectif était de définir les quatre stratégies de protection du vignoble permettant de répondre à quatre objectifs de réduction de l'utilisation des pesticides formulés au préalable par la coopérative VINOVALIE. Les quatre objectifs étaient les suivants :

- « Raisoné » (IPM dans les chapitres de Résultat) : Réduction de moitié de l'Indicateur de Fréquence de Traitement total (IFTt) (les produits de biocontrôle n'étant pas inclus dans le calcul de l'IFTt) par rapport à la référence Haute Valeur Environnementale (HVE) (c'est-à-dire jusqu'à un IFTt max = 7,49 pour les trois AOP) et interdiction de tous les pesticides cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques (CMR),
- « 0 Résidu » (ORES dans les chapitres de Résultat) : Identique à « Raisoné » et sans résidus de pesticides dans les vins,
- « Biocontrôle » (BCT dans les chapitres de Résultat) : utilisation exclusivement de produits de biocontrôle et d'extraits de plantes, avec les traitements obligatoires contre la flavescence dorée,
- « BIO à 2 kg de cuivre » (ORG2kgCo dans les chapitres de Résultat) : agriculture biologique avec une utilisation maximale de cuivre de 2 kg/ha/an. En Europe, depuis 2018, l'utilisation du cuivre métal en agriculture (y compris en agriculture biologique) est limitée à un maximum de 28 kg/ha/7 ans, ce qui équivaut à 4 kg/ha/an.

L'atelier de co-conception a duré une journée durant laquelle seulement deux stratégies de protection du vignoble ont été construites au lieu des quatre initialement prévues : « Raisoné » et « BIO à 2 kg de cuivre ». Cet atelier s'est déroulé en 6 étapes qui sont décrites dans le chapitre 1 de la partie Résultats de la thèse. Les viticulteurs présents lors de cet atelier ne sont pas l'ensemble des viticulteurs qui par la suite ont participé à l'étude. En effet, ils étaient cinq. Ils avaient été choisis car ils avaient auparavant mis en place des expérimentations avec la coopérative VINOVALIE (trois étaient en agriculture conventionnelle et deux en agriculture biologique). Par la suite, ces cinq viticulteurs ont participé à l'étude.

Lors de l'atelier de co-conception, il a été décidé que la stratégie de protection du vignoble « 0 Résidu » reprenait la même stratégie que « Raisoné » avec une précision d'utilisation pour certains produits.

Par la suite, ces précisions ont été rédigées par moi-même (personnage rose « observateur » sur la Figure 13). Par manque de temps, la stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle » n’a pu être construite.

Deux semaines après cet atelier, un atelier de co-validation a eu lieu dans chaque vignoble réunissant seulement les viticulteurs du vignoble intéressés par une participation à l’étude. Au préalable, ces viticulteurs ont été contactés par téléphone pour leur faire une présentation de l’étude et les inviter à l’atelier de co-validation au sein de leur vignoble respectif. Lors de l’atelier, les stratégies de protection du vignoble leur ont été présentées et une discussion a eu lieu concernant des modifications qui pouvaient être réalisées. A la fin de cet atelier, les viticulteurs ont choisi la stratégie de protection du vignoble qu’ils allaient mettre en place sur leur parcelle d’expérimentation.

Pour finir, la stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle » a été co-construite lors d’un atelier de co-conception spécifique qui a duré une demi-journée en début d’année 2021 réunissant les différentes parties prenantes présentes lors du premier atelier de co-conception. Les viticulteurs présents étaient ceux qui avaient choisi de mettre en place cette stratégie de protection du vignoble et les ingénieurs de l’IFV étaient présents.

## 2.2 L’expérimentation à la ferme

L’expérimentation à la ferme a été conduite sur une parcelle de l’exploitation de chaque viticulteur engagé dans le projet (Figure 15). Le choix et le balisage de la parcelle d’expérimentation ont été effectués avec le viticulteur avant la première année d’expérimentation en 2021. Au total, au cours de la période 2021-2022, 20 viticulteurs (Tableau 2) ont mis en place une parcelle d’expérimentation (Figure 14). Les viticulteurs n°8, n°21 et n°28 ont mis en place la stratégie de protection de vignoble « BIO à 2 kg de cuivre » mais ils n’étaient pas en agriculture biologique donc l’information sur la quantité de cuivre moyenne (kg) de 2018 à 2020 n’existait pas.

Tableau 2 : Informations concernant les viticulteurs expérimentateurs et leur exploitation. Ha : hectare, IFTt : Indicateur de Fréquence de Traitement total hors produits de biocontrôle.

Numéro du viticulteur	Vignoble	Stratégie de protection du vignoble	Cépage	Age	Surface d’exploitation /vigne (ha)	IFTt moyen (2018-2020)	Quantité de cuivre moyenne en kg (2018-2020)
1	Fronton	Raisonné	Négrette	35	198/108	11,7	X
5	Fronton	Biocontrôle	Négrette	36	150/63	9	X
8	Fronton	BIO à 2 kg de cuivre	Négrette	57	55/10	X	X
9	Gaillac	Raisonné	Syrah	35	120/47	15,7	X
10	Gaillac	BIO à 2 kg de cuivre	Syrah	41	11/10	X	2,9
11	Gaillac	BIO à 2 kg de cuivre	Syrah	40	150/129	X	3,4
12	Gaillac	0 Résidu	Syrah	56	61/47	11,9	X
13	Gaillac	Raisonné	Syrah	60	27/11	11,7	X
14	Gaillac	BIO à 2 kg de cuivre	Syrah	49	100/65	X	3,3
15	Gaillac	Raisonné	Syrah	55	70/60	12,6	X
16	Gaillac	0 Résidu	Syrah	34	96/42	11,9	X

17	Gaillac	BIO à 2 kg de cuivre	Syrah	31	53/32	X	3,2
18	Cahors	Raisonné	Malbec	60	73/60	11,1	X
19	Cahors	Biocontrôle	Malbec	57	234/35	11,6	X
20	Cahors	0 Résidu	Malbec	60	40/31	14,6	X
21	Cahors	BIO à 2 kg de cuivre	Malbec	40	28/26	X	X
23	Cahors	0 Résidu	Malbec	47	46/21	10,3	X
24	Cahors	BIO à 2 kg de cuivre	Malbec	45	58/20	X	3,1
26	Cahors	0 Résidu	Malbec	58	53/40	10,7	X
28	Fronton	BIO à 2 kg de cuivre	Négrette	56	19/15	X	X

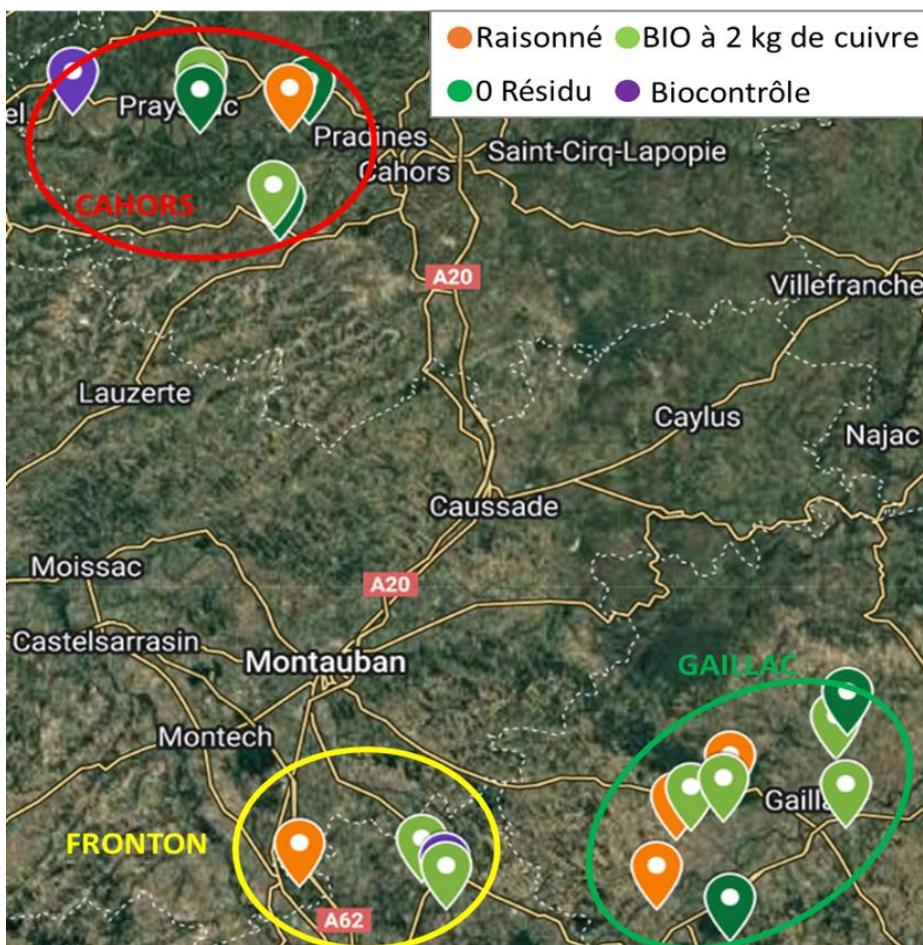


Figure 14 : Localisation des parcelles où les stratégies de protection du vignoble ont été mises en œuvre en 2021 et en 2022. Les trois ellipses représentent les limites de chaque région viticole (Cahors en rouge, Fronton en jaune et Gaillac en vert). Les symboles orange représentent les parcelles dédiées à la stratégie de protection du vignoble « Raisonné », les symboles vert clair ceux avec la stratégie « BIO à 2 kg de cuivre », les symboles vert foncé à la stratégie « 0 Résidu » et les symboles violets à la stratégie « Biocontrôle ».

Les parcelles d'expérimentation étaient aménagées en deux parties, de minimum 0,25 hectare (Figure 15). De cette manière, chaque parcelle avait été découpée en deux modalités de traitements dans

lesquelles quatre placettes de 15 ceps étaient positionnées afin de réaliser la collecte des différentes données comme les notations des maladies. Les placettes étaient positionnées de manière à couvrir le mieux possible la parcelle, en écartant un rang de garde et les premières piquetées de chaque rang pour éviter les effets de bord. La modalité viticulteur correspondait à la modalité témoin, où le viticulteur réalisait les mêmes traitements que sur le reste de son exploitation. Les traitements étaient réalisés avec le même pulvérisateur que celui du viticulteur.

Pour évaluer les performances des stratégies de protection du vignoble, un ensemble de données ont été collectées et des indicateurs de performances ont été choisis lors des différents ateliers. Ils sont présentés dans le chapitre 2 de la partie III Résultats.

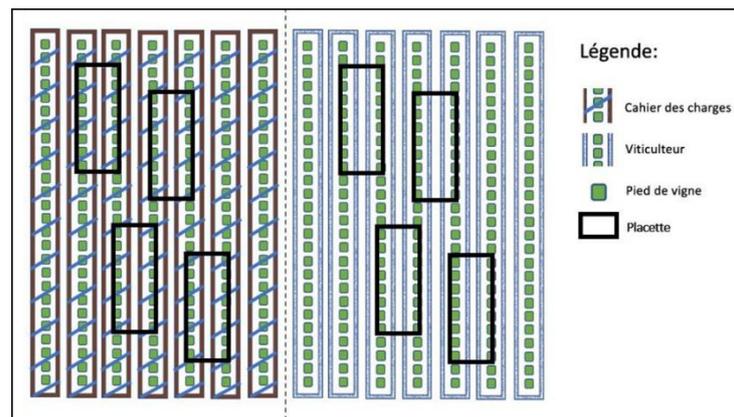


Figure 15 : Schéma théorique d'une parcelle d'expérimentation distinguant la zone où est appliquée la stratégie de protection du vignoble co-construite (environ 0,25 hectare) et la zone où le viticulteur applique ses traitements habituels (minimum 0,25 hectare).

## 2.3 La modélisation

Un travail de modélisation a lieu tout au long de la thèse. Une courte présentation est réalisée en suivant et une présentation plus détaillée est développée dans le chapitre 3 de la partie III Résultats. La méthode de modélisation utilisée dans le cadre de la thèse est la modélisation qualitative et hiérarchique IPSIM (Aubertot & Robin, 2013). Les modèles IPSIM sont construits à l'aide de la méthode DEX, implémentée dans le logiciel DEXi (Bohanec et al., 2013). Ces modèles ont pour objectif de prédire un profil de dégâts causés par plusieurs bioagresseurs sur une culture en fonction de la situation de production et des pratiques agricoles. Ils sont développés grâce à une analyse de la littérature scientifique et technique et à dire d'experts. La Figure 16 présente un arbre d'agrégation générique d'un modèle IPSIM.

Toutes les variables du modèle sont ordinales ou nominales. Les attributs possèdent un nom, une description et une échelle pouvant prendre plusieurs niveaux. Les attributs d'entrée représentent les variables d'entrée du modèle à remplir par l'utilisateur.

Les attributs agrégés représentent une agrégation d'autres attributs pouvant être des attributs d'entrée ou déjà agrégés. La valeur de l'échelle de l'attribut agrégé est définie grâce à une table d'agrégation. Cette table est un tableau composé de lignes représentant toutes les combinaisons possibles des différentes valeurs des attributs. L'attribut final est la variable de sortie du modèle IPSIM et sa valeur dépend de l'ensemble des valeurs des attributs d'entrée, de la structure du modèle et des différentes tables d'agrégation.

Dès que le modèle IPSIM est construit, une évaluation est alors réalisée à partir d'une base de données. Cette base de données a été construite au cours de la thèse. Cette évaluation utilise une matrice de confusion et six indicateurs statistiques : deux concernant le modèle global et quatre pour chaque classe de l'attribut final.

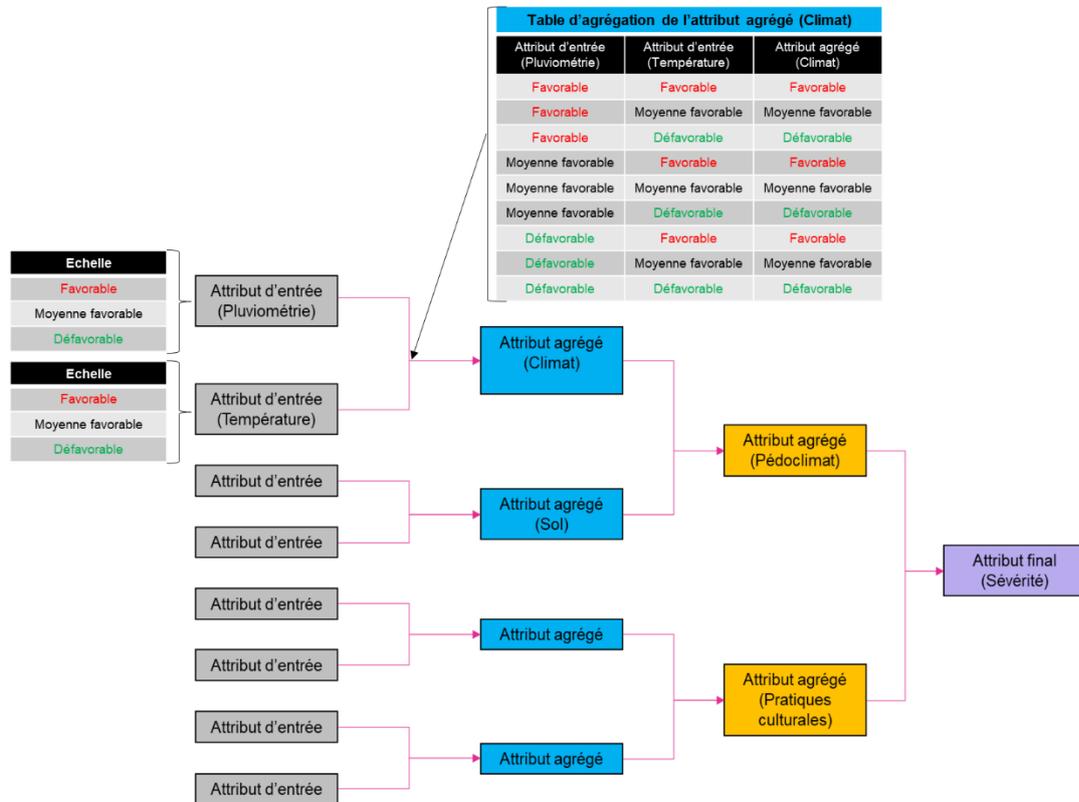


Figure 16 : Arbre d'agrégation d'un modèle IPSIM générique

---

## PARTIE III Résultats

---

# Chapitre 1 : A participatory approach to involve winegrowers in pesticide use reduction in viticulture in the South-Western region of France

## Contenu du chapitre :

Ce chapitre est rédigé sous la forme d'un article scientifique publié dans la revue Italian Journal of Agronomy. Nous avons fait le choix de publier dans cette revue car le thème de l'édition spéciale « Co-designing sustainable cropping systems' with stakeholders » représentait parfaitement le sujet de l'article.

Perez M, Hossard L, Gary C, Lacapelle P, Robin MH, Metay A, 2024. A participatory approach to involve winegrowers in pesticide use reduction in viticulture in the south-western region of France. Ital. J. Agron. 18:2209. DOI: <https://doi.org/10.4081/ija.2023.2209>

## Résumé du chapitre en français

La viticulture implique une utilisation importante de pesticides. Bien que des méthodes visant à réduire cette utilisation aient été proposées par les chercheurs, elles n'ont pas encore été largement mises en œuvre par les viticulteurs. L'implication des viticulteurs dans la conception participative de nouvelles stratégies de protection du vignoble pourrait encourager l'adoption de ces méthodes pour réduire l'utilisation des pesticides. Dans cette étude, nous avons conçu et testé une approche participative de la réduction de l'utilisation des pesticides qui serait acceptable pour les viticulteurs d'une coopérative du Sud-Ouest (c'est-à-dire des viticulteurs qui ne sont pas des « pionniers »). L'approche était composée de trois étapes principales : A) la co-conception des stratégies de protection du vignoble, B) la mise en œuvre des stratégies, et C) la co-évaluation des performances des stratégies de protection du vignoble mises en œuvre. Des viticulteurs, des chercheurs, des conseillers et des ingénieurs ont été impliqués dans l'étude. L'application de cette approche participative a permis de co-concevoir et de tester deux stratégies de protection du vignoble : « IPM » pour Integrated Pest Management (lutte intégrée) [réduction de 50% de l'indice de fréquence de traitement (IFT) par rapport à la référence Haute Valeur Environnementale (HVE) française], et « ORG2kgCo » pour un système en agriculture biologique avec un maximum de 2 kg de cuivre/ha/an. Ces deux stratégies de protection du vignoble ont été mises en œuvre par 11 viticulteurs dans trois vignobles du sud-ouest de la France. Dans les deux co-conçues, deux principaux leviers techniques ont été sélectionnés pour réduire l'utilisation des pesticides : un système d'aide à la décision pour optimiser l'utilisation et la substitution des pesticides par des produits de biocontrôle. La mise en œuvre de la stratégie de protection du vignoble « IPM » a permis une réduction significative de l'IFT (de -14% à -57%, avec une moyenne de -25%, tous pesticides confondus) par rapport à HVE, et les viticulteurs ayant testé « ORG2kgCo » ont réussi à ne pas dépasser la limite de 2 kg de cuivre par an. Cette démarche participative originale, combinant ateliers de co-conception, expérimentation en exploitation et ateliers de co-évaluation, a permis de mettre en évidence l'intérêt d'impliquer les viticulteurs dans la réduction de l'utilisation des pesticides.

# Abstract

Viticulture involves high pesticide use. While methods to reduce this use have been proposed by researchers, they have not yet been widely implemented by winegrowers. Involving winegrowers in the participatory design of new management strategies could encourage the adoption of these methods to reduce pesticide use. In this study, we designed and tested a participatory approach to reducing pesticide use that would be acceptable to winegrowers from a South-Western cooperative (i.e., not 'pioneering' winegrowers). The approach was composed of three main steps: A) co-design of the management strategies, B) implementation of the management strategies, and C) co-evaluation of the performances of the implemented management strategies. Winegrowers, researchers, advisors and engineers were involved in the study. The application of this participatory approach enabled the co-design and testing of two management strategies: IPM for Integrated Pest Management [50% reduction of pesticide treatment frequency index (TFI) as compared to the French High Environmental Value reference (HEV)], and ORG2kgCo for organic farming system with a maximum of 2 kg of copper/ha/year. These two management strategies were implemented by 11 winegrowers in three vineyards in South-Western France. In both management strategies, two main technical levers were selected to reduce pesticide use: a Decision Support System to optimise the use and substitution of pesticides by biocontrol products. The implementation of the IPM management strategy resulted in a significant reduction of TFI (from -14% to -57%, with an average of -25%, for all pesticides combined) compared to HEV, and the winegrowers who tested ORG2kgCo managed to not exceed the limit of 2 kg of copper per year. This original participatory approach, combining co-design workshops, on-farm experimentation and co-evaluation workshops, highlighted the benefits of involving winegrowers in the reduction of pesticide use.

## 1. Introduction

Reducing the use of pesticides is a major issue in agriculture, for environmental [e.g., pollinator decline (Brittain et al., 2010)] and health reasons (Inserm, 2021). In France, viticulture is one of the agricultural sectors with the most intensive pesticide use (Urruty et al., 2016), with fungicides representing 80% of treatments, followed by insecticides (15%) and herbicides (5%) (Mailly et al., 2017). This intensive use is due to several diseases (downy mildew (*Plasmopara viticola*), powdery mildew (*Erysiphe necator*), botrytis (*Botrytis cinerea*), black rot (*Guignardia bidwellii*)) and insects such as grape berry moths (*Eupoecilia ambiguella* and *Lobesia botrana*) that harm quality and quantity of grape yield at harvest (Fermaud et al., 2016). In French viticulture, as in other agricultural sectors, the application of pesticides is not decreasing (Urruty et al., 2016), despite significant efforts in research and development since the Ecophyto plan was launched in 2008 by the French government (Barzman & Dachbrodt-Saaydeh, 2011; Guichard et al., 2017). Research and Development highlighted a large diversity of technical levers, which may be categorized by the ESR (Efficiency-Substitution-Redesign) framework (Hill & MacRae, 1996). Efficiency levers correspond to the optimization of the timing, dose, frequency of application (Mailly et al., 2017), and the quality of spraying (Pertot et al., 2017). Substitution levers correspond to the substitution of synthetic products by biocontrol products (Pertot et al., 2017). Finally, Redesign levers for grape-growing systems mainly involve planting grape varieties resistant to downy mildew and powdery mildew (Pertot et al., 2017), and increasing biodiversity in the case of agroforestry viticulture (Romero et al., 2022). However, these technical levers remain under-utilised in most wine-growing regions (Mailly et al., 2017).

This current persistent consumption of pesticides in France (Hossard et al., 2017) is the result of a socio-technical lock-in involving a large number of actors in the agricultural world, of which pesticides

have become the *keystone* (Guichard et al., 2017). Several obstacles limiting the adoption of innovative strategies to reduce pesticide use have been identified: a lack of knowledge (Giampietri & Trestini, 2023), farmers' risk aversion (Aka et al., 2018; Pereira et al., 2017), a need for organisational flexibility, and the influence of traditional methods of working (Pereira et al., 2017). However, pesticide reduction has been proven to be effective when winegrowers are directly involved in the design of innovative systems, such as in the *Dephy Ferme' farmers* groups (Fouillet et al., 2022). The main objective of these groups, funded by the Ecophyto plan, was to demonstrate the capacity of farms to reduce their pesticide use. In these groups, winegrowers have been able to achieve an overall pesticide reduction rate of about 33%, with a 27% reduction in fungicides over 10 years (Fouillet et al., 2022). This urges us to promote the involvement of farmers from the beginning to the end in the process of reducing pesticide use.

Designing innovative agricultural systems can be achieved by different approaches, classified by Meynard et al. (2012) into three categories. First, the *step-by-step* approach is a progressive *in situ* change (over several years) of practices, supported by learning loops and producing an innovative system whose characteristics were not predictable at the beginning. This approach leads to a cautious evolution of practices, which requires time (Meynard et al., 2012). Second, the model-based approach offers a very broad exploration of combinations of techniques and environments, using agronomic models to determine which ones meet the desired objectives. However, this approach is difficult to implement because many research models are still ill-adapted to use by stakeholders in the field (Jeuffroy et al., 2008). Third, the participatory design of prototypes in design workshops involves stakeholders with diverse skills and knowledge to develop proposals towards a shared objective for all stakeholders (Jeuffroy, Loyce, et al., 2022). The prototypes consider options that are technically, economically and organisationally compatible with farmers' expectations and available resources (Lacombe et al., 2018). The experimentation of these prototypes is increasingly performed directly on farms in collaboration with farmers (Lacoste et al., 2021). This method, called on-farm experimentation, seems to lead to better adoption of new practices because, as winegrowers learn how to manage those practices, they comprehend the associated risks and become convinced of the value of these practices (Catalogna et al., 2018; Kummer et al., 2012; Toffolini & Jeuffroy, 2022). In exploring farmers' learning processes, Chantre & Cardona (2014) highlighted the importance of sharing feedback from experiences with others stakeholders (*e.g.*, farmer, advisor, researcher) to gain new knowledge, especially through experimentation. Indeed, these farmers can be the catalysts for the change required for widespread adoption in the community (Pant & Hambly Odame, 2009). The involvement of farmers in the evaluation of these prototypes, is interesting because they participate in the definition of the evaluation method, and they select indicators that are relevant and meaningful to themselves (King et al., 2000) such as yield, labor time, nitrogen rate, and irrigation amount (Nolot & Debaeke, 2003). A few recent studies have combined participatory co-design, on-farm experimentation, and co-evaluation on other cropping systems or topics such as the introduction of camelina as a second crop (Leclère et al., 2018) or reduction of herbicide use in citrus orchards (Le Bellec et al., 2012). Recently, Masson et al. (2021) analysed from an epistemological perspective the interdisciplinarity process of associating the human and social sciences with agronomic and biological sciences to reduce herbicide use in viticulture on a transnational scale. Until now, we have found no study describing technically a participatory approach mobilising winegrowers and other stakeholders at a regional scale, to simultaneously co-design, co-implement (on-farm experimentation), and co-evaluate management strategies to reduce pesticide use (fungicides, insecticides and herbicides). In this study, management strategies correspond to a combination of technical levers that can be used by winegrowers.

This paper aims to answer the following research question “How to promote pesticide use reduction in real winegrowing conditions? What strategies does this participatory method produce for reducing pesticide use?”. To answer these questions, we created and applied an original participatory approach combining co-design workshops, on-farm experimentation and co-evaluation workshops in viticulture involving different stakeholders that included winegrowers. We assume that this combination is relevant to facilitate the reduction of all pesticides used. Our case study took place in the South-Western region of France. Participants were winegrowers, researchers from INRAE (National Research Institute for Agriculture, Food and the Environment), engineers from IFV (French Institute on Vine and Wine), wine advisors and engineers of the Research & Development team from a wine cooperative. After presenting the participatory approach and the results it produced, we discuss the relevance of our participatory approach regarding three aspects: involvement of winegrowers, effective reduction in pesticide use, and perspectives towards a large adoption of these management strategies.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Study area

This study was realised through the VITI OBS project in partnership with a regional wine cooperative (VINOVALIE) willing to push for a reduction in pesticide use. This cooperative is the biggest wine producer in the South-Western part of France, representing about 300 winegrowers and 4000 hectares of vineyards, out of the 53,863 ha in the South-Western region in 2019 (IVSO, 2022). Our case study was located in this area, covering three Protected Designation of Origin (PDO) regions: Cahors, Fronton and Gaillac (Figure 17). This study is focused on PDO fields with targeted yields of 50-55 hl/ha depending on the PDO. Winegrowers often achieve these yields. This region is influenced by an oceanic climate, characterised by an average annual rainfall of about 800 mm. The rainfall intensity is low in winter and high in summer due to thunderstorms. These thunderstorms cause significant pressure from cryptogamic diseases: downy mildew and black rot, which may require high use of fungicides for their control. Even if the quantity of pesticides fluctuates depending on the vintage, disease, insect and weed pressure, the three considered PDO had overall total TFI higher than the national average. In 2019, the average total TFI of VINOVALIE members was close to this TFI (Tableau 3). In general, the VINOVALIE winegrowers apply 7-9 rounds of fungicides, often combining two molecules. They mechanically weed alternate inter-rows, the intervening rows being left with natural vegetation cover. The soil under the vine is managed by chemical weeding (2-3 herbicide applications on average per season). In the wine-growing region, two treatments against the leafhopper vector of Flavescence Dorée are mandatory. On average, winegrowers apply one more insecticide to manage green leafhoppers and grape berry moths.

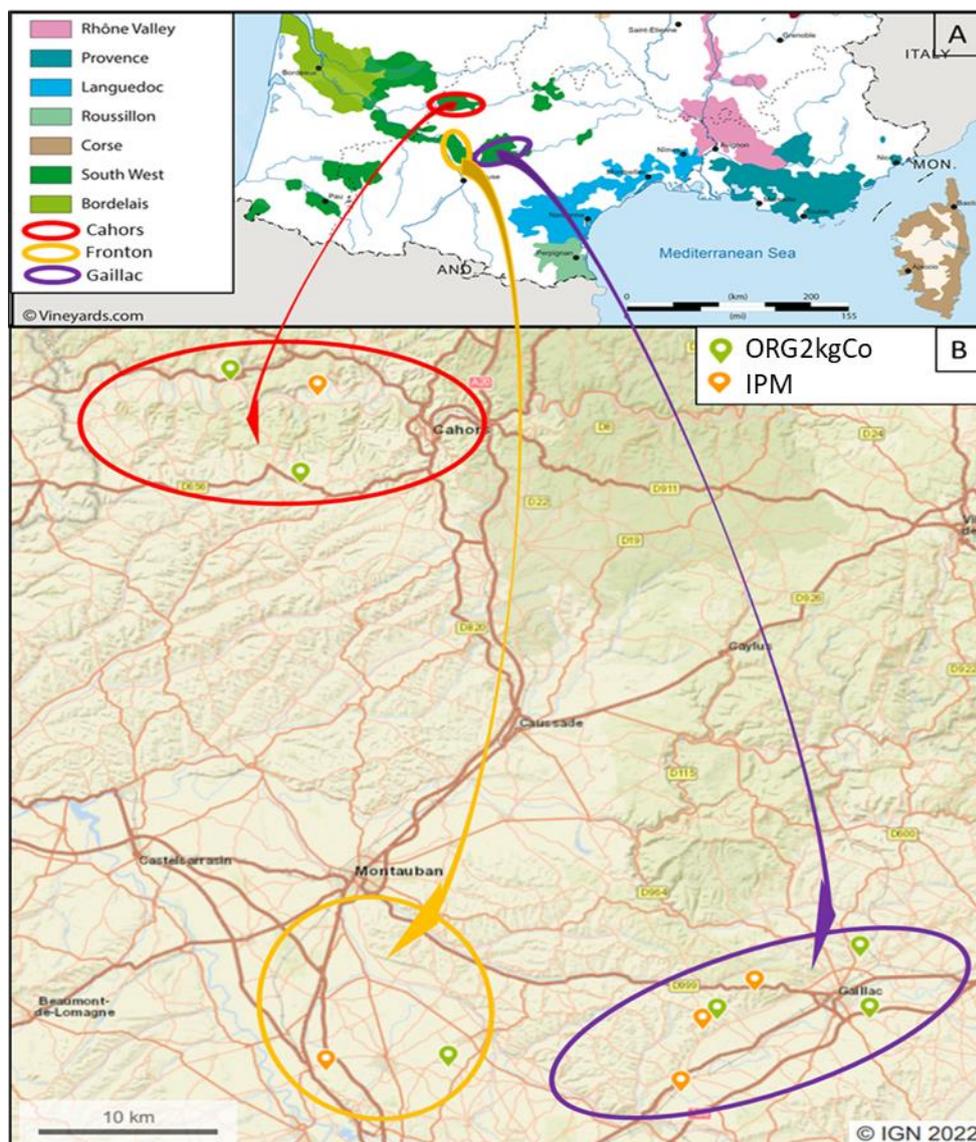


Figure 17 : Location of (A) the winegrowing areas in South-Western France included in the study and (B) the fields where management strategies were implemented in 2021. The three ellipses represent the boundaries of each winegrowing region (Cahors in red, Fronton in yellow, and Gaillac in purple). The orange symbols represent the fields dedicated to the IPM management strategy and the green symbols represent the fields with the ORG2kgCo management strategy.

Tableau 3 : Treatment frequency index (TFI) data per vineyard. Fronton was not concerned by the study in 2019.

	Mean total TFI of the vineyard in 2019 (Simonovici and Caray, 2021)	Mean total TFI of VINOVALIE members in 2019
<b>Gaillac</b>	13.1	12.4
<b>Fronton</b>	-	12
<b>Cahors</b>	14.4	11.5
<b>France</b>	12.4	-

# 2.2 Methodological approach

## 2.2.1 General framework

The original participatory approach we created, combines experimentation and workshops based on three main steps: Step A) Co-design and co-validation of the management strategies, Step B) Implementation of the management strategies, and Step C) Co-evaluation of the performance of the implemented management strategies (Figure 18). This participatory approach combined individual interviews carried out with one winegrower at a time, and collective actions carried out in groups during workshops. Note that the people involved in the different workshops differed according to the different steps. This participatory approach allowed the co-design of four management strategies, but this paper focuses only on two management strategies.

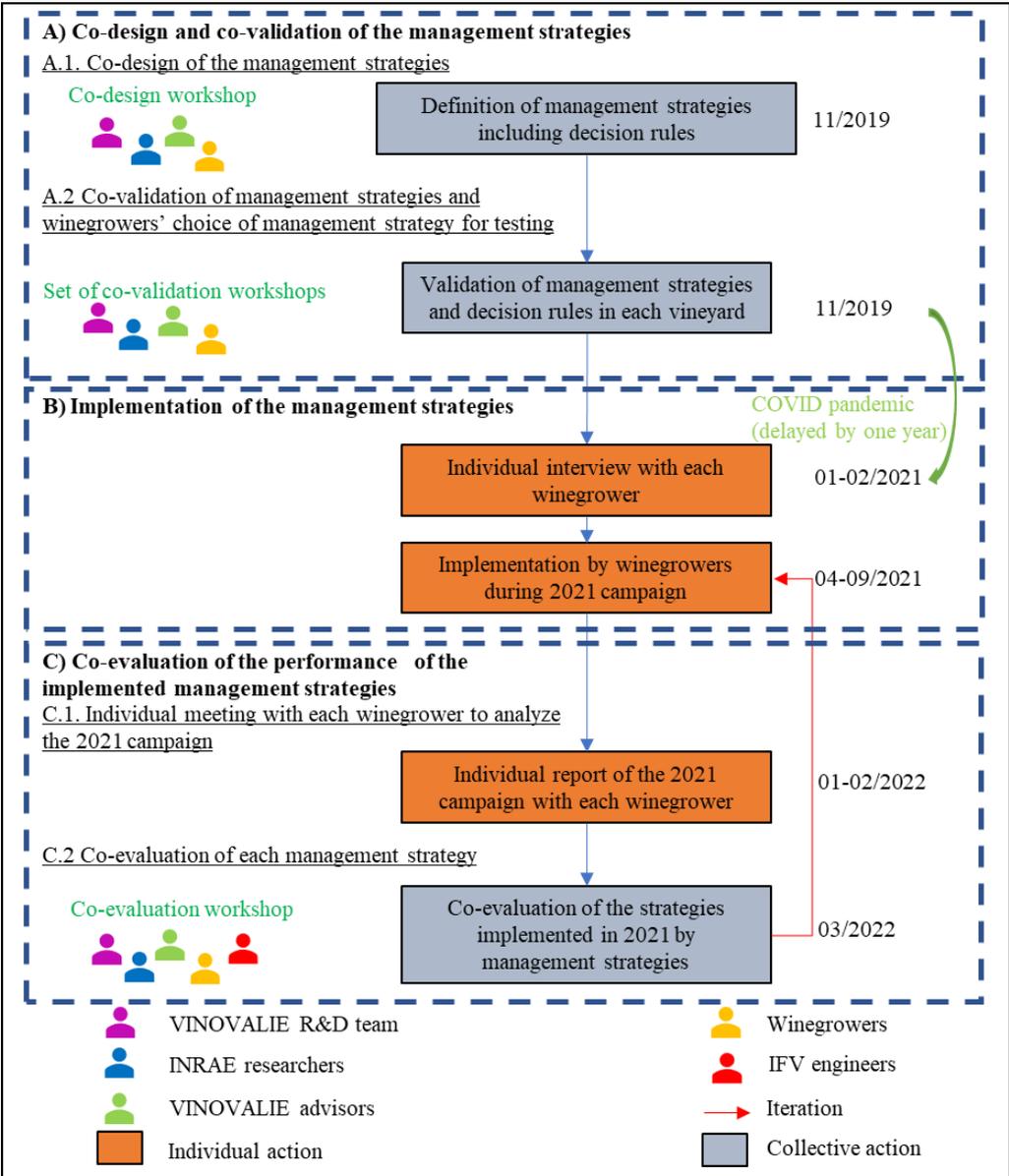


Figure 18 : General framework of the participatory approach with its three main steps: A) Co-design and co-validation of the management strategies, B) Implementation of the management strategies and C) Co-evaluation of the performance of the implemented management strategies. The date of each step is written in month/year format. R&D, Research & Development; INRAE, French National Research

Institute for Agriculture and Environment, Food and the Environment; IFV, French Institute of Vine and Wine.

## 2.2.2 Characteristics of the participants

Five types of participants were mobilised with different roles throughout the process (Tableau 4). Two types of participants were involved in all steps: the winegrowers and VINOVALIE Research & Development (R&D) team (Tableau 5). The participation of the winegrowers was essential, as they are the ones who test and (eventually) adopt the new practices. We worked with a diverse group of winegrowers, all VINOVALIE members. The VINOVALIE R&D team included the R&D manager and the study coordinator. Two other types of participants were present at all steps except step B: VINOVALIE advisors and INRAE researchers (Tableau 5). The VINOVALIE advisors included the vineyard technicians and the environmental coordinator. The last type of participants was IFV engineers, who only participated in the last step (Tableau 5). Their absence in the previous steps is due to the fact that the co-design step was performed before the official start of the VITI OBS project in which the IFV engineer was involved.

Tableau 4 : Type and role of participants in the three steps of the collaborative study.

<b>Participant's type</b>	<b>Role</b>
<b>Winegrowers</b>	Bring their experience of the problems encountered in their vineyard to the design process and implementation of the management strategies.
<b>VINOVALIE advisors</b>	Bring their experience of the problems encountered in the vineyard to the design process. Their knowledge on technical issues for each management strategy was important as they are the first interlocutors of the winegrowers during the crop protection campaign. The participation of the coordinator is important because he will be in charge of promoting the new strategies to the winegrowers, after their co-design, co-testing, and co-evaluation.
<b>INRAE researchers</b>	Bring specialist knowledge into the co-designing and the co-evaluating processes, using results of the latest studies on pesticide reduction to help identify the most relevant and effective solutions.
<b>IFV engineers</b>	Bring results of the latest local studies on pesticide reduction to help identify the most relevant and effective solutions.
<b>VINOVALIE R&amp;D</b>	Supervision and coordination of the study.

Tableau 5 : Type and number of participants in the three steps of the collaborative study. \*The number of winegrowers corresponds to the total number of participants, involved in the co-design of the four management strategies.

Type of the stakeholders	Step A.1: co-design of the management strategies	Step A.2*: co-validation of management strategies and choice of strategy for winegrowers' management testing			Step B: implementation of the management strategies		Step C.1: individual meeting with each winegrower to analyse the 2021 campaign	Step C.2: co-evaluation of each management strategy	
		Gaillac	Fronton	Cahors	IPM	ORG2kg Co		IPM	ORG2kg Co
Winegrowers	5	5	7	7	5	6	11	4	4
VINOVALIE advisors	5	2	1	1	0	0	0	5	5
INRAE researchers	2	2	2	1	0	0	0	0	2
IFV engineers	0	0	0	0	0	0	0	1	0
VINOVALIE R&D team	2	2	2	2	1	1	1	1	1
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>12</b>

## 2.2.3 Step A: Co-design and co-validation of the management strategies

### Step A.1: Co-design of the management strategies

Shortly before the co-design workshop, VINOVALIE defined the main objectives for the two strategies to be co-designed. First, the objective of the Integrated Pest Management (IPM) management strategy aimed at respecting the current non-constraining pesticide reduction objective of the Ecophyto II+ plan (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire Français, 2022). Second, the ORG2kgCo management strategy was designed to anticipate the future re-registration of copper in 2025, the specifications of which might limit use to 2 kg/ha/year (currently 4 kg/ha/year). The objectives of management strategies were:

- IPM: Reduction by half of TFI as compared to the HEV (High Environmental Value) reference. As according to HEV standard TFI is 14.98 (with biocontrol products not included in TFI calculation), the objective of IPM is to maintain TFI below 7.49. All carcinogenic, mutagenic and reprotoxic (CMR) pesticides are prohibited.
- ORG2kgCo: organic farming system with a maximum of 2 kg/ha/year of copper.

The co-design workshop was organised over one day, including sessions aimed at listing the potential levers to decrease pesticides, and their organization within each strategy (Tableau 6). Five winegrowers were selected because they had already hosted previous experiments for VINOVALIE concerning the reduction of pesticide use: two from Gaillac and Fronton, and one from Cahors. Among the five winegrowers, two were organic farmers: one in Fronton and one in Gaillac.

Tableau 6 : Detailed content of the six sessions of Step A.1: Co-design of the management strategies.

Session number	Detailed content of each session	Duration (in min)	Form
1	Introduction of the study and the workshop participants.	15	Round table
2	Definition of the constraints on reaching the objectives of the two management strategies.	30	Open discussion
3	Listing of technical levers concerning disease management (downy mildew, powdery mildew, black rot and <i>botrytis cinerea</i> ), insect management (phytoplasma, grape berry moths and green leafhopper), and weed management. that could be used for the two management strategies.	30	This brainstorming session took place around a whiteboard presenting the vine phenological cycle on which the participants were invited to position the technical levers
4	Definition of the IPM management strategy in three parts: (1) building the decision rules from scratch ; (2) presentation of the systems tested in the DEPHY EXPE ECOVITI South-Western project (Serrano et al., 2019) ; (3) modification of the decisions rules according to new knowledge from part (2)	90	All the participants discussed and chose technical levers from the inventory compiled in session 3, For each lever, the participants collectively defined the decision rules expressed in the form of “If-Then” sentences (e.g., “If mass contamination of downy mildew is modelled by the Decision Support System (DSS), then a treatment must be performed” in the IPM management strategy). Each disease and insect pest were considered independently.
5	Definition of the ORG2kgCo management strategy.	90	
6	Definition of the agronomic, ecological and economic indicators to be used to assess the management strategies.	15	Open discussion

### Step A.2: Co-validation of management strategies and winegrowers’ choice of management strategy for testing

The objective of the cooperative was to implement the two management strategies in three different fields in each of the three PDO production zones (which represent a total of 18 fields, managed by 18 different winegrowers). To be representative of the different production conditions, VINOVALIE advisors and the study coordinator divided each of the three PDO production zone into three sub-zones representative of the different soil types and climatic contexts. They then compiled a list of winegrowers potentially interested in the project who owned fields in the 9 sub-zones. No selection criteria on their cropping practices were applied. Afterwards, the study coordinator called on each of the winegrowers individually to present the project and to invite them to the co-validation workshops. All contacted winegrowers (seven in Gaillac and Cahors, and five in Fronton) participated in the co-validation workshops.

One co-validation workshop (4 hours, step A.2) took place in each of the three wine-growing areas. The VINOVALIE advisors were represented by the local vineyard technician (Tableau 5). The objective

was to define specificities and local adaptations of management strategies for each of the three wine-growing areas. First, the two previously co-designed management strategies were presented to each group of volunteer winegrowers. Second, the winegrowers were asked to discuss the strategies to adapt them to the specificities of their vineyards. Note that no changes were made by local winegrowers at this step. Thirdly, the winegrowers chose one management strategy and committed to implementing it.

## 2.2.4 Step B: Implementation of the management strategies

The implementation of the management strategies was supposed to start in 2020 but due to the COVID pandemic, it was delayed by one year.

### The individual interview with each winegrower

During the winter (January to February 2021) preceding the 2021 campaign, an individual interview with each winegrower was organised on his/her farm. These interviews aimed to discuss the winegrower's vision of about plant protection and his/her current protection practices to create a stimulating and supportive work environment. During the interview, the choice of management strategy and the field for its application was confirmed by each winegrower, and time was dedicated to a detailed re-explanation of the management strategy, using a document which was then left with the winegrower. To formalise the commitment to the study, the winegrowers signed a contract composed of five parts stating: i) the winegrower's confidentiality commitment about the tests carried out on his farm, ii) the purpose of the experiment, the experimental field and the surface area of the trial, and the start and end dates of the experiment, iii) VINOVALIE R&D's responsibility in case of damage to the experimental field, iv) the VINOVALIE R&D's confidentiality commitment concerning the data collected, and v) the framework for the triggering of crop loss compensation. This indemnity was planned in case of yield loss (compared to the winegrower's control) due to the implementation of the management strategy.

### Implementation of management strategies by winegrowers during the 2021 campaign

A total of 11 winegrowers out of a target of 18 committed to implementing co-designed management strategies for three years (2021 to 2023): five selected the IPM management strategy and six chose the ORG2kgCo strategy (Figure 17). Figure 17 : Location of (A) the winegrowing areas in South-Western France included in the study and (B) the fields where management strategies were implemented in 2021. The three ellipses represent the boundaries of each winegrowing region (Cahors in red, Fronton in yellow, and Gaillac in purple). The orange symbols represent the fields dedicated to the IPM management strategy and the green symbols represent the fields with the ORG2kgCo management strategy. The other winegrowers who participated in the co-validation workshops worked on the two other management strategies not described in the paper. The characteristics of these 11 winegrowers were *a posteriori* compared to the average population of VINOVALIE winegrowers (internal source VINOVALIE for 2019): age (46 versus 52), vine area (51.3 versus 15.3) and TFI (12.58 versus 13.1). Moreover, a posteriori qualitative analysis of their practices (pruning, tillage, fertilization, grapevine protection) showed that they were "classical" for the VINOVALIE cooperative; this allows us to consider these 11 winegrowers as "mainstream winegrowers". As we chose to work only with volunteer winegrowers in the fields network, some situations were missing: in Fronton, two fields for both management strategies and in Cahors, one field for the ORG2kgCo management strategy and two fields for the IPM management strategy were missing. In each vineyard, the main PDO grape variety was selected: Négrette N for Fronton, Syrah N for Gaillac and Malbec N for Cahors. For each winegrower, the management strategy was implemented on a field of at least 0.5 hectares. The choice of the field was a trade-off between the distance between the field and the shed, the representativity

of the vineyard field in the PDO production zone, and the field homogeneity. The field was divided in two parts: one was managed according to the co-designed management strategy (minimum 0.25 hectares) and the other was managed according to the usual practices of the winegrower. Even if the two plots were close one from each other, we excluded the side-by-side rows to make the observations. The implementation of the management strategies was monitored during the 2021 season through numerous phone calls and in-field meetings for disease observations. The purpose of the frequent phone calls was to understand how the winegrowers were adapting to the decision rules of the management strategies, and the associated difficulties. In parallel, various data were collected to calculate the agronomic, ecological and economic indicators defined during the co-design workshop.

## 2.2.5 Step C: Co-evaluation of the performance of the implemented management strategies

### Step C.1: Individual meetings with each winegrower to analyse the 2021 campaign

During winter 2022 (January to February), individual interviews (1-2 hours) were organised with winegrowers. The objective was to present a summary of the strategy and its field implementation to each winegrower, and check if the performance of the strategy agreed with their observations and perceptions. The individual summary was composed of four parts: Objective of the management strategy, Experimental conditions, Results (TFI, disease and insect notation, yield, fungicide costs), and Conclusion (see Annexe A : Rapport annuel rendu aux viticulteurs chaque année).

### Step C.2: Co-evaluation of each management strategy

This third series of workshops (4 hours) was organised separately for each management strategy, with most winegrowers having implemented each strategy (Tableau 5). Both workshops were organised in two main sessions. First, the study coordinator reminded the group of the decision rules for the management strategy and presented a summary of the results. Second, four topics were discussed: disease control, insect control, weed control, and finally, general questions. Each topic discussion was organised in two steps. First, participants had to answer specific questions defined by the study coordinator (Tableau 7), with a binary answer (yes/no or positive/negative) and a justification of their answer. Then, a round table discussion was conducted for each topic. After one year of implementation, we chose to focus the questionnaire on the commitment of winegrowers, the feasibility and the technical relevance of the co-designed prototypes and not on the practices-changing process itself contrary to another recent study (Delecourt et al., 2019). The questionnaire differed between the two workshops, since synthetic herbicides and insecticides were not relevant to the organic management strategy. The questions also differed between winegrowers and other types of participants: for example, questions concerning the implementation of management strategies (e.g. “Would you have made this reduction in fungicide use by yourself?”) were only asked to winegrowers (Tableau 7). The purpose of this questionnaire was to collect feedback from the winegrowers. Workshops were also recorded to extract verbatims, which were compiled to choose the ones expressing the best the reactions of winegrowers.

Tableau 7 : Questions addressed to all participants (plain text) or winegrowers (italicised text) to co-evaluate the management strategies during the co-evaluation workshop (step C.2).

Management strategy	IPM	ORG2kgCo
<b>Disease control</b>	<p>How do you judge the disease control of the management strategy?</p> <p>Do you want to go back to the same disease management strategy?</p> <p><i>Would you have made this reduction in fungicide use by yourself?</i></p> <p><i>Do you take into account the information coming from the Decitrait® DSS?</i></p> <p><i>Will you be willing to implement this strategy on your farm without financial support?</i></p> <p>What dose of copper should be used for each treatment?</p>	<p>How do you judge the disease control of the management strategy?</p> <p>Do you want to go back to the same disease management strategy?</p> <p><i>Would you have made this reduction in fungicide use by yourself?</i></p> <p><i>Do you take into account the information coming from the Decitrait® DSS?</i></p> <p><i>Will you be willing to implement this strategy on your farm without financial support?</i></p> <p>What dose of copper should be used for each treatment?</p>
<b>Insect control</b>	<p>Do you agree with the objective of reducing the use of insecticides only to mandatory insecticides against phytoplasma (<i>Candidatus phytoplasma vitis</i>)?</p> <p>Would you [prefer to] use clay for additional treatment against grape worms?</p> <p>Would you [prefer to] use <i>Bacillus thuringiensis</i> for additional treatment against grape worms?</p> <p>Can you imagine any other solutions?</p>	<p><i>Do you use sexual confusion?</i></p> <p><i>How do you manage the application of the clay?</i></p>
<b>Weed control</b>	<p><i>Have you already done your winter herbicide treatment? Have you used a CMR herbicide?</i></p> <p><i>Do you want to limit the use of herbicides or completely stop?</i></p> <p>What solutions do you prefer to limit the use of herbicides?</p> <p>How do you want to monitor weed control?</p>	
<b>General question</b>	<p><i>Would you have been available in the study if the harvest loss indemnity had not been present?</i></p>	<p><i>Would you have been available in the study if the harvest loss indemnity had not been present?</i></p>

## 3. Results

The results are divided into two parts. First, we describe the two co-designed management strategies. Second, we present the results in terms of pesticide use reduction, and the evaluation of the strategies by the winegrowers.

### 3.1 Co-design and co-validation of the management strategies (steps A.1 and A.2)

#### 3.1.1 Disease control

In both management strategies, two technical levers were selected to reduce the use of fungicides by the stakeholders and validated by winegrowers. The first solution to reduce the use of fungicides was the optimisation of disease treatments using a Decision Support System (DSS). Through their partnership with IFV, the winegrowers have free access to the DeciTrait<sup>®</sup> DSS developed by IFV. This DSS combines various types of information to optimise the protection strategies for downy mildew, powdery mildew, black rot and botrytis. This optimisation is realised by carrying out the required treatments and reducing the doses of products at these treatments as recommended by Davy et al., (2020) and by encouraging their substitution with biocontrol products (*e.g.* sulfur, potassium bicarbonate, *Bacillus pumilus*). During the co-design workshop, management strategies included specific active molecules to be used at each vineyard stage. Here, we mention only the type of active molecules (synthetic or biocontrol), as the availability of specific actives may change according to French or European regulations. According to the ESR (Efficiency-Substitution-Redesign) framework (Hill & MacRae, 1996), the use of a DSS corresponded to Efficiency and the use of biocontrol products to Substitution.

The IPM management strategy to disease control has been shown in Figure 19. In the ORG2kgCo management strategy, the DSS was used only to schedule the treatments according to the periods of heightened risk of contamination for downy mildew and powdery mildew. The development of the vine has been divided into 4 periods corresponding to the period of sensitivity of the vine to diseases: Budburst to Flower buds; Flower buds to Fruit Set; Fruit Set to Bunch closure; Bunch closure to Veraison. Copper levels varied across the four time periods. If symptoms of downy mildew were observed, a biocontrol product could be used during the treatments. Sulfur (biocontrol molecule) was used against powdery mildew and black rot, and sulfur was added for each copper treatment. Against botrytis, the same strategy as the IPM management strategy was utilised.

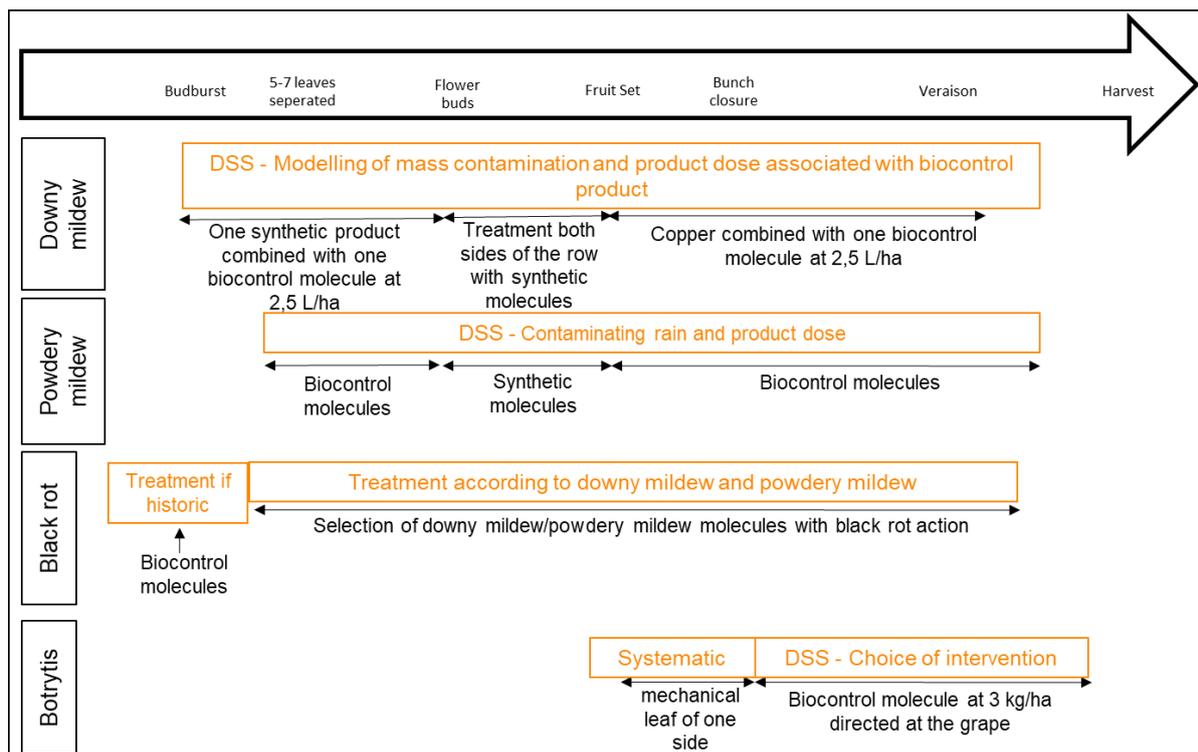


Figure 19 : Disease control against downy, powdery mildews, black rot and botrytis of IPM management strategy as designed during the co-design workshop step A.1 of the method. The decision rules for applying a treatment are shown in orange and the product to apply in black. The black lines delimited the period to apply this product. DSS, Decision Support System.

### 3.1.2 Insect control

The insect control strategy did not differ between the IPM and ORG2kgCo strategies (Figure 20). The general aim was to limit the use of insecticides in mandatory treatments against phytoplasma (*Candidatus phytoplasma vitis*). To control grape berry moths, sexual confusion was favoured and treatments with biocontrol products were allowed if needed depending on the pressure. The use of a biocontrol product was selected to control the green leafhoppers. To decide the date of application, the Plant Health Newsletter (Bulletin de Santé du Végétal in French) was used. This newsletter (published by the local Chambers of Agriculture for each vineyard and by sector) assesses insect and disease risks (Guichard et al., 2017).

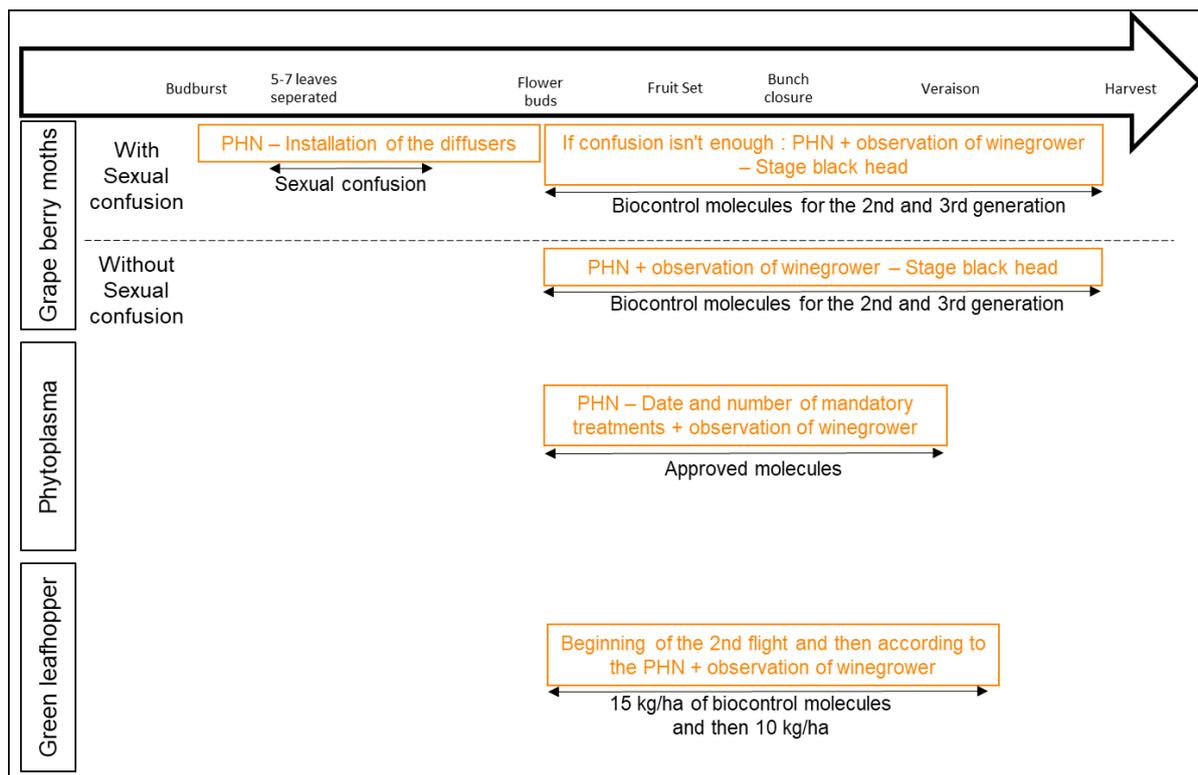


Figure 20 : Insect control (grape berry moths, phytoplasma, green leafhopper) of the two management strategies as designed during the co-design workshop step A.1 of the method. The decision rules for applying a treatment are shown in orange and the product to apply in black. The black lines delimited the period to apply this product. PHN, Plant Health Newsletter (Bulletin de Santé du Végétal in french).

### 3.1.3 Weed control

Weed management was not integrated into the ORG2kgCo strategy because in organic agriculture the use of herbicide is forbidden. Each winegrower decided on his soil management. To reduce herbicide use in the IPM management strategy, mechanical weeding was encouraged among winegrowers who were equipped with suitable tools.

For weed management, no decision rules were considered in the development of either of the two management strategies. This choice was motivated by the fact that the winegrowers did not have the same tools to control weeds, and that the pedoclimatic situations, and thus the weed pressure, differed between the fields.

## 3.2 Implementation and co-evaluation of the strategies (steps B and C.2)

The set of agronomic, ecological and economic indicators defined and validated by winegrowers for the field assessment is presented in Tableau 8.

The co-evaluation of the strategies implemented in 2021 was conducted through individual meetings with each winegrower to analyse the 2021 campaign and a specific workshop for each management strategy.

Tableau 8 : Agronomic, ecological and economic indicators used for the field assessment.

Categories of indicators	Indicators
<b>Agronomic</b>	Average frequency and intensity of attack of downy mildew, powdery mildew, black rot and botrytis on leaves and grapes Average frequency and intensity of attack of green leafhopper on leaves
<b>Ecological</b>	TFIs Copper quantity
<b>Economic</b>	Yield Cost of plant protection (product + tractor use)

### 3.2.1 Implementation and field assessment results

In 2021, the rainy weather conditions favoured fungal diseases. Black rot exerted strong pressure and downy mildew took over at the end of the season. Despite this high-pressure context for the first year of experimentation, the winegrowers testing the ORG2kgCo management strategy managed to not exceed 2 kg of copper with 9 to 15 applications of different copper doses depending on the winegrowers. In all situations, the IPM management strategy reduced the use of pesticides compared to the reference field in each farm. This led to TFI that was lower than the HEV reference in all but one field. The reduction of TFI compared to the HEV reference varied from -14% to -57% (average of -25%). The winegrower who did not achieve the 50% TFI reduction, presented a TFI higher than the HEV reference (+7%), even though the winegrower reduced TFI by 19% compared to his farm standard. Note that TFI reduction was only due to a reduced use of fungicide, as we observed no change in the use of herbicides and insecticides, *i.e.* winegrowers involved in the IPM management strategy did not implement co-designed weed and insect control. Therefore, the decrease in fungicide TFI was the most significant, and varied from -14% to -70% with an average of -38.6%.

### 3.2.2 Co-evaluation of disease control for the two management strategies and further adaptations

We focus here on the results of disease control only, as the co-evaluation workshops mainly concerned this topic and the winegrowers implemented only the disease control part of the management strategies.

All participants gave a positive assessment of disease control for both strategies. For example, participant 4 of the co-evaluation workshop on the IPM management strategy mentioned “the management strategy was positive as there was very little difference in yield loss between the winegrower’s control and the part of the field treated with the management strategy. Given the year and the strong disease pressure we had this year, this is very positive.” Regarding the ORG2kgCo management strategy, Participant 8 mentioned “Given the context of the year, I think this is positive. The two subfields achieved similar yields. It’s difficult to conclude because the mildew arrived late. It would be interesting to see if we manage to stay below 2kilos if the mildew arrives earlier. I would stay with the same strategy [in case it works even in this case].” However, all winegrowers were not ready yet to expand the implementation of management strategies to their whole farm, as they prefer to wait for longer-term assessment results.

During the two co-evaluation workshops, the group decided to keep the same strategy in 2022. Participant 2 of the co-evaluation workshop on the IPM management strategy mentioned that “If the year was under normal pressure, the reduction in pesticide use could be greater”. The same remark

was made at the co-evaluation workshop of the ORG2kgCo management strategy. Even if the choice was made to maintain the same strategy, a few changes were made for each management strategy.

The first change to the IPM management strategy mentioned by the group was to ban molecules that will be withdrawn from the market within the next two years. This change was suggested first by participant 6 “Concerning the modifications, at the beginning of the campaign a molecule is used and it is a molecule that will disappear quite quickly so it would be interesting to envisage a plan B from now on”. The second change was the dose of copper to be applied during the treatments. Indeed, winegrowers used high doses of copper, thereby increasing the TFI of their experiment. To manage the dose of copper to be applied, all the participants decided to follow the output of the DeciTrait® DSS. The question remains on who would use the DSS, as not all winegrowers are current users.

For the ORG2kgCo management strategy, the only modification mentioned by the group concerned the addition of the use of plant extract products. This modification was mentioned by two winegrowers already using such preparations. One of them said, “To continue to reduce my copper dose, I plan to use more and more horsetail and nettle preparations. I plan to add them to each treatment”. During the co-evaluation workshop, there were many discussions about the management of black rot, especially in fields with a strong history of this disease: “I have a question about fields with a strong history. Does the management of 2 kilos of copper make it possible to control black rot with a strong history over three years?” (Participant 10, ORG2kgCo co-evaluation workshop). The second issue concerning black rot was the timing of the first treatment. All winegrowers planned to schedule their first black rot treatment earlier for future years, as mentioned by participant 6 “The objective for next year is to start treatments earlier to try to manage the black rot as well as possible”. This was reinforced by one winegrower already using this treatment and was satisfied with the results. The last topic on the management of black rot was about the quantity and formulation of sulfur to be applied. One of the winegrowers mentioned difficulties “Each time I use powdered sulfur, I add liquid sulfur to give a better hold on the leaves. It has a sticky effect” (Participant 8, ORG2kgCo co-evaluation workshop). Overall, black rot was the main topic of the workshop, due to the high-pressure in 2021 across the three vineyards.

For all winegrowers, except one, it was the first year using the tool. Only two winegrowers did not follow the information given by the DSS. For instance, one ORG2kgCo winegrower believed that spraying according to rainfall alone was sufficient: “No I didn’t use it. I don’t need it. I have my treatment routine which is set up according to the forecasted rainfall.”. For the others, the DSS was used by the study coordinator, and results were discussed with each winegrower, except for one winegrower who used it by himself. One of these winegrowers said “I had never used it before. Often, I used it with the study coordinator by phone to adjust the doses on the trial part.” The reasons why winegrowers found it difficult to use the tool independently were the lack of time and the fact that it was not familiar to them.

## 4. Discussion

The participatory approach presented in this paper succeeded in launching a dynamic towards the reduction of pesticides in viticulture in the South-Western region of France. This participatory approach allowed the co-design of two innovative management strategies that were implemented by 11 winegrowers and then co-evaluated during participatory workshops. In the following section, we discuss the relevance of our participatory approach regarding three aspects: involvement of winegrowers, effective reduction in pesticide use, and perspectives towards a wider adoption of these management strategies.

## 4.1 A participatory approach that allows the involvement of diverse stakeholders and a strong commitment from winegrowers

In this study, we chose to involve a diverse group of stakeholders for the co-design and co-evaluation steps. While participant choice is a crucial step in co-design workshops (Jeuffroy, Loyce, et al., 2022), several studies have shown the benefits of actively involving a range of stakeholders from various sectors or organisations to explore possible strategies and favour knowledge sharing, each with their own skills and knowledge (Chantre et al., 2016; Puech et al., 2021). We involved different types of participants: winegrowers, the VINOVALIE R&D team, VINOVALIE advisors, INRAE researchers, and IFV engineers. In particular, the participation of the winegrowers at all steps of the process showed their commitment to this participatory approach, with all winegrowers willing to continue experimenting in the following year. This strong involvement of winegrowers legitimises the management strategies and ensures that the proposed management strategies and criteria used to assess them are relevant (Lairez et al., 2020; Salembier et al., 2016).

Three factors in this participatory approach helped to promote the involvement of winegrowers. First, this participatory approach is based on pre-existing farmer networks. Indeed, all of the winegrowers who participated in the study already knew each other because they are members of the same cooperative, VINOVALIE. As a consequence, the winegrowers were already used to sharing their experiences and working together. They were engaged in a relationship of trust, which is a key element for innovation (Skardon, 2011). In addition, an integrated pest management group already existed in one of the PDO concerned by the study (Gaillac), with weekly telephone meetings led by the viticultural technician. During these meetings, the viticultural technician reports on observations and pest pressure, and a discussion on the protection strategy takes place among the winegrowers and the viticultural technician, enabling winegrowers to better adjust treatments to the pest pressure. Leclère et al. (2023) have also shown the importance of pre-existing farmer networks such as a local group of development. Second, the goal of our participatory approach matched the priorities of the stakeholders, *i.e.*, pesticide use reduction [this match being considered key by Hossard et al. (2013)]. Indeed, the participatory approach aims to anticipate potential regulations on pesticides that could come into effect in the next few years, such as the limitation or elimination of an active molecule. Thirdly, the implementation by winegrowers of the co-designed management strategies on a small field (0.25 hectare) in the first phase is essential. Indeed, the winegrowers agreed to experiment with these strategies because the area is small and thus the risk is limited. For example, participant 4 highlighted, on the IPM management strategy, that “On the reduction, I had started to do a little bit, but to reduce the doses so much I would say no. I would not have done this reduction on the whole farm this year, I admit I would not have done it. Thanks to the study and the fact that it is on a small surface area, the risk taken is limited, which allows us to go further in the reduction”. This highlights the value of experimenting with management strategies in a small area in the process of adopting new practices.

## 4.2 A participatory approach that allows a significant reduction in the use of pesticides based on limited innovation levers

The participatory approach allowed us to co-design management strategies with a significant reduction of TFI (between -14% and -57%, with an average of -25% for all pesticides and between -14% to -70%, (average -38.6%) for fungicides) for IPM management strategy and a significant reduction of copper sprays for the ORG2kgCo management strategy after one year of experimentation. This reduction is encouraging in comparison to the results obtained in the DEPHY FARM farmers' group, where the reduction was about 33% for all pesticides, and 27% for fungicides, after 10 years of involvement in the group (Fouillet et al., 2022). These co-designed management strategies mobilise technical levers that have shown to be effective in reducing the use of pesticides in the vineyard (Mailly et al., 2017).

The participatory approach was key to effectively reduce pesticide use. Indeed, the diversity of the stakeholders involved in the co-design workshops allowed us to co-design management strategies combining technical levers that can be implemented by the winegrowers, are accessible to them and effective in reducing the use of pesticides.

Moreover, the co-evaluation performed with stakeholders highlighted that these two management strategies were considered feasible.

In both management strategies, the two measures used were: optimisation of the timing, dose, frequency of pesticide application (Efficiency (E)) and substitution of synthetic products by biocontrol products (Substitution (S)). Redesign (R), *e.g.* resistant varieties or new type of pruning, was not explored during the co-design workshops. Even if the co-designed management strategies could be seen as innovative by the considered cooperative members, as the combinations of technical levers had previously never been implemented by any of the participants or cooperative's winegrowers, the level of innovation was rather low, mainly based on E and S levels. This low level of innovation could be explained by the fact that the aim was to co-design management strategies that could be adopted immediately by the greatest number of winegrowers and adapted to established vineyards (Montaigne et al., 2016). The stakeholders involved in the co-evaluation workshop consistently considered that these two management strategies were feasible.

Lastly, this participatory approach allowed a significant reduction in the use of pesticides thank to by the individual support provided to the winegrowers. First, the individual interview before the beginning of the treatment campaign gave the opportunity to re-explain the management strategies, which improved the winegrowers' understanding. Second, the regular individual contacts during the campaign through numerous phone calls and in-field meetings reassured the winegrowers on the implementation of the management strategies and facilitated the use of the DSS as previously mentioned. This need for ongoing support is important, especially in the first years of adopting the management strategy (Puech et al., 2021).

## 4.3 Relevance and limitations of the method for large-scale adoption of these management strategies

The objective of this paper was to present the participatory approach, how it involved winegrowers, and how its application over one year contributed to a reduction in pesticide use and stimulated winegrowers to continue the experiment.

On this basis, the results showed that the participatory approach enabled the winegrowers to get involved in the process and to achieve a significant reduction in pesticide use. However, this implementation and the associated results may vary according to climate and the disease pressure of the year. For instance, if the year's fungal pressure had been lower, the reduction in TFI and copper could have been greater. In contrast, if the implementation of management strategies had caused some damage, the satisfaction of the stakeholders would have probably been lower. This seasonal change in pesticide use and in the willingness to reduce pesticide use has already been observed in various studies (Hossard et al., 2022; Larsen et al., 2019). Thanks to our method, we designed management strategies with explicit decision rules, which enabled adjustment to the year's disease pressure. To consolidate these results, the strategies co-designed as part of this project will be evaluated over a 3-year period. There is also the possibility of modelling fungal pressure and associated damage to consider a wider range of situation [e.g. for wheat (Robin et al., 2013)]. If the implementation of the co-designed management strategies is successful, the final objective is their dissemination to a wider audience among the winegrowers' partners already involved in the trial, and to a larger number of winegrowers of the cooperative. Given that our sample of partner winegrowers has an initial TFI equivalent to the average TFI of winegrowers of the cooperative and the average TFI of French winegrowers, we assume that these results can be generalized and disseminated to a larger number of the cooperative's producers. However, some sub-zones are not represented in the network of fields examined in this study, so the dissemination of management strategies in these sub-zones should be carried out with caution. All involved winegrowers succeeded in reducing pesticide use and were satisfied with the results obtained. However, they were not ready yet to expand the implementation of management strategies to their whole farm, as they prefer to wait for more long-term assessments results. This problem of upscaling innovative practices to the farm has already been identified, and was explained by the higher risk of yield losses associated with their implementation and confidence in these practices built over time (Puech et al., 2021).

To facilitate the transfer to non-participating winegrowers, a communication of the results was made to all winegrowing members of the cooperative, including field visits in July and an oral presentation at harvest review meetings organised by VINOVALIE advisors in each vineyard. We plan to continue such visits, as demonstrations on 'pilot' farms to motivate other farmers has been shown to be effective because it allows them to see results in their production situation (Le Bellec et al., 2012). In addition to these actions, the implementation of an insurance system to cover the risk of crop damage due to cryptogamic diseases linked to the reduction of phytosanitary inputs, as proposed by Raynal et al. (2022), could help to encourage the reduction of pesticide use. Note that winegrowers also cultivate grapes destined to produce Protected Geographical Indication (PGI) wines with different growing methods and yield objectives than the PDO fields. The management strategies are tested on PDO fields and their implementation without testing on PGI fields could be too risky (the targeted yield is higher on PGI fields, *i.e.*, 120 hl/ha *versus* 50-55 hl/ha). To avoid this, an experiment as carried out on PDO fields could be established on PGI fields.

The participatory approach has led to a reduction in fungicides, but not in herbicides and insecticides. We assume that the initial objective was too ambitious to work on the reduction of all three types of treatments simultaneously, in a short period of time. Moreover, the reduction of herbicides and insecticides may require the redesign of cropping systems to introduce biodiversity (*e.g.* hedges, covercrops), which entails more drastic changes in vineyards (Fouillet et al., 2022).

## 5. Conclusion

The proposed participatory approach combines the involvement of a diversity of stakeholders, the co-design of two management strategies for disease, insect, and weed control in vineyards, the implementation of the management strategies by 11 winegrowers in a field on their farm, and their co-evaluation by the stakeholders. This participatory approach enabled the co-design of management strategies that allow a significant reduction in the use of pesticides. The implementation of the IPM management strategy resulted in an average 25% reduction of the TFI compared to HEV standard TFI and the winegrowers who tested ORG2kgCo managed not to exceed the set limit of 2kg of copper per year. This participatory approach involved winegrowers at the centre of the whole process to reduce pesticide use. The participatory approach could be transposed to other winegrowing areas, as management strategies are site-specific, especially for crops such as vines, where fungi are the main issue. It remains to be seen whether this participatory approach will allow the adoption of management strategies within the cooperative in the future.

# Chapitre 2 : Agronomic performances and fungicides costs of co-designed management strategies to reduce pesticide use in the South-Western region of France

## **Contenu du chapitre :**

Ce chapitre est rédigé sous la forme d'un article scientifique qui sera soumis à la revue *Oeno one*. Nous avons fait le choix de soumettre dans cette revue car elle est en lien avec de nombreux acteurs de la filière viticole.

## **Résumé en français :**

La viticulture implique généralement une utilisation importante de pesticides. Cependant, il existe des leviers pour réduire leur utilisation, comme l'utilisation d'un outil d'aide à la décision et la substitution des fongicides par des produits de biocontrôle, mais ils ne sont pas encore largement mis en œuvre par les viticulteurs. Pour encourager la diffusion de systèmes de culture de la vigne à faible utilisation de pesticides, l'expérimentation à la ferme est une stratégie prometteuse. Dans cette étude, nous avons évalué quatre nouvelles stratégies de protection du vignoble co-conçues en collaboration avec des viticulteurs du sud-ouest de la France dans le cadre d'une expérimentation à la ferme : « IPM » pour Integrated Pest Management (Raisonné) [réduction de 50 % de l'indice de fréquence de traitement (IFT) par rapport à la référence française de haute valeur environnementale (HVE)], « ORES » pour « 0 Résidu » avec le même objectif que « IPM » et aucun résidu de pesticide dans les vins, « BCT » pour « Biocontrôle » avec l'objectif d'utiliser uniquement des produits de biocontrôle et des extraits de plantes, avec des traitements obligatoires contre le phytoplasme (*Candidatus phytoplasma vitis*), et « ORG2kgCo » pour l'agriculture biologique avec un maximum de 2 kg de cuivre/ha/an. Les stratégies de protection du vignoble ont été mises en œuvre par un total de 20 viticulteurs au cours de la période, dans trois régions viticoles. Ces stratégies de protection du vignoble ont permis de réduire la quantité de pesticides évaluée au moyen de l'indice de fréquence totale des traitements (IFTt) en 2021 et 2022, par rapport à la référence HVE : réduction moyenne de -32,1 %, -42,2 % et -87,8 %, respectivement pour les stratégies de protection du vignoble « IPM », « ORES » et « BCT ». La réduction du IFTt par rapport à leurs pratiques est moins importante : -17,9 %, -29,7 % et -80,7 % pour les stratégies de protection du vignoble « IPM », « ORES » et « BCT » respectivement. Cette réduction a été obtenue principalement en réduisant l'utilisation de fongicides. Deux principaux leviers techniques ont été utilisés pour réduire l'utilisation des fongicides : l'utilisation d'un outil d'aide à la décision et la substitution des fongicides par des produits de biocontrôle. La mise en œuvre de la stratégie de protection du vignoble « ORG2kgCo » a permis de limiter la quantité de cuivre appliquée en deçà de la limite fixée à 2 kg/ha. À l'exception de la stratégie de protection du vignoble « BCT », les trois stratégies de protection du vignoble ont réussi à contrôler la maladie, à limiter la perte de rendement et à réduire le coût des fongicides. Bien que ces résultats soient prometteurs pour réduire l'utilisation des pesticides tout en maintenant des rendements satisfaisants dans les conditions réelles

de l'exploitation, ils doivent être confirmés sur de plus grandes surfaces, avec différentes variétés de vigne, différents objectifs de production et sur plusieurs années avec des pressions de maladies contrastées. Une nouvelle expérimentation dans des conditions différentes, si elle est concluante, encouragerait l'adoption à grande échelle de ces stratégies de protection du vignoble visant à réduire l'utilisation des pesticides dans la viticulture.

## Abstract

Viticulture typically involves substantial pesticide use. However, levers for reducing their use are available, such as the use of a Decision Support System and the substitution of fungicides by biocontrol products, but they are not yet widely implemented by winegrowers. To encourage the dissemination of low pesticide use grapevine systems, on-farm experimentation is a promising strategy. In this study, we evaluated four new management strategies co-designed in collaboration with winegrowers in south-western France through on-farm experimentation: 'IPM' for Integrated Pest Management [50% reduction of pesticide treatment frequency index (TFI) as compared to the French High Environmental Value reference (HEV)], 'ORES' for 0 Residu with same objective as 'IPM' and no pesticide residues in wines, 'BCT' for Biocontrol with an objective to use only biocontrol products and plant extracts, with mandatory treatments against phytoplasma (*Candidatus phytoplasma vitis*), and 'ORG2kgCo' for organic farming with a maximum of 2 kg of copper/ha/year. The management strategies were implemented by a total of 20 winegrowers over the period in three wine-growing regions. These management strategies resulted in reductions in pesticide assessed through the Total Treatment Frequency Index (TFIt) in 2021 and 2022, in comparison with HEV reference: an average reduction of -32.1%, -42.2%, and -87.8%, for 'IPM', 'ORES', and 'BCT' management strategies respectively. The reduction in TFIt compared to their practices is less great: -17.9%, -29.7%, and -80.7%, for 'IPM', 'ORES', and 'BCT' management strategies respectively. This reduction was achieved mainly by reducing the use of fungicides. Two main technical levers were applied to reduce fungicide use: the use of a Decision Support System and the substitution of fungicides by biocontrol products. The implementation of the 'ORG2kgCo' management strategy limited the amount of copper applied under the set limit of 2kg/ha. Except for the 'BCT' management strategy, all three management strategies succeeded in controlling disease, limiting yield loss, and reducing the fungicide cost. While these results are promising for reducing pesticide use while maintaining satisfactory yields under real farm conditions, they need to be confirmed over larger areas, with different vine varieties, different production targets, and over several years with contrasting disease pressures. Such a new experimentation under different conditions, if successful, would encourage the large-scale adoption of strategies aimed at reducing pesticide use in viticulture.

## 1. Introduction

Reducing the use of pesticides is a major issue in agriculture, for environmental (e.g. pollinator decline (Ali et al., 2021)) and health reasons (Inserm, 2021). In France, viticulture is the third most pesticide-intensive crop after apples and potatoes (Urruty et al., 2016), with fungicides representing 80% of treatments, followed by insecticides (15%) and herbicides (5%) (Mailly et al., 2017). This intensive use is due to several diseases (downy mildew (*Plasmopara viticola*), powdery mildew (*Erysiphe necator*), botrytis (*Botrytis cinerea*), black rot (*Guignardia bidwellii*) and animal pests such as grape berry moths (*Eupoecilia ambiguella* and *Lobesia botrana*) that harm the quality and quantity of grape yield at harvest (Fermaud et al., 2016). Despite major research and development efforts since the launch of the Ecophyto plan in 2008 by the French government (Barzman & Dachbrodt-Saaydeh, 2011; Guichard et al., 2017), pesticide sales in France have tended to remain at around 60,000-70,000 tonnes per year

since 2009 (Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation, le ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques et le ministère du Logement et de la Rénovation urbaine, 2022), which is half as low compared to 1999 (Phyteis, 2022). Wine grapes are the third most pesticide-intensive crop in France (Urruty et al., 2016). Recent studies highlighted a large diversity of technical levers to reduce the use of pesticides (Pertot et al., 2017), which may be categorised according to the ESR (Efficiency-Substitution-Redesign) framework (Hill & MacRae, 1996).

One of the main Efficiency levers corresponds to the optimisation of the timing, dose, and frequency of applications (Mailly et al., 2017). This optimisation of the dose and the frequency of fungicide applications is managed by using information from plant health reports or decision support systems (DSS) (Mailly et al., 2017). DSS is based on mathematical models that estimate the risk of disease development depending on weather conditions. In addition, some of these DSS integrate other information such as the grapevine phenological stage, the period of protection of the vineyard according to the products applied and the cumulative rainfall (Davy et al., 2020). Delière et al. (2018) designed and evaluated low pesticide-use vineyard protection strategies that were mostly based on the use of DSS with a reduction of pesticide use by 30–50%. Another efficiency lever is the optimization of the quality of spraying (Pertot et al., 2017). Winegrowers can choose among different types of sprayers that allow a reduction in the amount of product applied. For example, side-by-side sprayers allow a 30% reduction, while confined spraying can go up to at least 50% (Codis et al., 2016).

Substitution levers correspond to the substitution of synthetic products by biocontrol products (Pertot et al., 2017). Biocontrol agents include both macro-organisms and pesticides containing microorganisms, chemical mediators such as pheromones and kairomones and natural substances of plant, animal or mineral origin (Aveline, 2024). Today, there are many biocontrol products registered for disease management (Pertot et al., 2017). For example, potassium phosphonate and orange essential oil are used to control downy mildew, while sulphur is used to control powdery mildew (Aveline et al., 2022). Regarding insecticides, sex pheromones (sexual confusion) are used to mating disruption of grape berry moths (Pertot et al., 2017), and kaolin can be used to control green leafhoppers (Tacoli et al., 2017). Today, herbicides are generally used only under the vine row (Simonovici, 2019). To reduce the use of herbicides, there is only one biocontrol product, pelargonic acid, which has limited efficacy (Aveline et al., 2022). Another means of substitution lever increasingly used by winegrowers is inter-row grassing either sown or spontaneous (Fernández-Mena et al., 2021) and the management of grass by mowing or mechanical destruction (Garcia et al., 2018).

Finally, Redesign levers for grape-growing systems mainly involve planting grape varieties resistant to downy mildew and powdery mildew and increasing biodiversity in the case of agroforestry viticulture (Romero et al., 2022). Resistant varieties permit a reduction of the Fungicide Treatment Frequency Index (TFIf), depending on the year, from 87 to 95% (Miclot et al., 2022). However, these technical levers can only be carried out at planting time, and consequently remain under-utilised in most wine-growing regions (Mailly et al., 2017).

The current persistent consumption of pesticides in France (Hossard et al., 2017) results from a socio-technical lock-in involving a large number of actors in the agricultural industry, of which pesticides have become the «keystone» (Guichard et al., 2017). Several obstacles limiting the adoption of innovative strategies to reduce pesticide use have been identified: a lack of knowledge (Giampietri & Trestini, 2023), farmers' risk aversion (Aka et al., 2018; Pereira et al., 2017), a need for organisational flexibility, and the weight of traditional methods of working (Bakker et al., 2021; Pereira et al., 2017). However, pesticide reduction has been proven to be effective when winegrowers are directly involved in the design of innovative systems, such as in the 'DEPHY FARM' farmers' groups (Fouillet et al., 2022).

This urges scientists and agricultural advisory structures to promote the involvement of farmers from the beginning to the end in the process of reducing pesticide use. This inclusion of farmers can be achieved through the participatory design of prototypes in design workshops involving farmers and other stakeholders with diverse skills and knowledge to develop proposals towards a shared objective for all stakeholders (Jeuffroy, Loyce, et al., 2022). The experimentation of these prototypes is increasingly performed directly on farms in collaboration with farmers (Lacoste et al., 2021; Thiollet-Scholtus et al., 2021). This method called on-farm experimentation (OFE), seems to lead to better adoption of new practices because, as winegrowers learn how to manage those practices, they understand the associated risks and recognize the value of these practices (Catalogna et al., 2018; Kummer et al., 2012; Toffolini & Jeuffroy, 2022). OFE enables the involvement of farmers who can be the catalysts for the change required for widespread adoption in the community (Pant & Hambly Odame, 2009). Indeed, farmers need successful examples of reduced pesticide use from peer farmers (Bakker et al., 2021).

This study aims at answering the following research question “What are the agronomic performances and associated costs of fungicides of co-designed management strategies?”. The management strategies were co-designed through a participatory approach involving various stakeholders (Perez et al., 2024) and the assessment through an OFE led during two years in the South-Western region of France, within a network of 20 winegrowers over the period in three wine-growing regions. We assumed that management strategies would reduce the use of pesticides, but that this could lead to a greater incidence of diseases and consequently a loss of yield, and an increase in fungicide cost with the use of biocontrol products. We used different variables to evaluate if the co-designed strategies succeeded first to reduce the use of pesticides (Total Treatment Frequency Index (TFIt), TFIf, amount of copper), second to control diseases (intensity on leaves and grapes of diseases), and third to be economically viable (yield, fungicide cost). After presenting the co-designed management strategies and the results of their on-farm monitoring, we discuss the effective reduction in pesticide use and disease control according to the management strategies, the perspectives for improvement of these management strategies, and the prospects for their widespread adoption.

## 2. Material and methods

### 2.1 Study area

This study was realised in partnership with a French regional wine cooperative (VINOVALIE) willing to push for a reduction in pesticide use among its members. This cooperative is the biggest wine producer in the South-Western part of France, representing about 300 winegrowers and 4,000 ha of vineyards, out of the 55 040 hectares in the South-Western region in 2021 (Interprofession des Vins du Sud-Ouest, 2024c). Our case study covered three PDO regions (Cahors, Fronton, and Gaillac) and focused on PDO fields with targeted yields of 50 to 55 hl/ha depending on the PDO. Winegrowers often achieve these yields. The majority of the vineyards in these PDO regions are in conventional farming, with an average of 20% of the area in organic farming. These regions are influenced by an oceanic climate, with an average annual rainfall of around 600-750 mm for the period 1995-2022 (Carretier, 2023). The wettest months, with 60-70 mm rainfall, are January, April, May, October, November and December. The least rainy months are February and July, with around 40-45 mm (Carretier, 2023). Rainfall is low in winter and high in summer due to thunderstorms, causing significant pressure from cryptogamic diseases: downy mildew and black rot, which may require high use of fungicides for their control. Even if the quantity of pesticides fluctuates depending on the year, disease, insect, and weed pressure, the three considered PDOs have an overall Total Treatment Frequency Index (TFIt) higher than the French national average (C. Prost, 2023). While VINOVALIE members' average TFIt is close to the French

average (in 2019: 11.96 versus 12.4). In general, VINOVALIE winegrowers typically administer 7-9 applications of fungicides, frequently employing a combination of two distinct molecules. They mechanically weed alternate inter-rows, the intervening rows being left with natural vegetation cover. The soil under the vine is managed by chemical weeding (2-3 herbicide applications on average per season). In the wine-growing region, two treatments against the leafhopper (*Scaphoideus titanus*) vector of phytoplasma (*Candidatus phytoplasma vitis*) are mandatory. Winegrowers apply one more insecticide to manage green leafhoppers and grape berry moths or use mating disruption.

## 2.2 Characteristics of the years

The two years experienced very different weather conditions. In 2021, a frost affected the whole of France, but only a few fields in the study were affected. In contrast with the data from 1995 to 2020, the 2021 year was wetter, with excess rainfall in May, June, and especially July (+80mm in 3 months) (Carretier, 2021). On the contrary, the 2022 year was generally warmer and drier in contrast with the data from 1995 to 2021. It suffered a rainfall deficit from May to August (-127mm in 4 months) and average temperatures were 2.8°C higher in July and 3.6°C higher in August than normal over the last 26 years (Carretier, 2022a). These characteristics had a strong influence on cryptogamic disease pressure. As confirmed by the Plant Health Newsletter (Bulletin de Santé du Végétal in French) published by the Chamber of Agriculture for both years, downy mildew pressure was average to high in 2021 in the three vineyards, whereas it was low in 2022. Black rot pressure was high in 2021 and low to medium in 2022. Finally, powdery mildew pressure was low to average in both years (Carretier, 2021, 2022a).

## 2.3 Characteristics of the co-designed management strategies and implementation by winegrowers

During the co-design workshops, a reduction in the use of all pesticides was discussed (including herbicides and insecticides) but finally, during the OFE, the winegrowers decided to implement only the disease management strategy due to equipment issues (e.g. mechanical weeding tool). The disease management strategies and the set of indicators for their assessment were co-designed in 2019, in workshops involving five types of stakeholders: winegrowers, INRAE researchers, IFV engineers, VINOVALIE advisors, and VINOVALIE Research & Development team (for more details about the method, see Perez et al., (2024)). For the 'IPM' and 'ORES' management strategies, the objective of pesticide-use reduction was defined according to the TFIs for High Environmental Value (HEV) environmental certification (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2019). In the HEV reference, the Total Treatment Frequency Index (TFIt) is 14.98 and the Fungicide Treatment Frequency Index (TFIf) is 11.37. The four management strategies that resulted had the following objectives:

- 'Integrated Pest Management (IPM)': Reduction of TFIt (with biocontrol products not included in the TFIt calculation) by half as compared to the HEV reference (i.e., down to TFIt max = 7.49 for the three PDOs), and prohibition of all carcinogenic, mutagenic and reprotoxic (CMR) pesticides,
- '0 Residu (ORES)': Same as 'IPM' with no pesticide residues in wines,
- 'Biocontrol (BCT)': use only biocontrol products and plant extract, with mandatory treatment against phytoplasma (*Candidatus phytoplasma vitis*),
- 'Organic with 2 kg of copper (ORG2kgCo)': organic farming with a maximal copper use of 2 kg/ha/year. In Europe since 2018, the use of copper metal in agriculture (including Organic Agriculture) is limited to a maximum of 28 kg/ha/7years equivalent to 4 kg/ha/year.

Two of the four management strategies ('IPM' and 'ORG2kgCo') were detailed in Perez et al., (2024). The 'IPM' management strategy co-designed during workshops for disease control is described in Figure 21. The 'ORES' management strategy was similar to that of the 'IPM' management strategy, with the distinctive feature of positioning the molecules according to their 'tracing' power in the wines. The 'BCT' management strategy was developed around the use of several biocontrol products. The 'ORG 2kg' management strategy was based on a modulation of the copper dose according to the phenological stage of the vine.

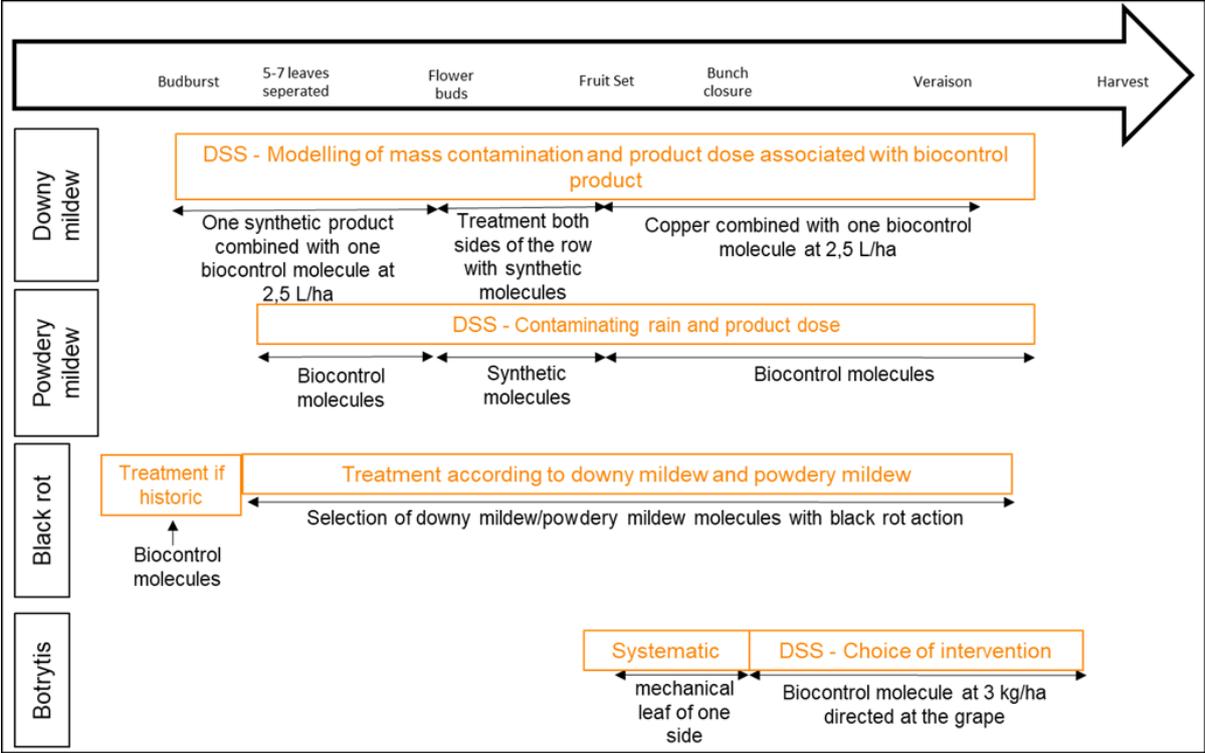


Figure 21 : Schedule of disease control against downy, powdery mildew, black rot, and botrytis of the 'IPM' management strategy as designed during the co-design workshop. Treatments are positioned according to the vine's phenological stage. The decision rules for applying a treatment are shown in orange and the product to apply or mechanical operation in black. The black lines delimit the period to apply this product. DSS = Decision Support System.

A total of 12 winegrowers committed to implementing the co-designed management strategies in conventional viticulture: five selected the 'IPM' management strategy, five opted to implement the 'O Res' management strategy, and two decided to test the 'BCT' management strategy. This number has not changed between 2021 and 2022 whereas the number of winegrowers varied for the 'ORG 2kg Co' management strategy: six in 2021 and 8 in 2022. In each vineyard, the main PDO grape variety was selected: Négrette N for Fronton, Syrah N for Gaillac, and Malbec N for Cahors. For each winegrower, the management strategy was implemented on a field of at least 0.5 hectare. The choice of the field was a trade-off between the distance between the field and the shed, the representativity of the vineyard field in the PDO production zone, and the field homogeneity. The field was divided into two parts: one was managed according to the co-designed management strategy (minimum 0.25 hectare) and the other was managed according to the usual strategy of the winegrower (VITI modality). Even if the two plots were close to each other, we excluded the side-by-side rows to make the observations. The implementation of the management strategies was monitored during the 2021 and 2022 years through in-field meetings for animal pest and disease notations (see sampling method in Tableau 9).

## 2.4 Data collected to evaluate the performance of the management strategies

Various data were collected by the VINOVALIE R&D team, in 2021 and 2022 all through the growing season to calculate the agronomic, ecological, and economic indicators defined during the co-design workshop (Tableau 9). To assess the effectiveness of the management strategy, only the results of the rating at the veraison stage will be presented. This allows us to assess whether or not the strategy was effective over the whole of the campaign, as the leaves and grapes are less sensitive, or not sensitive at all to diseases, from the veraison stage onwards. The other ratings are used to monitor the implementation of management strategies. Only downy mildew and black rot ratings will be presented, as powdery mildew was rarely observed during these two years.

Tableau 9 : Collected data to calculate the performance indicators of the disease management strategies in the field network for each year. TFI<sub>t</sub> = Total Treatment Frequency Index, TFI<sub>f</sub> = Fungicide Treatment Frequency Index.

Type of data	Data collection method	Data calculation method
Frequency and intensity of attacks of Downy mildew, Black-rot, Powdery mildew (%)	Rating on 100 leaves and 100 grapes on 4 plots per modality at fruit set, bunch closure, veraison, and harvest	For example, the frequency of attack of downy mildew on leaves on one plot: Frequency = number of leaves with downy mildew / 100 For example, the intensity of attack of downy mildew on leaves on one plot: Intensity = Intensity of attack on each leaf / 100
TFI (no-unit)	Farmers survey	$TFI = \sum (Dose\_sprayed_p / Dose\_recommended_p) \times (Area\_sprayed_p / Area\_total_p)$ <p>The TFI is equal to the sum of the TFI per treatment, a treatment corresponding to a product <math>p</math> sprayed, and a date of application. The dose sprayed per product corresponds to the <math>Dose\_sprayed_p</math>; the recommended dose for a product <math>p</math> for the target pest is the <math>Dose\_recommended_p</math>; the <math>Area\_sprayed_p</math> represents the surface area where the product was applied and the <math>Area\_total_p</math> is the total surface area of the field where the treatment was sprayed (Pingault et al., 2009).</p>
Amount of copper applied (kg)	Farmers survey	
Yield (hL/ha)	Harvesting of each modality by machine or by hand	A sample of 20 to 50 vines is harvested by hand, depending on the field, to determine the yield per vine (kg/vine). This yield per vine is multiplied by the planting density per hectare (vines/ha) to define the yield per hectare (kg/ha). Finally, this yield is converted into hectoliters per hectare (hl/ha) by multiplying by the winery's kg-to-hl converter.
Fungicide cost (in euros)	Farmers survey	$Fungicide\ cost = \sum (Price\_fungicide \times Dose\_sprayed) + Price\_spraying\ operation \times Number\_spraying\ operation$ <p>Fungicide cost is equal to the sum of the cost of fungicides and the cost of spraying operation. The cost of fungicides is the sum of the product price (<math>Price\_fungicide</math>) and the dose sprayed per product (<math>Dose\_sprayed</math>). The cost of a spraying operation is the sum of the price of a spraying operation multiplied by the number of spraying</p>

operations. The price of the spraying operation is calculated taking into account labour and fuel for one hectare and is standardized at €17.5.

## 2.5 Data analysis

The data were analysed using RStudio 2023.4.3.2.

### 2.5.1 Calculated indicators

To analyse the effects of the disease management strategies on the performances of the cropping systems, we calculated twelve indicators (Tableau 10).

Tableau 10: Calculated indicators to evaluate the performance of the disease management strategies in the field network. TFit = Total Treatment Frequency Index, TFIf = Fungicide Treatment Frequency Index, HEV = High Environmental Value.

Indicator	Indicator calculation method	Threshold for evaluate the performance of the disease management strategies
Difference of average intensity for each disease on leave and grape compared to the usual practices of the winegrower (VITI modality)	Intensity of management strategy (%) - Intensity of VITI modality (%) at veraison stage	For each disease, the indicator is calculated on leaves and grapes separately. During the workshops, the threshold of “5% more intensity” was defined as the limit that must not be exceeded for the strategy to be considered effective in controlling disease development.
Percentage reduction of TFit compared to the VITI modality	$((TFit \text{ of management strategy} - TFit \text{ of VITI modality}) / TFit \text{ of VITI modality}) * 100$	VITI modality
Percentage reduction of TFit compared to the HEV reference	$((TFit \text{ of management strategy} - TFit \text{ of HEV reference}) / TFit \text{ of HEV reference}) * 100$	During the workshops, the threshold of “50% of HEV TFit” was defined as the target to be reached for the management strategy in conventional viticulture to be considered effective in reducing pesticide use.
Percentage reduction of TFIf compared to the VITI modality	$((TFIf \text{ of management strategy} - TFIf \text{ of VITI modality}) / TFIf \text{ of VITI modality}) * 100$	VITI modality
Percentage reduction of TFIf compared to the HEV reference	$((TFIf \text{ of management strategy} - TFIf \text{ of HEV reference}) / TFIf \text{ of HEV reference}) * 100$	During the workshops, the threshold of “50% of HEV TFIf” was defined as the target to be reached for the management strategy in conventional viticulture to be considered effective in reducing fungicide use.
Amount of copper applied (kg) on the ‘ORG2kgCo’ modality and VITI modality		2 kg copper/ha/year (this amount corresponds to half the amount of copper authorized per year in Europe since 2018)
Percentage reduction of copper use compared to VITI modality	$((\text{copper amount of management strategy} - \text{copper amount of HEV reference}) / \text{copper amount of HEV reference}) * 100$	VITI modality

Percentage reduction of copper use compared to European regulations	$((\text{copper amount of management strategy} - \text{copper amount of HEV reference}) / \text{copper amount of HEV reference}) * 100$	50% of European regulation
Percentage reduction of yield compared to the VITI modality	$((\text{Yield of management strategy} - \text{Yield of VITI modality}) / \text{Yield of VITI modality}) * 100$	During the workshops, the threshold of «10% loss» in relation to the VITI modality was defined as the limit not to be exceeded for the management strategy to be considered effective in maintaining yield.
Percentage reduction of the fungicide cost compared to the VITI modality	$((\text{Fungicide cost of management strategy} - \text{Fungicide cost of VITI modality}) / \text{Fungicide cost of VITI modality}) * 100$	VITI modality

## 2.5.2 Statistical analyses

To determine significant differences in TFI reduction and disease control between management strategies, we performed the Kruskal-Wallis ( $p \leq 0.05$ ) and Dunn (p.adjust: Bonferroni) tests because the conditions for ANOVA (each group must be normally distributed, the groups must have the "same" variance, and the samples must be randomly selected independently) were not met.

To assess if the management strategies are economically acceptable, two bivariate figures have been produced, comparing respectively the percentage reduction in yield and the percentage reduction in fungicide costs compared with the VITI modality, and the percentage reduction in the TFI compared with the HEV reference or the percentage reduction in the amount of copper compared with the threshold of 4kg/ha/year. For both graphics, a green box has been drawn to represent «win-win situations». To identify «win-win situations», we chose to focus on fungicide only as the yield losses were mainly explained by diseases. For the first graph, the «win-win situation» represents a situation with TFI or amount of copper reduced by at least 50% and yield loss below 10% (see green box in Figure 25) and on the second graph, the «win-win situation» corresponds a situation with TFI or amount of copper reduced by at least 50% and no increase of fungicide cost (see green box in Figure 26).

## 3. Results

### 3.1 The four management strategies led to a significant reduction in pesticide use

#### 3.1.1 Reduction of pesticide use in comparison with conventional viticulture

For the three conventional management strategies and over the two years, the average values of TFI and TFI of the VITI modality (usual strategy of the winegrowers) were lower than those of the HEV reference ('IPM' = 12.27, 'ORES' = 12.49 and 'BCT' = 9.06 respectively according to the management strategies versus 14.98) (Tableau 11). Only one winegrower part of the 'IPM' group exceeded the

values of the HEV reference (18.36 versus 14.98). The TFI<sub>t</sub> and TFI<sub>f</sub> of the three conventional management strategies were not significantly different (Kruskal test and Dunn test). The TFI<sub>t</sub> and TFI<sub>f</sub> were similar for the 'IPM' and 'ORES' management strategies (TFI<sub>t</sub> = 12.27 and 12.49, respectively, and TFI<sub>f</sub> = 7.94 and 8.4, respectively). The values for the 'BCT' management strategy were lower (TFI<sub>t</sub> = 9.06) because out of the two winegrowers in this group, one of them carried out few treatments, with a TFI<sub>t</sub> of less than 6 and a TFI<sub>f</sub> of less than 4 (Tableau 11). In general, the TFI values for a given modality were relatively stable, with coefficients of variation ranging between 17% and 30%.

Tableau 11: TFI intervals of the VITI modality by conventional management strategies in 2021 and 2022. TFI<sub>t</sub> and TFI<sub>f</sub> are not significantly different (Kruskal test and Dunn test) between management strategies. IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol.

	Total Treatment Frequency Index				Fungicide Index		Treatment Frequency		Amount of data in the two years
	Min	Max	Mean	Standard deviation	Min	Max	Mean	Standard deviation	
<b>IPM</b>	8.7	18.36	12.27	2.79	5.17	12.05	7.94	2.34	10
<b>ORES</b>	8.67	14.93	12.49	2.15	5.58	10.53	8.4	2.04	10
<b>BCT</b>	5.95	11.42	9.06	2.35	3.79	8.10	6.79	2.01	4

### A significant but limited reduction of the Total Treatment Frequency Index in comparison with the VITI modality and the HEV reference

All the winegrowers reduced their TFI<sub>t</sub> compared with their usual practice (VITI modality) over the two years except one winegrower. This winegrower made no difference between the two modalities. The reduction varied from 11.9% to 88.5% (Figure 22a). In comparison with the HEV reference, all winegrowers have successfully achieved a reduction in TFI<sub>t</sub>, with decreases ranging from 5.7% to 93.3%, except for one individual who had adopted the 'IPM' management strategy in 2021 (Figure 22b). This winegrower has a TFI<sub>t</sub> 7.3% higher than the HEV reference (16.04 vs 14.98). Winegrowers who implemented the 'ORES' management strategy seemed to reduce pesticide use more than those who implemented the 'IPM' management strategy but this difference was not significant. Interestingly, the winegrowers who implemented the 'BCT' management strategy significantly reduced TFI<sub>t</sub>, compared to the two other strategies: on average, the 'IPM', 'ORES', and 'BCT' management strategies reduced the TFI<sub>t</sub> by 32.1%, 42.2% and, 87.8%, respectively, compared to the HEV reference (Figure 22b). The 50% TFI<sub>t</sub> reduction target for the 'IPM' and 'ORES' management strategies was barely reached in both years; it was achieved only twice out of 10 for the 'ORES' management strategy (winegrowers n°12 and n°16 in 2022) and only three times out of 10 (winegrower n°15 in 2021 and winegrowers n°9 and n°13 in 2022). This frequent failure to reach the target is explained by the fact that winegrowers have decided to focus on fungicide use reduction and not to consider the use of insecticides and herbicides.

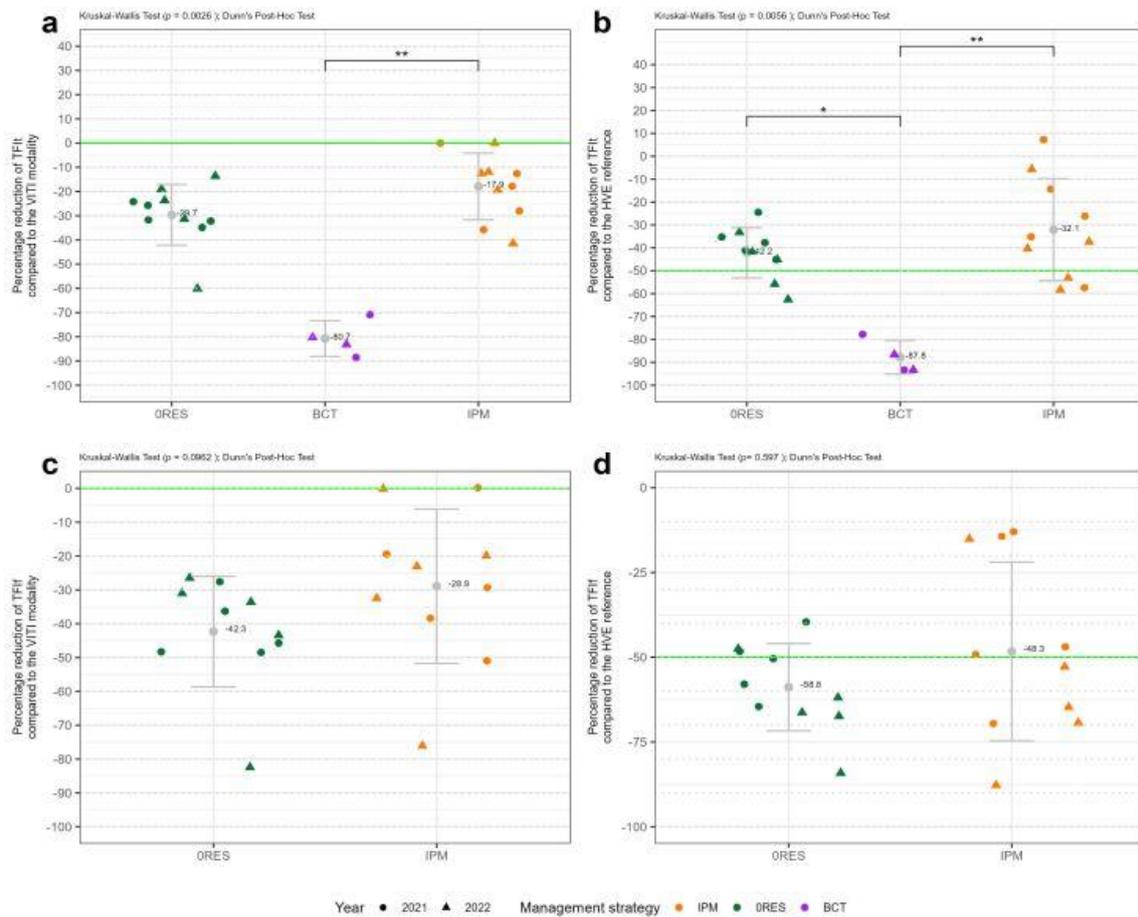


Figure 22 : Reduction of the TFI in percent according to the management strategies compared to the VITI modality (a) and compared to the HEV reference (b) and reduction of the TFI in percent according to the management strategies compared to the VITI modality (c) and compared to the HEV reference (d). The TFI reduction was equal to -100% for the 'BCT' management strategy so it has not been shown in Figures 21C and 21D. Years are represented by a circle for 2021 and a triangle for 2022. Each dot ( $n=24$  for Figure 21a and 21b /  $n=20$  for Figure 21c and 21d) represents a couple (winegrower and year). The grey circle represents the average by management strategies associated with their standard deviation. In Figures 21a and 21c, the green line represents a non-reduction in TFI compared with the VITI modality. In Figures 21b and 21d, the green line represents the target of 50% TFI reduction (TFI = 7.49). IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol, HEV = High Environmental Value.

### A significant reduction of the Fungicide Treatment Frequency Index in comparison with the VITI modality and the HEV reference

Winegrowers who have implemented the 'BCT' management strategy have succeeded in using only biocontrol products for fungicides for both years. As a result, the TFI reduction was equal to -100% for the 'BCT' management strategy and we have not included it in Figure 22c and in Figure 22d. For the other two management strategies, all the winegrowers succeeded in reducing TFI (reduction by 19.2% to 82.4%) in comparison with the VITI modality, except the winegrower n°1 who implemented the 'IPM' management strategy (Figure 22c). As mentioned above, this winegrower made no difference between the two modalities. For the 'ORES' management strategy, the TFI ranged from 1.8 to 6.87 with an average of 4.68, while the TFI for the 'IPM' management strategy varied from 1.39 to 9.9 with an average of 5.88. Winegrowers who implemented the 'ORES' management strategy seemed to

reduce fungicide use more than those who implemented the 'IPM' management strategy but this difference was not significant ( $p$ -value = 0.6) (Figure 22d). Winegrowers who implemented the 'ORES' management strategy reduced TFIF by an average of 58.8% compared with the HEV reference, while those who implemented the 'IPM' management strategy achieved a 48.3% reduction. This difference can be explained by the high variability in fungicide use reduction due to two winegrowers in the 'IPM' group: winegrower n°1 in both years and winegrower n°9 in 2022 (Figure 22d) who did not reduce their fungicide use as much as other winegrowers in the 'IPM' group.

### 3.1.2 Reduction in the amount of copper used in organic viticulture

In this group, five winegrowers participated for two years, while three were present for only one year (winegrower n°21 in 2021, winegrowers n°10 and n°28 in 2022), accounting for a total of 13 winegrower-year pairs over the two years. Six winegrowers had already transitioned to organic farming before the study began, while two (winegrowers n°8 and n°28) were still practising conventional viticulture, which is why the VITI method was applied conventionally. As a result, they used less copper in the VITI modality than in the 'ORG2kgCo' modality (Figure 23). All the winegrowers used less copper than the European regulations (4kg/ha/year) on the two modalities. The amount of copper applied on the VITI modality varied from 0.72kg/ha/year to 3.74 kg/ha/year with an average of 2.38kg/ha/year and a standard deviation of 1.32kg/ha/year (in these data, conventional winegrowers n°8 and n°28 have been excluded). The 'ORG2kgCo' management strategy enabled all winegrowers to apply no more than 2 kg of copper per hectare, except winegrower n°14, who used over 7g. This target was met in both a high rainfall year (2021) and a moderate rainfall year (2022). All winegrowers whose VITI modality was organic viticulture, reduced over the two years the amount of copper applied in the 'ORG2kgCo' modality compared with their VITI modality by 13.1% to 50% (Figure 23).

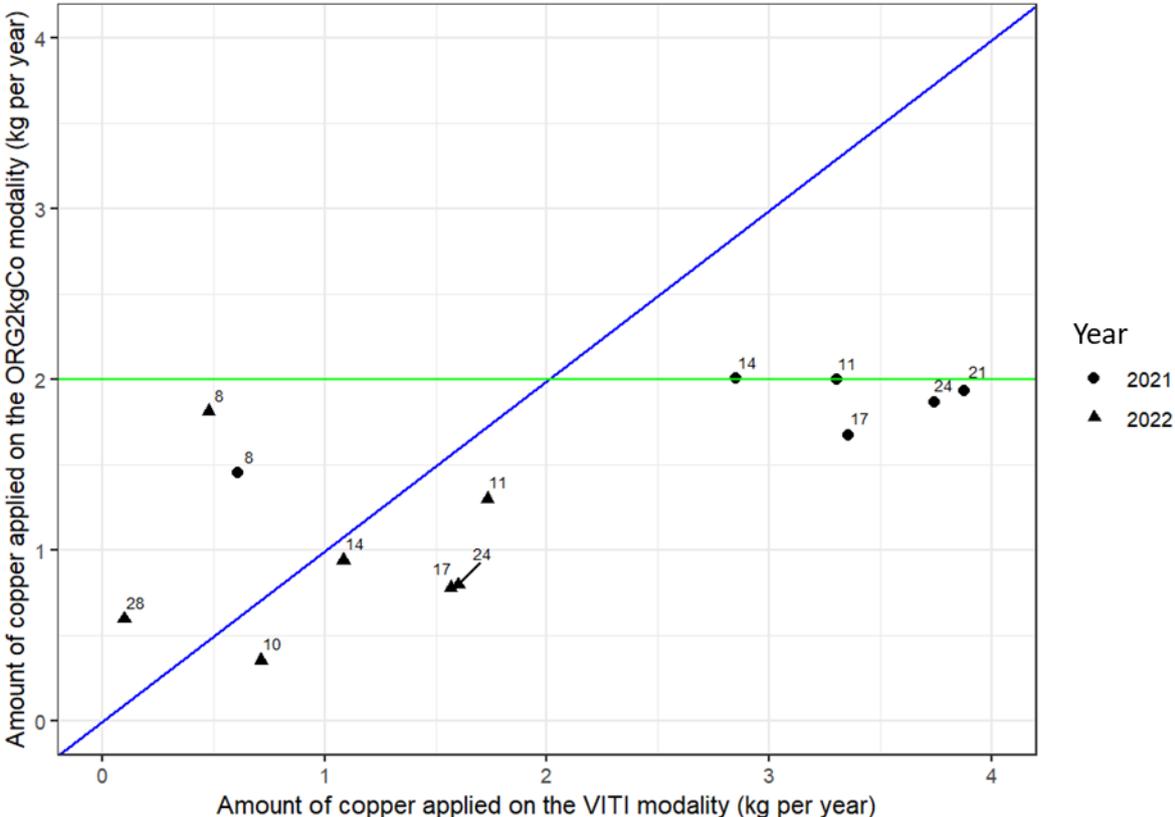


Figure 23: Comparison of the quantity of copper (kg per year) applied to the VITI modality compared to the quantity applied to the ORG2kgCo modality in 2021 (circle) and in 2022 (triangle). Each dot

(n=13) represents a couple (winegrower and year). The blue x=y line shows if the 'ORG2kgCo' modality allowed a reduction in the amount of copper applied compared to the VITI modality, while the green line shows the management strategy target of 2kg of copper per year per hectare. ORG2kgCo = Organic with 2 kg of copper.

### 3.2 Three management strategies resulted in satisfactory disease control

In this section, winegrowers n°8 and n°28 have been removed from the 'ORG2kgCo' management strategy sample because, as mentioned above, their VITI modality was run under conventional viticulture. In both years, all the winegrowers succeeded in controlling diseases on their VITI modality. The intensity of attack by downy mildew and black rot did not exceed 7% on leaves and grapes (Tableau 12). The averages in the VITI modality for winegrowers belonging to the 'IPM', 'ORES' and 'ORG2kgCo' groups were below 1.2%, while those for winegrowers from the 'BCT' group were higher (Tableau 12). Powdery mildew was only observed on grapes in one field in both years. This field belonged to winegrower n°5, who had implemented the 'BCT' management strategy. The powdery mildew intensity in the VITI modality was 3.78% in 2021 and 5.54% in 2022. According to the winegrower, this field has a very strong history of this disease.

Tableau 12: Downy mildew and black rot intensities (in percentage) at the veraison stage of the VITI modality for each management strategy group in 2021 and 2022. For each winegrower, the experimental field was divided into two parts: one managed according to the co-designed management strategy (either 'IPM' or 'ORES' or 'BCT' or 'ORG2kgCo') and the other managed according to the usual strategy of the winegrower (VITI modality). IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol, ORG2kgCo = Organic with 2 kg of copper.

Management strategies groups	Downy mildew intensity (%)								Black rot intensity (%)							
	Leaves				Grapes				Leaves				Grapes			
	Min	Max	Mean	Standard deviation	Min	Max	Mean	Standard deviation	Min	Max	Mean	Standard deviation	Min	Max	Mean	Standard deviation
IPM	0	4.76	1.19	1,80	0	0.56	0.06	0,18	0	0.02	0.00	0,01	0	2.63	0.36	0,81
ORES	0	4.40	0.77	1,49	0	0.00	0.00	0,00	0	0.05	0.00	0,01	0	0.13	0.02	0,04
BCT	0	6.95	2.49	3,21	0	3.09	0.77	1,54	0	0.01	0.00	0,00	0	6.97	2.07	3,29
ORG2kgCo	0	0.68	0.16	0,25	0	0.02	0.00	0,01	0	0.31	0.06	0,11	0	2.94	0.63	1,00

The 'IPM', 'ORES' and 'ORG2kgCo' management strategies caused a limited increase in downy mildew damage on leaves or grapes compared with the VITI modality (Figure 24). The values for the 'IPM' management strategy ranged on the leaves from 0% to 4.26% with an average of 1.04%, and on the grapes from 0% to 1.18% with an average of 0.13% (Figure 24). The values for the 'ORES' management strategy varied on leaves from 0% to 10.18% with an average of 1.70% and on grapes from 0% to 0,06% (Figure 24). For each of the management strategies, one individual suffered a minor increase in mildew damage on leaves compared with the VITI modality. This was winegrower n°18 in 2022 for the 'IPM' management strategy (+ 2.8 points) and winegrower n°20 in 2021 for the 'ORES' management strategy (+5.78 points). The 'BCT' management strategy succeeded in controlling downy mildew on leaves and grapes in three replicates out of 4. In 2022, the field of winegrower n°19 suffered a significant increase in downy mildew damage on leaves with an intensity of 36.53%, an increase of 29.6 points and grapes with an intensity of 32.85%, an increase of 29.8 points compared with the VITI modality (Figure 24). As mentioned above, powdery mildew was observed in the field of winegrower n°5. In 2021, the 'BCT' management strategy led to an increase in the intensity of powdery mildew on grapes by 3.46 points

(7.23% vs 3.77%). In 2022, the opposite occurred with a decrease in powdery mildew on grapes by 2.23 points (3.31% vs 5.54%). The values for the 'ORG2kgCo' management strategy fluctuated on the leaves from 0% to 4.8% with an average of 0.56% and on the grapes from 0% to 0.02%. Winegrower n°21 in 2021 suffered a minor increase in mildew damage on leaves compared with the VITI modality (+4.13 points).

Black rot on leaves was controlled by the four management strategies in both years, with attack intensities not exceeding 0.10%. On grapes, the 'ORES' and 'IPM' management strategies controlled black rot very well with intensity under 2% and no increase compared with the VITI modality (Figure 4). Concerning the 'BCT' management strategy, black rot control varied greatly from one winegrower to another (Figure 24). Winegrower n°5 managed to control it very well in 2022, and in 2021 a minor increase in damage was noted (+ 5.45 points). In contrast, winegrower n°19 was not successful in controlling the disease during the two years with an intensity of 28.67% in 2021 and 20.05% in 2022 (Figure 24). It should be noted that this plot has a strong history of black rot. Finally, the 'ORG2kgCo' management strategy also controlled black rot, although two individuals suffered slightly more damage in 2021 (an increase of 2.62 points for winegrower n°14 and winegrower n°21 with an increase of 4.58 points).

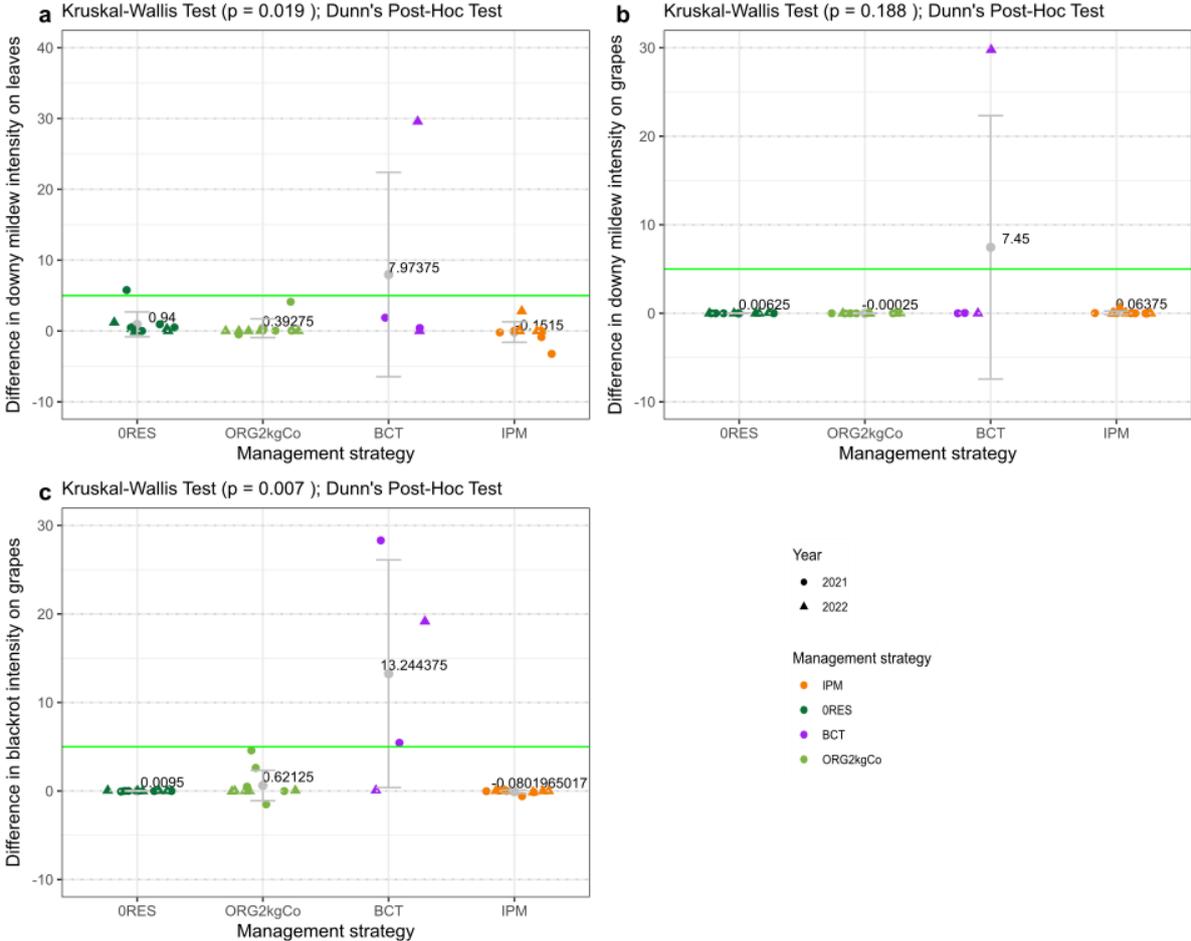


Figure 24: Differences (Intensity of management strategy - Intensity of VITI modality) in downy mildew intensity on leaves at the veraison stage according to the management strategies compared to the VITI modality (a), difference in downy mildew intensity on grapes at the veraison stage according to the management strategies compared to the VITI modality (b), and difference in black rot on grapes at the veraison stage according to the management strategies compared to the VITI modality (c). Years are

represented by a circle for 2021 and a triangle for 2022. Each dot (n=34) represents a couple (winegrower and year). The grey circle represents the average by management strategies associated with their standard deviation. The green line represents the limit of the difference in intensity (5 points) defined as acceptable by the winegrowers during the co-design workshop. IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol, ORG2kgCo = Organic with 2 kg of copper.

### 3.3 A compromise between reducing pesticide use, preserving yield, and controlling fungicide cost

This section quantifies the consequences of the four management strategies, firstly on yield and secondly on the fungicide cost.

To perform the analysis, six winegrowers were removed from the first analysis (Figure 25): for the 'IPM' management strategy, winegrower n°1 was removed as he did not make a difference between the two modalities; for the 'ORG2kgCo' management strategies, three couples were removed because yield data could not be collected and three others because the VITI modality was in conventional agriculture. As a result, a total of 29 couples were used for this initial analysis (Figure 25). All VITI modalities achieved their yield targets for both years, except fields that were frozen in 2021. Taking all management strategies into account, 13 out of 29 couples (44.8%) combined a reduction in pesticide use with yield preservation (dot in the green box in Figure 25).

The 'IPM' management strategy produced yields equivalent to the VITI modality while reducing the TFIf. Winegrower n°16 in 2022 was the only one to have experienced a yield loss of more than 10% (-13.8%) but the target yield was achieved. Moreover, in Figure 25, half of the points are in the green box and two are very close to the 50% TFIf reduction limit. One winegrower in 2022 even managed to reduce his TFIf by 75% while remaining below the -10% yield loss limit compared with the VITI modality (winegrower n°13) and one winegrower (n°9 in 2021) was away from both limits because of a limited reduction in TFIf and a yield gain.

The 'ORES' management strategy achieved more contrasted results in terms of maintaining yields acceptable to winegrowers. Two winegrowers (n°12 and n°26 in 2021) suffered a significant loss of yield compared to the VITI modality (Figure 25). However, this loss was not directly correlated with a greater incidence of bunch disease and the target yield was achieved. Moreover, for winegrower n°12 this difference is observed in favour of the 'ORES' modality in 2022 without any difference in the presence of disease. Three points are between -15% and -20% of yield reduction (winegrower n°23 in 2021 and winegrowers n°16 and n°20 in 2022) and winegrower n°26 in 2022 is very close to -10%. Of these 4 situations, only winegrower n°23 in 2021 did not achieve the target yield because the field had been affected by frost. Finally, 4 out of 10 situations (2 in 2021 and 2 in 2022) managed to combine a 50% reduction in the use of fungicides with the preservation of yields (yield reduction of under 10%) (Figure 25).

The 'BCT' management strategy resulted in yield losses highly variable from one winegrower to another. Only one in 4 situations resulted in a «win-win situation». This variation was explained by the difference in powdery mildew and black rot damage observed. For winegrower n°19, the yield loss was 64.8% in 2021 and 68.4% in 2022, while for winegrower n°5 the loss was 22.1% in 2021 and 5.1% in 2022 (Figure 25).

The 'ORG2kgCo' management strategy limited yield loss compared with the VITI modality, while reducing copper quantity. In fact, 4 out of 7 points are in the green box (57.1%) and n°10 in 2022 is very close to the yield loss limit of -10% compared with the VITI modality (Figure 25). Winegrower n°10

is the only one not to have succeeded in maintaining yield, with a loss of around 20%, but the target yield was achieved (Figure 25).

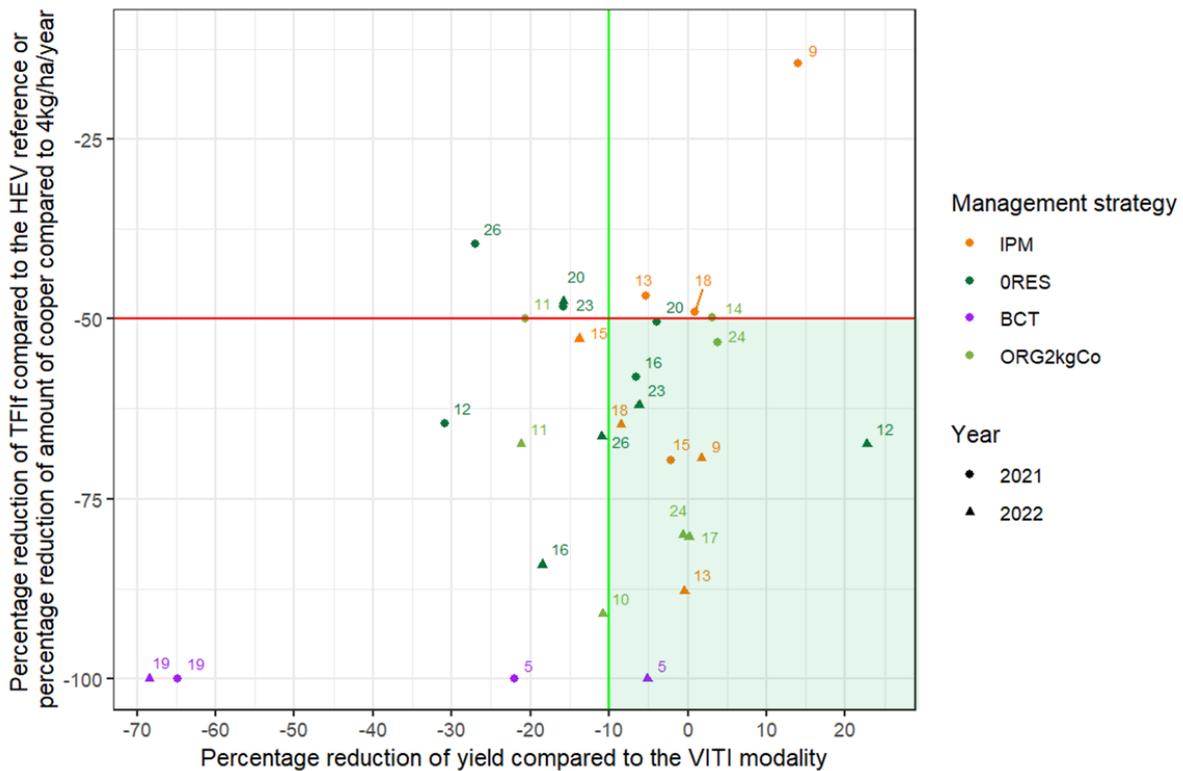


Figure 25: Comparison of the percentage of yield reduction compared to the VITI modality and the percentage of TFif reduction compared to the HEV reference or the percentage reduction in the amount of copper compared to 4kg/ha/year. Each dot (n=29) represents a couple (winegrower and year). The red line represents the target of 50% TFI reduction or 50% amount of copper reduction (2 kg/ha/year). The green line represents the limit of the yield loss percentage (-10%) defined as acceptable by the winegrowers during the co-design workshop. The green box represents a «win-win situation»: TFif or amount of copper reduced by 50% and yield loss below 10%. IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol, ORG2kgCo = Organic with 2 kg of copper, HEV = High Environmental Value.

On average, the fungicide cost of the VITI modality of each winegrower varied according to management strategies tested by the winegrower: 448.7€/ha for management strategy 'IPM', 521.2€/ha for 'ORES', 415.7€/ha for 'BCT', and 378.5 €/ha for 'ORG2kgCo' respectively. Taking all management strategies into account, 21 out of 32 couples (65.6%) combined a reduction in pesticide use with controlling fungicide cost (dot in the green box in Figure 26)

The results of the 'IPM' management strategy varied. In the majority of cases, the implementation of this strategy resulted in a reduction in fungicide cost (from -7.5% to -36.5%) linked to a reduction in TFif (Figure 26). However, three situations resulted in a minor increase in cost from 0.5% to 18.3%. On average, the 'IPM' management strategy resulted in a 9.1% reduction in the cost of fungicides, with a standard deviation of 16.6% (in these data, winegrower n°1 was excluded because he did not implement the management strategy).

The implementation of the 'ORES' management strategy has not resulted in any increase in the cost of fungicides, with a reduction of the TFif (Figure 26). All winegrowers who implemented the 'ORES' management strategy reduced their fungicide costs (from -6.1% to -71.3%). On average, the 'ORES'

management strategy resulted in a 26.2% reduction, with a standard deviation of 18.3%, in the cost of fungicides.

The implementation of the 'BCT' management strategy has led to an increase in the fungicide cost (Figure 26). On average, the increase in fungicide cost incurred by winegrowers when 'BCT' was implemented was 40.6% with a standard deviation of 39.3%. The increase varied from 6.4% to 94.6%.

The 'ORG2kgCo' management strategy resulted in a reduction in fungicide costs each time (Figure 26). This decrease varied from -6.6% to -31.3% with an average of -15.8% and a standard deviation = 7.8% (in these data, winegrowers n°8 and n°28 have been excluded because their VITI modality was in conventional viticulture).

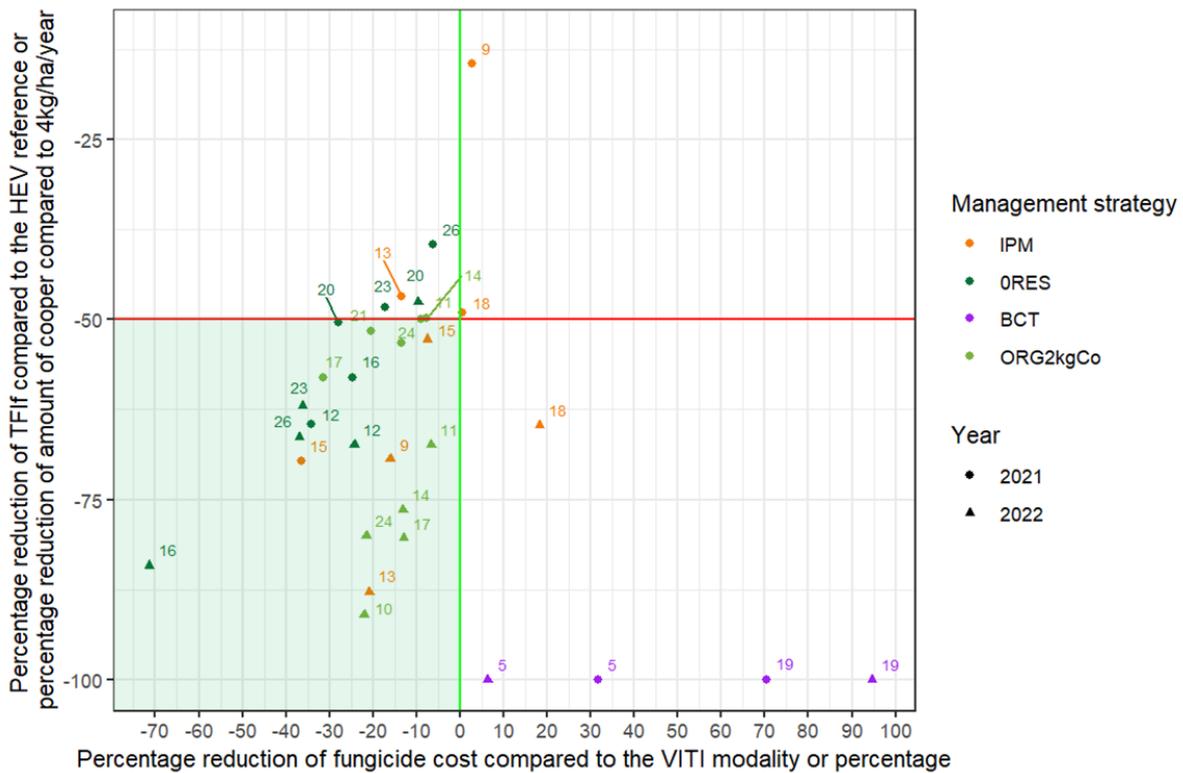


Figure 26: Comparison of the percentage of fungicide cost reduction compared to the VITI modality and the percentage of TFIf reduction compared to the HEV reference or the percentage reduction in the amount of copper compared to 4kg/ha/year. Each dot (n=32) represents a couple (winegrower and year). The red line represents the target of 50% TFI reduction or 50% amount of copper reduction (2 kg/ha/year). The green line represents the limit of no increase in the fungicide cost. The green box represents a «win-win» situation: TFIf or amount of copper reduced by 50% and no increase of fungicide cost. IPM = Integrated Pest Management, ORES = 0 Residu, BCT = Biocontrol, ORG2kgCo = Organic with 2 kg of copper, HEV = High Environmental Value.

## 4. Discussion

The management strategies studied in this paper have yielded compelling results in fostering more sustainable viticulture, both environmentally and economically (maintaining yields and lowering fungicide costs), while concurrently meeting consumers' demand. In the following section, first, we examine the efficacy of the management strategies in reducing pesticide use and how they could be

improved. Subsequently, we will examine the feasibility of implementing these strategies on a larger scale. Finally, we will evaluate the advantages and disadvantages of on-farm experimentation.

## 4.1 Co-designed management strategies have successfully reduced the pesticide use (TFIt) by decreasing the fungicide use (TFIf)

The implementation of the 'IPM' and 'ORES' management strategies resulted in an average reduction of 32.1% ('IPM') and 42.2% ('ORES'), respectively, in TFIt compared to the HEV reference. The reduction target for the two management strategies (reduction by half of TFIt, with biocontrol products not included in TFI calculation, as compared to the HEV) was not achieved satisfactorily. Yet, this reduction is encouraging compared with the results obtained by management strategies co-designed during the DEPHY EXPE ECOVITI project (combining in-station and on-farm experimentation) conducted from 2013 to 2018 in various French wine-growing regions. In this project, the average reduction in TFIt compared with the regional reference was: 40% in the Alsace vineyard (Thiollet-Scholtus et al., 2019), 50% in the Bordeaux vineyard (Delière et al., 2018) and 65% in the Gaillac vineyard (Serrano et al., 2019). In the 'DEPHY FARM' project, winegrowers' groups obtained in several French winegrowing regions a 33% reduction for all pesticides and 39% for fungicides, over 10 years of on-farm experimentation (Fouillet et al., 2022). These management strategies (DEPHY EXPE ECOVITI project and 'DEPHY FARM' project) also aimed to reduce the use of herbicides and insecticides (Delière et al., 2018; Fouillet et al., 2022; Serrano et al., 2019; Thiollet-Scholtus et al., 2019).

In the present project, the reduction of pesticide use was only achieved by reducing fungicides. The 'IPM' and 'ORES' management strategies have led to a reduction in fungicides (reduction from 19.23% to 87.8%). Winegrowers decided to focus on the reduction of fungicide use, as simultaneously reducing both herbicides and insecticides was too ambitious within a short timeframe. The two measures used were: optimisation of the timing, dose, and frequency of pesticide application (Efficiency (E)) and substitution of synthetic products for biocontrol products (Substitution (S)). As a result, Redesign (R), e.g. planting resistant varieties or modifying the training system was not explored during the co-design workshops. However, Redesign is often considered as the most efficient way to reduce the use of fungicides. Indeed, numerous studies have shown that the use of resistant varieties leads to a significant reduction in the use of fungicides (Delière et al., 2018; Thiollet-Scholtus et al., 2021). Since 2021, VINOVALIE winegrowers have already cultivated resistant varieties and have succeeded in drastically reducing the use of fungicides.

To achieve the TFIt reduction target, it seems necessary to reduce the use of herbicides and insecticides. Herbicides could be reduced or even suppressed. One lever available to winegrowers is the management of grass by mowing or tilling the inter-row (Garcia et al., 2018). This lever generally generates an increase in working time and cost, slowing down its large-scale deployment (Fouillet et al., 2022; Serrano et al., 2019). For insecticides, the use of clay for green leafhopper (*Empoasca vitis*) management, as envisaged in the codesign of management strategies, is an effective alternative (Tacoli et al., 2017). It is already widely used in organic farming. In conventional farming, its deployment is limited by the fear of mechanical damage to sprayers expressed by VINOVALIE winegrowers.

The 'BCT' management strategy allowed a significant average reduction in the TFIt (89.4%) because all the fungicides used were biocontrol products. The 'ORG2kgCo' management strategy limited the amount of copper applied under the set limit of 2 kg/ha. In addition, the implementation of the 'ORG2kgCo' management strategy has enabled winegrowers to apply a lower amount of copper than

winegrowers in the 'DEPHY FARM' network in 2021 and 2022 (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2021, 2022).

## 4.2 Co-designed management strategies have successfully controlled diseases

The two years during which the management strategies were evaluated were characterized by contrasted disease pressures: downy mildew pressure was average in 2021 and low in 2022, while black rot pressure was high in 2021 and average in 2022. In these changing conditions, the four management strategies successfully controlled diseases, except the 'BCT' management strategy, with a reduction in pesticide use as mentioned above.

The 'IPM' and 'ORES' management strategies allowed good control of downy mildew on the leaves, with an average attack intensity of 1.37% (ranging from 0% to 10.18%). They provided very good control of downy mildew and black rot on grapes, with an average attack intensity of 0.07% (ranging from 0% to 1.18%) and 0.16% (varying from 0% to 2.04%) respectively (Figure 24). These results are consistent with previous studies on this subject in PDO vineyards (Delière et al., 2018; Thiollet-Scholtus et al., 2019).

The 'BCT' management strategy has led to a sharp reduction in the use of pesticides, but downy mildew control (0% to 36.53% concerning the intensity of attack on leaves and 0% to 32,85% regarding the intensity of attack on grapes) and black rot control on grapes (the intensity of attack varied from 0.12% to 28.67%) have been highly variable (Figure 24). Variability in the efficacy of biocontrol products and the lack of effectiveness of a disease management strategy using only biocontrol products have been observed (Zanzotto & Morroni, 2016). The objective of using only biocontrol products as fungicides without copper and without resistant varieties was very ambitious. Previous studies have combined biocontrol products with resistant varieties (DEPHY EXPE ECOVITI Project, France) or with low-dose copper (Bleyer et al., 2020), and showed better results in terms of disease control.

The 'ORG2kgCo' management strategy enabled very good control of downy mildew on the leaves (the intensity of attack varied from 0% to 0.22%) except in two fields with an intensity of attack of 4.8% and 17.54%, respectively, and in all the fields concerning the grapes (Figure 24). This effectiveness might be compromised if downy mildew pressure is high, as has been observed in previous studies (Delière et al., 2018; Schumacher et al., 2022; Serrano et al., 2019). The effectiveness of this management strategy against black rot on grapes was more variable, with two fields with an attack intensity close to 5.5% and one severely affected field with an attack intensity of 48.77%. The two fields most affected belong to two winegrowers not involved in organic farming (Figure 24). They sought to determine whether a conversion to organic farming was feasible. Indeed, as noted by Merot et al. (2020), such a transition requires significant adaptation and may result in increased disease incidence during the initial years.

## 4.3 In most situations, co-designed management strategies have successfully maintained yields while reducing the cost of fungicides

The 'IPM' and 'ORES' management strategies have limited yield losses and reduced fungicide costs (Figure 25 and Figure 26). These results are in line with other studies which have shown that it is possible to reduce pesticide use without losing yield and by reducing the cost of fungicides (Delière et

al., 2018; Serrano et al., 2019; Thiollet-Scholtus et al., 2019). In contrast, the 'DEPHY FARM' project resulted in an average yield loss of 19% over 10 years of involvement in the group, with differences between wine-growing regions (Fouillet et al., 2022). This ability to reduce pesticide use without losing yield has also been demonstrated on arable crops (Lechenet et al., 2017). The 'IPM' and 'ORES' management strategies have reduced fungicide cost by 9.1% and 26.2%, respectively, in contrast with the 'BCT' management strategy which increased fungicide cost by 40.6% (Figure 26). This reduction is explained by the reduction in the quantity of pesticides used while the increase in the 'BCT' management strategy is explained by biocontrol products costing more than synthetic products. The 'ORG2kgCo' management strategy reduced fungicide cost by 15.8% for the same reasons as IPM' and 'ORES' management strategies (Figure 26). This compensatory effect has been observed in numerous studies concerning the reduction in the use of pesticides (Delière et al., 2018; Métral et al., 2018; Serrano et al., 2019). The results are very variable for the 'BCT' management strategy, with yield losses that could be significant (-5.1% to -68.4% compared to the VITI modality) due to greater disease damage (Figure 25). The 'ORG2kgCo' management strategy reduced fungicide costs but did not achieve the target yield, with an average of 88% of the target yield achieved (Figure 25). For organic viticulture with low copper use, Delière et al. (2018) observed a lower yield achievement in their study (62% on average) while Serrano et al. (2019) and Thiollet-Scholtus et al. (2019) showed that on average yields were achieved in their production area. This slight drop in yield may come from the learning phase of treating at lower copper doses. It will be interesting to see whether the target yield is achieved the following year, as observed by (Merot & Smits, 2020). In their case, this was the third year of conversion.

## 4.4 Discussion about the method of OFE

OFE presents three risks in its implementation, which must be taken into account to maximise its success. Firstly, a potential risk of OFE is that, since the experiment is conducted by the farmer, its success depends heavily on the farmer's commitment and goodwill. For example, in this study, the winegrowers wanted first to work on the reduction of all pesticides (fungicide, insecticide, and herbicide) but finally, they focused only on fungicides. Another example in our study, the various agronomic, ecological, and economic data and indicators were defined during the co-design workshop with the winegrowers, but this consultation was insufficient to collect data on working time. Indeed, winegrowers did not cooperate in providing this data, so this indicator was excluded from the analysis. This limitation has already been observed (Carton et al., 2022).

Secondly, OFE can lead to data loss over time. These data loss may be due to errors in implementation or non-implementation of the modality by the farmer during the year, or to the farmer dropping out between two years. The number of experimental fields must take into account the possible data loss during experimentation.

Thirdly, the implementation of management strategies by the winegrowers (treatment different from the rest of the farm) and data collection by researchers have been considered time-consuming, which may be an obstacle to OFE deployment at a larger scale.

In our study, it was decided to work on one representative grape variety per vineyard, on PDO fields, one field by winegrower, and only with volunteer winegrowers. These four choices can be discussed. First, all grape varieties do not have the same susceptibility to disease (Galet, 1977). The grape varieties chosen were representative of the three production areas, but they do not represent the entire VINOVALIE's vineyard. Négrette N (42% of Vinalie's Fronton vineyard) and Malbec N (82% of Vinalie's Cahors vineyard) are among the varieties that are highly susceptible to mildew according to Galet (1977), unlike Syrah N (11.6% of Vinalie's Gaillac vineyard) which is not very sensitive. In

Gaillac, it is possible that the results could be less favourable for more sensitive grape varieties such as Merlot N or Gamay N, for example.

Secondly, the proportion of Protected Geographical Indication (PGI) fields is increasing in VINOVALIE's vineyards, so a study focusing on PDO fields only is restrictive. In addition, PGI fields are subject to greater disease pressure due to the vine's higher vegetative vigour (de la Rocque, 2002; Goulet et al., 2006) and yield objective (the targeted yield is higher on PGI fields, i.e., 120 hl/ha vs. 50-55 hl/ha). As with the grape varieties, the results could be less favourable with PGI fields, as Serrano et al. (2019) observed.

Thirdly, the environment of the fields influences the development of diseases. For example, low-lying plots close to a river are more susceptible to disease. These fields could present more damage than the chosen experimental fields because their choice was made taking into account their proximity to the farm and their representativeness of the production area and not their disease susceptibility. These first three choices were motivated by the fact that the study aimed to explore the effectiveness of the management strategies in a production context representative of each of the vineyards but can be questioned and could have been different. We could have chosen fields that were more sensitive to disease by selecting a very sensitive grape variety, PGI fields, and an environment favourable to disease development.

The fourth choice was made to work only with volunteer winegrowers and to let them choose the management strategy they wanted to work on. This decision enabled us to keep most of the winegrowers for the two years. However, it did not allow the management strategies to be experimented in all the sub-vineyards that had been identified in the three PDO vineyards (Gaillac, Fronton and Cahors). This is even truer for the 'BCT' management strategy, which was only tested by two winegrowers. Moreover, this choice resulted in the recruitment of winegrowers who already obtained a TFI<sub>t</sub> and a TFI<sub>f</sub> lower than the HEV reference or used a quantity of copper lower than 4 kg/ha/year before setting the experimentation. Although this sample is representative of VINOVALIE's winegrowers (Perez et al., 2024), winegrowers with above-average TFI<sub>t</sub> and TFI<sub>f</sub> could have been encouraged to participate in the study to observe their ability to reduce pesticide use.

For the analysis of the results, it was decided to use only the grading at veraison to assess the effectiveness of the management strategy. In the DEPHY EXPE project, the analysis is carried out at harvest (Delière et al., 2016). This choice was made because it is difficult to differentiate between downy mildew, black rot and scald damage. Moreover, botrytis cinerea can contaminate grapes just before harvest, masking previous damage caused by cryptogamic diseases.

To assess the acceptability of management strategies, yield and the cost of fungal protection were the two indicators used. Other indicators such as working time and the net margin could have been chosen, but this would have required greater collaboration from winegrowers than for the other two indicators (Thiollet-Scholtus et al., 2021).

## 4.5 Perspectives for further adoption of the management strategies

After two years of experimentation, the winegrowers remain hesitant to implement the new management strategies across their entire vineyard. The rationale behind this reluctance is the perceived high risk associated with the strategies, which outweighs the potential for increased earnings. The challenge of scaling up innovative practices on the farm has been recognized, and it has been elucidated that the apprehension stems from the elevated risk of yield losses coupled with the

need for confidence in the efficiency of these practices, as highlighted in previous studies (Chèze et al., 2019; Puech et al., 2021). As soon as this risk-taking is limited and yields can be maintained, winegrowers are prepared to adopt low pesticide-use practices (Chèze et al., 2019). Concerning the 'IPM', 'ORES', and 'ORG2kgCo' management strategies, an intermediate stage considered by the winegrowers could be to deploy the management strategies on the scale of several fields (5-10% of their farm) which would be treated independently of the rest of their farm. This stage could be extended by a further 3 years, allowing the strategies to be tested over several years with different disease pressures (especially strong ones) and to observe their long-term effects. It would also enable winegrowers to observe the behaviour of management strategies with different grape varieties and different production objectives. (PDO and PGI), which would be representative of the rest of their farm. As mentioned earlier, the management strategies are tested on PDO fields and their implementation without testing on PGI fields could be too risky. Finally, this step would permit to study the impact of these strategies on winegrowers' working time, which has not been addressed in this study. However, for the 'BCT' management strategy, it would be necessary to continue experimentation on a field scale to improve its effectiveness before considering a transfer to a larger scale. Indeed, the results of this strategy vary greatly from year to year and from winegrower to winegrower. The aim would be to continue on a small scale (0.5 hectare in this study) to study this variability over several years and to be able to assess it before a larger-scale transfer.

To streamline the dissemination of findings to winegrowers not actively engaged in the study, annual communication of results is extended to all cooperative members. This includes on-site visits in July, along with an oral presentation during the harvest review meetings conducted by VINOVALIE advisors in each vineyard. We intend to persist in conducting these visits, utilising 'pilot' farms as demonstrative platforms. Past experiences have demonstrated the effectiveness of such demonstrations in motivating other farmers by providing tangible results within their specific production contexts (Le Bellec et al., 2012). It is noteworthy that winegrowers often employ pesticides as an insurance mechanism, yet this does not necessarily translate to a commensurate increase in their overall income (Menapace et al., 2013). To encourage them to reduce their pesticide use, a significant financial incentive through a 'production-risk premium' seems necessary (Chèze et al., 2019). In addition to awareness-raising actions, the introduction of an insurance system covering the risk of crop damage due to cryptogamic diseases linked to the reduction in plant protection inputs, as proposed by Raynal et al. (2022), could help to encourage a reduction in the use of pesticides. This positive incentive would be more interesting than a negative incentive through an increase in pesticide prices. It has been shown that a very large change in price is needed to bring about a relatively small change in the quantity of pesticides (Ayoub & Vigeant, 2020).

## 5. Conclusion

In this paper, we showed that the three management strategies in conventional viticulture ('IPM', 'ORES', and 'BCT') have resulted in additional reductions in pesticide use in 2021 and 2022 in comparison with winegrower practice VITI modality (from 11.9% to 88.5%) and HEV reference (from 5.7% to 93.3%). Similarly, the management strategy 'ORG2kgCo' in organic viticulture has resulted in a reduction in copper use (from 13.1% to 50% compared to winegrower practice) so that the target of 2kg/ha/year which represents a 50% reduction compared with the European regulations is not exceeded. Except for the 'BCT' management strategy, we showed that the management strategies succeeded in controlling disease, limiting yield loss, and reducing the fungicide cost which is encouraging for a transfer to PDO fields. On the contrary, the results for the 'BCT' management strategy are too variable to recommend its transfer to winegrowers. We need to continue to improve

its effectiveness. On-farm experimentation was carried out on a small area of one of the farm's fields. To facilitate their large-scale release, we need to study their performance on larger surfaces, with different vine varieties, production objectives, and across various years with contrasting disease pressures. Farmers are risk-averse about reducing pesticides. This approach helps to attenuate this risk-averse, as the management strategies are implemented by the farmers themselves and experimented on their farms.

## Acknowledgments

The authors thank all the winegrowers for their involvement in this study. The authors also thank the French ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) and the VITI OBS project funded by the Occitanie Region for their support of this study. The authors thank the editors of Oeno One and the anonymous reviewers for the improvements made to the article.

# Chapitre 3 : Modélisation qualitative des facteurs influençant le développement de trois maladies de la vigne (mildiou, oïdium et black rot) pour la prédiction des dégâts sur les grappes de la vigne

## **Contenu du chapitre :**

Dans ce chapitre 3 de la partie Résultats, nous présentons trois modèles qualitatifs indépendants concernant trois maladies de la vigne (mildiou, oïdium et black rot) pour prédire les dégâts sur les grappes de la vigne. Deux modèles sur les trois modèles ont été évalués grâce à une base de données construites dans le cadre de la thèse. La première sous-partie concernant le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot est rédigé sous la forme d'un article scientifique. Il est prévu de le soumettre dans la revue Crop Protection et pour une présentation au 23<sup>ème</sup> congrès du GIESCO (Groupe international d'Experts en Systèmes vitivinicoles pour la CoOpération) qui aura lieu en juillet 2025. Les deux autres parties concernant le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou et IPSIM-VIGNE-Oïdium sont écrites en 4 temps :

- Présentation des effets des pratiques culturales, du climat et de l'environnement de la parcelle sur le développement de la maladie
- Présentation de la construction du modèle
- Présentation des résultats de l'évaluation du modèle (que pour IPSIM-VIGNE-Mildiou)
- Discussion spécifique à ce modèle

Pour finir, une discussion globale de ce chapitre est réalisée pour aborder les intérêts et limites des modèles IPSIM développés, l'amélioration des modèles en utilisant un algorithme et la création du modèle IPSIM-VIGNE.

## **Résultats principaux :**

- Le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot possède une qualité de prédiction satisfaisante de 48%.
- Le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou possède une qualité de prédiction satisfaisante de 64,6%.
- Le modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium est en cours de construction et n'a pas pu être évalué.
- La base de données utilisée pour l'évaluation de la qualité de prédiction des deux modèles pourrait être améliorée en augmentant la quantité de données et en diversifiant les cas de sévérités observées.
- Un besoin d'amélioration des modèles évalués avec des pistes d'amélioration déjà identifiées et en utilisant un algorithme.

# 1. Modélisation qualitative des facteurs influençant le développement de *Guignardia bidwellii*, pathogène responsable du Black rot, pour la prédiction des dégâts sur les grappes de la vigne

Cette partie du chapitre 2 s'est appuyé sur les travaux réalisé par Solen Farra (Farra, 2022).

## Résumé

La vigne est une des cultures les plus consommatrice de pesticides en France. La réduction de leur utilisation est un enjeu majeur pour préserver l'environnement et la santé humaine. Une lutte raisonnée et intégrée face aux maladies permet une limitation du recours aux pesticides mais aussi une limitation des pertes de rendement. Le black rot est une maladie qui engendre de plus en plus de dégâts dans le Sud-Ouest de la France et aujourd'hui, la modélisation de ces dégâts n'est pas développée. Le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot s'appuie sur une approche holistique pour prédire le profil de dégât d'une parcelle de vigne causé par le Black rot en fonction de l'historique sanitaire, des pratiques culturales et de l'environnement. Il a été construit selon les connaissances produites par la littérature scientifique et techniques et les connaissances d'experts. Le modèle est composé de 46 attributs dont 29 attributs d'entrée et 17 attributs agrégés. Il estime la sévérité du black rot sur grappe dans la parcelle pour une année de culture. Le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot est le premier modèle hiérarchique qualitatif consacré au pathosystème vigne/*Guignardia bidwellii*. Avec une précision satisfaisante de 48%, ce modèle est prometteur d'autant plus que des améliorations dans sa construction sont envisagées pour augmenter sa précision.

## 1.1 Introduction

La vigne est sujette à plusieurs maladies et ravageurs qui nuisent à la qualité et à la quantité du rendement en raisin lors de la récolte (Fermaud et al., 2016). Le black rot (*Guignardia bidwellii*) est originaire des Etats-Unis et en Europe, il a été détecté pour la première fois en France en 1885 (Viala & Ravaz, 1886). Par la suite, il s'est répandu dans de nombreux pays viticoles européens (Allemagne, Italie, Suisse, Portugal, Autriche, Hongrie ...). Et aujourd'hui, sa présence est mondiale avec des observations en Asie, en Amérique du Sud et Centrale, en Afrique et en Océanie (Szabó et al., 2023). En France, dans la majorité des vignobles, le black rot a été observé. La maladie se retrouve fortement dans les vignobles du Sud-Est et Sud-Ouest, en Savoie (Blancard et al., 2015) et dans le Beaujolais. Les variétés de vignes européennes sont sensibles au black rot (Hausmann et al., 2017), et en l'absence d'une protection adéquate des cultures et dans des conditions chaudes et humides, une apparition du black rot peut être attendue. Il peut être présent sur feuille et sur grappe mais les pertes économiques ne sont dues qu'aux attaques sur grappe (Ries, 1999). Dans les vignobles fortement infectés, la perte de rendement peut parfois atteindre 100 % (Rinaldi et al., 2013).

La lutte contre le black rot se fait traditionnellement par l'application répétée de fongicides allant du début de la croissance des pousses jusqu'à la véraison (Wilcox, 2003), période à laquelle la vigne a également besoin d'être protégée contre le mildiou et l'oïdium.

La lutte contre ces trois maladies est commune car une sélection de fongicides qui sont également efficaces contre le mildiou et l'oïdium (les strobilurines, les triazoles et les dithiocarbamates) garantit une protection contre le black rot sans aucune application supplémentaire (Molitor & Berkelmann-Loehnertz, 2011). Néanmoins, Roussel (1971) avertit les producteurs français de ne pas programmer les traitements contre le mildiou et le black rot sans tenir compte des différences entre les deux maladies (pluviométrie et température minimale pour leur développement). En effet, un raisonnement des traitements contre le mildiou au travers de modèles spécifiques à cette maladie peut entraîner une absence de protection contre le black rot. Comme les autres maladies cryptogamiques de la vigne, différents modèles ont été développés concernant le black rot pour aider les viticulteurs à réduire les traitements. Le premier modèle combinant température et durée d'humectation des feuilles a été développé pour définir l'intensité de l'infection foliaire de la vigne causée par *G. bidwellii* (Spotts, 1977). D'autres modèles simples ont été développés par la suite pour prédire le moment d'une épidémie probable du black rot prenant en compte des données climatiques comme la pluviométrie, l'humidité relative et les données de température (Ellis et al., 1986; Maurin et al., 1991). Certains modèles prennent en compte des données supplémentaires concernant le cycle biologique du black rot et le cycle phénologique de la vigne pour prédire les risques de contamination du black rot ce qui permet d'augmenter la qualité de prédiction des modèles (Molitor et al., 2016; Rossi et al., 2015). Ces différents modèles permettent de programmer les traitements durant la saison en étant implémentés dans des outils d'aide à la décision comme VitiMeteo Black Rot (Molitor et al., 2016) et Viti.net (Onesti et al., 2016) en Europe mais pas en France et aux Etats-Unis. D'autre part, différentes mesures prophylactiques tout au long du cycle de la vigne ont montré leur intérêt pour atténuer le risque d'attaque de black rot. Par exemple, après la récolte, la quantité de matériel infectieux peut être réduite en dessous du niveau critique en coupant et en brûlant les grappes momifiées et en enfouissant les débris végétaux infectés qui tombent au sol lors de la taille (Szabó et al., 2023). Au cours de la période végétative, une canopée aérée, peu épaisse et l'absence d'adventices dans les rangs garantissent un séchage rapide du feuillage après les pluies, ce qui réduit le risque d'infection (Szabó et al., 2023).

Il est admis aujourd'hui qu'une protection optimale face au Black rot n'est garantie que par la combinaison de mesures sanitaires et prophylactiques avec un itinéraire de traitement fongicide raisonné (Onesti, 2015). L'interaction entre ces facteurs et leur importance relative sur le développement du black rot est difficilement quantifiable et mal connue aujourd'hui. Cependant, leur impact qualitatif individuel a été documenté comme évoqué précédemment. La modélisation qualitative au travers de la création d'un modèle qualitatif et hiérarchique des dégâts ou « Injury Profil Simulator » (IPSIM) (Robin et al., 2013) pour la vigne semble une solution intéressante. Ce modèle permet de prendre en compte la complexité et l'ensemble des relations au sein d'un agrosystème entre le pédoclimat, l'environnement de la parcelle et les pratiques culturales mises en place sur la parcelle. La création d'un modèle IPSIM a déjà été réalisée concernant plusieurs bioagresseurs et sur différentes cultures comme par exemple la rouille brune du blé (Robin et al., 2013), les mouches de la chayote (Deguine et al., 2021) et le chardon en grandes cultures (Lacroix et al., 2021).

Cet article vise à répondre à la question de recherche suivante : « Comment le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot contribue à représenter les liens entre les pratiques culturales d'un viticulteur, la situation de production et la sévérité du black rot ? ». Pour répondre à cette question, le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot a été développé et évalué pour prendre en compte la complexité des interactions entre les facteurs influençant le développement du black rot.

## 1.2 Matériel et méthodes

### 1.2.1 Processus de construction du modèle

Le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot a été construit selon la méthode décrite dans des articles antérieurs (e.g. (Robin et al., 2013)) et sur le site internet IPSIM (<https://ipsim.hub.inrae.fr/>, (Robin et al., 2018)). Elle est basée sur la méthode DEX et est mise en œuvre avec le logiciel DEXi (Bohanec, 2021). La méthode DEX est une méthode d'évaluation multicritères, qui s'appuie sur DEXi et sur un processus d'agrégation spécifique permettant de synthétiser progressivement l'information des critères d'entrée jusqu'à un critère agrégé et ainsi de résoudre un problème complexe en le désagrégeant en sous problèmes plus faciles à résoudre. DEXi est un logiciel permettant de prendre en charge des modèles qualitatifs hiérarchiques comme par exemple le modèle DEXiPM utilisé pour évaluer des agrosystèmes par la connaissance d'experts (Pelzer et al., 2012). IPSIM est un modèle hiérarchique, agrégatif et qualitatif basé sur les connaissances présentes dans la littérature scientifique, technique et l'expertise. IPSIM-VIGNE-Black rot a été construit de la même manière que les autres modèles IPSIM en quatre étapes successives (Robin et al., 2013) :

1. Identification et organisation des attributs (variables jouant sur le développement et les dégâts associés du black rot sur les grappes et leur relation),
2. Définition de l'échelle qualitative de chacun des attributs,
3. Définition des tables d'agrégation permettant de synthétiser l'impact des combinaisons des attributs sur l'intensité finale du black rot
4. Observation des poids des attributs calculant l'influence de chacun des attributs sur l'intensité finale du black rot sur les grappes.

#### Etape 1 : Identification et organisation des attributs

La première étape de la construction du modèle consiste à choisir les attributs, soit les facteurs favorisant ou défavorisant qui peuvent expliquer la sévérité finale de la maladie à prendre en compte et leur hiérarchie dans l'arbre d'agrégation des attributs. Les attributs sont de deux formes : les attributs de base ou d'entrée du modèle et les attributs agrégés. Pour réaliser cette étape, une lecture approfondie de la bibliographie (en utilisant Google Scholar et les mots clés suivant : Black rot, Black rot model, *Guignardia bidwellii*) sur les facteurs biotiques et abiotiques ayant un impact sur le développement du black rot et des dégâts associés sur les grappes de la vigne a été réalisée. Pour compléter, un atelier regroupant des experts (conseillers viticoles, ingénieurs de recherche et chercheurs de l'INRAE, viticulteurs) sur la thématique a été organisé. Cet atelier avait pour objectif de présenter le choix des attributs effectué suite à la revue bibliographique et l'arborescence du modèle pour les valider. Cette présentation a été effectuée par sous-partie du modèle et une discussion libre avait lieu. Suite à cet atelier, l'arborescence du modèle a été finalisée et implémentée dans le logiciel DEXi.

#### Etape 2 : Définition de l'échelle qualitative de chacun des attributs

Chacun des attributs possède une échelle qualitative qui est soit ordinaire ou soit nominale. Par choix, les échelles possèdent de deux à quatre niveaux. La sortie finale du modèle qui est « la sévérité du black rot sur grappes dans la parcelle année N » possède trois niveaux : faible, moyen et fort. La sévérité du black rot sur grappe correspond à l'intensité d'attaque du black rot sur les grappes. Pour chacune des échelles des attributs précédant l'attribut final, une valeur « favorable » détermine que l'attribut est favorable au développement du black rot et donc défavorable pour les grappes de la vigne et le viticulteur. Par convention, dans le logiciel DEXi, la valeur « favorable » s'affichent en rouge. A l'inverse, une valeur « défavorable » signifie que l'attribut est défavorable pour le développement du

black rot et favorable pour le viticulteur. La valeur « défavorable » s’affiche en vert dans DEXi. Pour finir, une valeur « neutre » au regard du développement du black rot s’affiche en noir dans DEXi.

### Etape 3 : Définition des tables d’agrégation

Les tables d’agrégation permettent de calculer l’influence des interactions entre les attributs à tous les niveaux. Il existe autant de tables d’agrégation que d’attributs agrégés. Dans DEXi, les agrégations sont renseignées manuellement dans des tableaux selon un raisonnement qualitatif du type « si-alors » tel que : SI <critère 1 est « favorable »> ET SI <critère 2 est « favorable »> ALORS <critère agrégé est « favorable »>. Ces règles d’agrégation permettent de donner une réponse à toute situation possible du modèle. Le logiciel effectue une agrégation des attributs d’entrée jusqu’à l’attribut final qui est dans le cas de ce modèle la sévérité du black rot sur grappes dans la parcelle année N.

### Etape 4 : Observation des poids des attributs calculant l’influence de chacun des attributs sur l’intensité finale du black rot sur les grappes

L’influence de chaque attribut (d’entrée ou agrégé) sur l’attribut de sortie du modèle est estimée par son poids : plus le poids est élevé, plus l’influence est forte (Bohanec et al., 2007). Le poids est automatiquement calculé par DEXi en fonction des tables d’agrégation à l’aide d’une méthode de régression linéaire (Bohanec, 2020). DEXi calcule quatre types de poids : poids local et global, normalisé ou non. Nous considérons seulement les poids normalisés car ils tiennent compte du nombre de valeurs à l’intérieur des échelles. Le poids local d’un attribut exprime l’importance de son influence sur l’attribut agrégé auquel il est rattaché tandis que son poids global rend compte de l’importance de son influence sur l’attribut final du modèle (la sévérité du black rot sur grappes dans la parcelle année N). Plus l’attribut a un poids ‘local’ important, plus son influence sur le niveau supérieur est importante et plus l’attribut a un poids ‘global’ important, plus son influence sur l’attribut final, ici la sévérité du black rot sur grappe, est importante.

## 1.2.2 Description de la collecte de données et de la base de données utilisée pour l’évaluation du modèle

Pour évaluer la qualité prédictive du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot, nous avons collecté les informations concernant les dégâts de black rot, les pratiques culturales, l’environnement de la parcelle et le climat à partir de trois vignobles du Sud-Ouest de la France : Cahors, Fronton et Gaillac (Figure 27). Les trois sources sont : des essais effectués par la coopérative VINOVALIE, des essais réalisés dans le cadre du projet VITI OBS et des essais menés dans le cadre du projet DEPHY EXPE ECOVITI Sud-Ouest. Selon les informations collectées, les valeurs quantitatives ont été converties en données qualitatives pour que la variable soit compatible avec le logiciel DEXi. Par exemple, pour l’attribut « fertilisation en azote » la valeur quantitative de dose d’azote appliquée a été traduite en valeur qualitative : <60 unités = raisonnée ; > 60 unités = excessive.

Les modes de protection phytosanitaire sont diversifiés au sein de la base : viticulture conventionnelle, viticulture biologique et 100% fongicides de biocontrôle. Après avoir effectué un tri et un retrait des données incomplètes, la base de données est composée de 82 données se distribuant sur la période 2014-2022. Trois classes de sévérité ont été définies à partir de l’intensité d’attaque à la véraison du black rot sur grappes : sévérité faible pour une intensité d’attaque inférieure à 1%, sévérité moyenne pour une intensité d’attaque comprise entre 1% et 5% et sévérité forte pour une intensité d’attaque supérieure à 5%. Les cas de sévérité ‘Faible’ dominent dans la base de données avec une valeur de 70% sur le total des données. Les cas de sévérité ‘moyen’ représentent 12% de la base de données et les cas de sévérité ‘fort’ constituent 18% de la base de données.

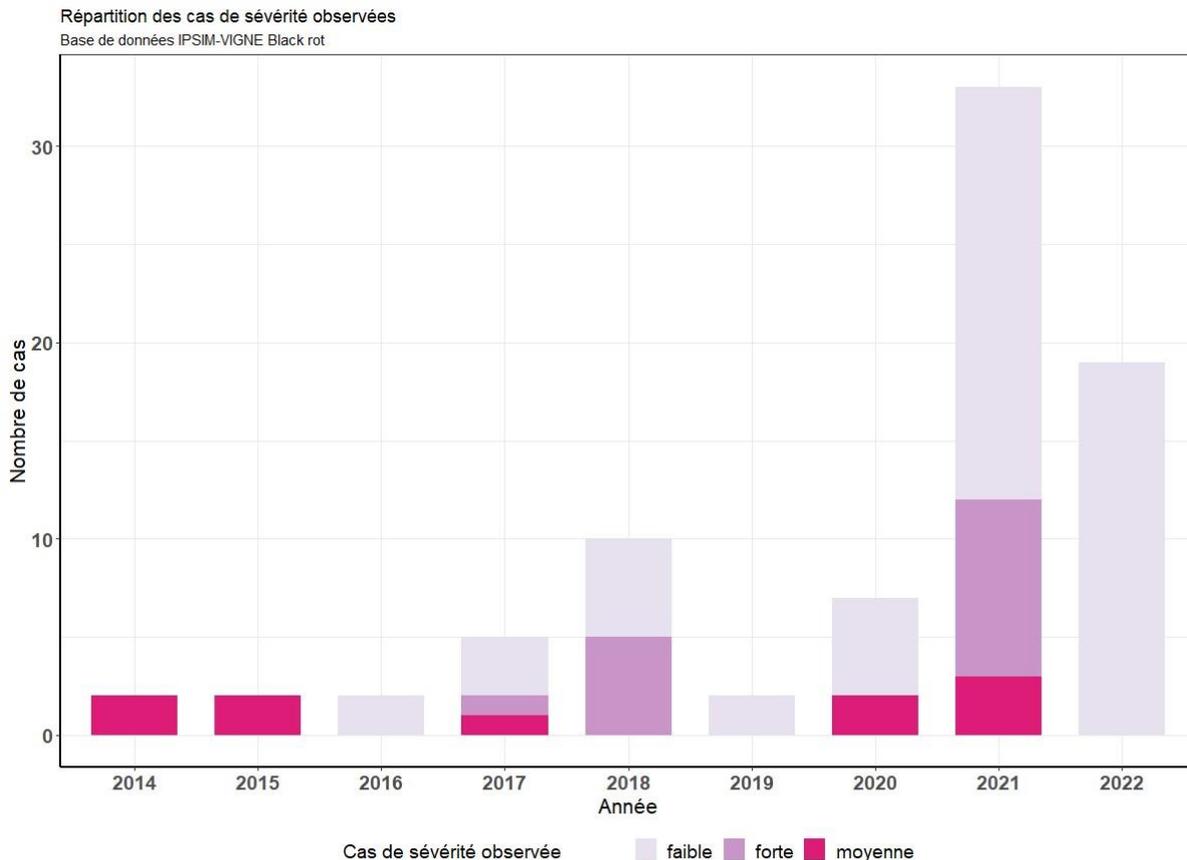


Figure 27 : Répartition des données composant la base de données selon la sévérité d'attaque du black rot sur grappe à véraison observée et l'année d'observation pour l'évaluation du modèle en août 2022. Une donnée représente une parcelle et une année.

### 1.2.3 Évaluation de la qualité prédictive du modèle

L'évaluation statistique de la qualité prédictive du modèle s'appuie sur une base de données comparant des données modélisées (variables de sortie du modèle) et des données observées. Il est important de préciser que cette base de données n'a pas été utilisée pour construire le modèle et qu'elle constitue une base de données indépendante pour son évaluation. Le résultat de comparaison est illustré par une matrice de confusion (Witten et al., 2011). Pour résumer la matrice de confusion, plusieurs indicateurs statistiques ont été calculés pour évaluer la qualité prédictive du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot (Tableau 13). Deux indicateurs de classification multinomiale ont été calculés pour donner une information globale sur le modèle :

- La précision globale est définie par le nombre de valeurs calculées bien modélisées (A) sur le nombre de valeurs calculées (N) (Nguwi & Cho, 2010). Elle illustre la proportion de cas qui sont bien modélisés par le modèle.
- Le kappa de Cohen pondéré quadratiquement ( $\kappa_{ow}$ ) évalue le niveau de correspondance entre les valeurs observées et les valeurs calculées (Cohen, 1960). C'est la proportion de variabilité expliquée par le modèle (Cohen, 1960; Fleiss & Cohen, 1973).  $\kappa_{ow}$  est compris entre -1 et 1. Les valeurs de  $\kappa_{ow}$  peuvent être interprétées comme suit : les valeurs  $\leq 0$  indiquent une absence de concordance (Poor en anglais), les valeurs entre 0.01-0.20 indiquent une légère concordance (Slight), les valeurs entre 0.21-0.40 indiquent une concordance passable (Fair), les valeurs entre 0.41-0.60 indiquent une concordance modérée (Moderate), les valeurs entre 0.61-0.80

indiquent une concordance substantielle (Substantial) et les valeurs entre 0.81-1 indiquent une concordance presque parfaite (Almost perfect) (McHugh, 2012).

Ces deux indicateurs donnent une vision globale de la qualité prédictive du modèle mais ne tiennent pas compte des asymétries du modèle. Par exemple, le modèle pourrait prédire être bon pour prédire deux classes sur trois ce qui ne se verrait pas avec ces deux indicateurs. Pour obtenir des informations sur chacune des classes, quatre indicateurs statistiques binomiaux ont été calculés pour chaque classe de sévérité (faible, moyenne et forte). Dans notre cas, le modèle possède trois classes de la sévérité du black rot sur grappes. Pour utiliser ces indicateurs, une adaptation doit être faite pour passer en binomiale. Par exemple, si les calculs se portent sur la classe « Faible », les deux autres classes (moyenne et forte) sont regroupées pour former une classe globale. Voici les quatre indicateurs :

- La sensibilité  $r$  désigne le taux de résultats « positifs », la probabilité que le modèle prédit une sortie positive pour une observation positive (Witten et al., 2011).
- La spécificité  $s$  désigne le taux de résultats « négatifs », la probabilité que le modèle prédit une sortie négative pour une observation négative (Witten et al., 2011).
- La précision  $p$  est calculée comme le nombre de proportions d'observation positives correctement modélisées sur le total de données modélisées positives (Witten et al., 2011).
- La note F1 évalue la moyenne harmonique entre la précision  $p$  et la sensibilité  $r$  (Chinchor, 1992). Cette note illustre l'équilibre entre précision et sensibilité du modèle. Pour une note de 1, la précision et la sensibilité sont parfaites. Pour une valeur qui tend vers 0, la précision et la sensibilité sont mauvaises (Deguine et al., 2021).

Tableau 13 : Indicateurs statistiques utilisées pour la construction de la matrice de confusion du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot (évaluation de la qualité prédictive du modèle).

Types de données	Mesures statistiques	Description	Formule de calcul
Générale (multinomiale)	Précision globale	Proportion de prédictions correctes sur l'ensemble de la base de données	Précision globale = $A/N$ A : nombre de valeurs calculées correctes N : nombre de valeurs calculées
	$\kappa_{ow}$	Kappa de Cohen pondéré quadratiquement	$\kappa_{ow} = (p_o - p_e) / (1 - p_e)$ $p_o$ : la correspondance relative observée $p_e$ : la correspondance attendue quand les valeurs sont choisies de manière aléatoire
Classe (binomiale)	Sensibilité $r$	Proportion d'observations correctement modélisées sur le total des observations de la classe	$r = N_{cor} / N_{obs}$ $N_{cor}$ : observations correctement modélisées $N_{obs}$ : total des observations de la classe
	Spécificité $s$	Proportion d'observations hors de la classe considérée correctement modélisées sur le total des observations en dehors de la classe considérée	$s = NHC_{cor} / NHC$ $NHC_{cor}$ : observations hors de la classe considérée correctement modélisées $NHC$ : total des observations en dehors de la classe considérée

Précision $p$	Proportion d'observations correctement modélisées sur le total de données modélisées dans la classe	$p = N_{cor}/N_{mod}$ $N_{cor}$ : observations correctement modélisées $N_{mod}$ : total de données modélisées dans la classe
Note F1	Moyenne harmonique entre la précision $p$ et la sensibilité $r$	$Note F1 = 2rp/(r+p)$ $p$ la précision de la classe et $r$ la sensibilité de la classe

## 1.2.4 Développement de l'interface utilisateur

Pour faciliter l'usage de IPSIM-VIGNE-Black rot, une interface utilisateur a été créée sous VBA (Visual Basic for Applications) Excel. Le logiciel VBA Excel (macro Excel) permet d'automatiser des tâches dans un fichier Excel. Cette interface permet de transférer le modèle et d'interagir avec les agriculteurs plus facilement.

## 1.3 Résultats

### 1.3.1 Présentation du modèle

#### Identification et organisation des attributs

La bibliographie et l'atelier d'experts ont permis de sélectionner 23 facteurs pertinents impliqués dans le développement du black rot. Cette sélection est résumée dans le Tableau 14. Elle s'appuie sur un total de 27 sources bibliographiques étant des articles scientifiques ou de la documentation technique.

Tableau 14 : Synthèse des facteurs influençant le développement du Black rot sélectionnés pour le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot

Facteurs	Direction de l'effet (Facteurs favorable (+), nuisibles (-) à la maladie)	Intensité de l'effet en 3 niveaux : bas (+), moyen (++), élevé (+++)	Impact sur le développement du Black rot
Historique de contamination sur grappe dans la parcelle	+	+++	Les débris infectés en saison N-1 sont capables de produire des fructifications en saison N sous des conditions optimales.
Mise en place d'un protocole de décontamination de la parcelle	-	+++	Le bénéfice des traitements est lié à la quantité d'inoculum présent avant chaque passage.
Historique de contamination dans l'ilot de parcelles	+	++	Les parcelles au voisinage de zone non cultivée chaude et humide, de vignes abandonnées, sont les plus attaquées.
Type de pulvérisateur utilisé	-	+++	La qualité de pulvérisation est fondamentale pour une pénétration efficace des produits sous la canopée et une protection optimale des grappes.
Type de produit utilisé	-	++	A ce jour, aucun produit homologué ne possède une capacité d'éradication du Black rot. Ils n'offrent qu'un contrôle plus ou moins satisfaisant. Il est donc important de distinguer leurs effets.
Gestion des résidus de taille	+/-	+++	Un protocole sanitaire rigoureux consiste à : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tailler manuellement les organes infectés tout au long de la saison (rameaux, grappes, feuilles, etc.)</li> <li>- Ramasser tous les débris au sol et entre les plants et les détruire hors du vignoble (idéalement brûler)</li> </ul>
Parcelle drainée	-	+	L'humidité relative a un impact sur la production des fructifications et spores.
Gestion de l'épamprage /des relevages	-	+	L'épamprage durant la période végétative (jeunes pousses à 20-30 cm du sol) permet d'éviter les projections ('splashing') des pluies contaminatrices en bas du cep.
Vigueur du porte-greffe	+/-	++	Il est nécessaire de maîtriser la vigueur de la vigne pour contenir la propagation d'organe à organe et de cep en cep. Cela a une action aussi sur le microclimat.
Vigueur du cépage	+/-	++	
Fertilisation en azote	+	++	
Enherbement estival	-	+	

<b>Tendance au stress hydrique de la parcelle</b>	-	++	
<b>Irrigation de la parcelle</b>	+	++	
<b>Type de taille</b>	+/-	+++	Seule la taille manuelle permet de cibler les organes infectés.
<b>Espacement inter-rang</b>	+/-	++	L'espacement entre les rangs favorise l'aération des grappes et des feuilles, et retarde l'infection.
<b>Effeuilage effectué au plus tard à la nouaison</b>	-	++	L'effeuillage, le rognage et l'écimage permettent de limiter la densité du feuillage et ainsi d'augmenter l'aération des grappes et feuilles. L'ébourgeonnage permet de limiter la formation de grappe concentré au même endroit.
<b>Gestion du rognage et de l'écimage</b>	-	++	
<b>Ebourgeonnage</b>	-	+	
<b>Présence de vigne abandonnées contiguës à la parcelle</b>	+	+++	Les vignes abandonnées sont susceptibles de constituer une réserve d'inoculum.
<b>Parcelle asséchante</b>	-	+++	Une bonne aération de la parcelle peut être obtenue grâce à sa situation géographique ; son orientation au vent, son exposition au soleil, sa situation topographique

La structure hiérarchique du modèle est présentée dans la Figure 28. La sortie du modèle, la sévérité finale du black rot sur grappes à la véraison, se situe à l'échelle de la parcelle durant la saison N de développement de la vigne. Certains attributs désignent la saison précédente N-1. Les attributs historiques décrivent l'histoire du black rot sur la parcelle d'après l'expérience du viticulteur. Le modèle est composé de 46 attributs dont 29 attributs d'entrée et 17 attributs agrégés en gras. Il est décomposé en 3 sous-arbres : (i), « le niveau de risque sur grappe de la parcelle année N », (ii), « les pratiques culturales sur la parcelle année N » et (iii), « l'environnement de la parcelle ». « Le niveau de risque sur grappe de la parcelle année N » (i) combine « le niveau de risque d'inoculum historique » et « la pression annuelle sur grappe dans le vignoble ». « Les pratiques culturales sur la parcelle année N » (ii) concernent « l'efficacité des traitements contre le black rot » décomposée en 4 périodes du cycle de développement de la vigne et « l'efficacité des mesures prophylactiques » utiles contre la maladie (maîtrise de la vigueur, maîtrise de l'inoculum primaire et maîtrise de l'aération des grappes). Enfin, « l'environnement de la parcelle » (iii) associe l'attribut « Présence de vignes abandonnées contiguës à la parcelle » et l'attribut « Parcelle asséchante » (Figure 28).

Attribute	Scale
Sévérité du Black rot sur grappe dans la parcelle année N	<b>Forte</b> ; Moyenne; <i>Faible</i>
Niveau de risque sur grappe de la parcelle année N	<b>Forte</b> ; Moyenne; <i>Faible</i>
Niveau de risque d'inoculum historique	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <i>Défavorable</i>
Niveau de risque d'inoculum historique de la parcelle	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <i>Défavorable</i>
Historique de contamination sur grappe dans la parcelle	<b>Fort</b> ; <i>Faible</i> ; Moyen; <i>Pas d'historique</i>
Mise en place d'un protocole de décontamination de la parcelle	<b>Non ou pas d'historique</b> ; Rafles au sol / Rafles retirées de la parcelle / Tous les débris infectés au sol; <i>Tous les débris infectés retirés de la parcelle</i>
Historique de contamination sur grappe dans l'ilot de parcelles	<b>Oui</b> ; <i>Non ou parcelle isolée</i>
Pression annuelle sur grappe dans le vignoble	<b>Moyenne à forte</b> ; <i>Faible</i> ; <b>Nulle à forte localement</b>
Pratiques culturales sur la parcelle année N	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <i>Défavorable</i>
Efficacité des traitements contre le Black rot	<b>Faible</b> ; Moyenne; <b>Forte</b>
Pointe verte à sortie des feuilles non étalées	<b>Faible</b> ; Moyenne; <b>Forte</b>
Type de produit utilisé	<b>Aucun traitement ou PNPP et/ou produit de biocontrôle hors soufre</b> ; Soufre et/ou cuivre; <b>Produit de contact et pénétrant</b>
Type de pulvérisateur utilisé	<b>Mauvais</b> ; Moyen; <b>Bon</b>
Première feuille étalée à sortie des inflorescences	<b>Faible</b> ; Moyenne; <b>Forte</b>
Type de produit utilisé	<b>Aucun traitement ou PNPP et/ou produit de biocontrôle hors soufre</b> ; Soufre et/ou cuivre; <b>Produit de contact et pénétrant</b>
Type de pulvérisateur utilisé	<b>Mauvais</b> ; Moyen; <b>Bon</b>
Apparition des inflorescences au développement des fruits	<b>Faible</b> ; Moyenne; <b>Forte</b>
Type de produit utilisé	<b>Aucun traitement ou PNPP et/ou produit de biocontrôle hors soufre</b> ; Soufre et/ou cuivre; <b>Produit de contact et pénétrant</b>
Type de pulvérisateur utilisé	<b>Mauvais</b> ; Moyen; <b>Bon</b>
Développement des fruits jusqu'à véraison	<b>Faible</b> ; Moyenne; <b>Forte</b>
Type de produit utilisé	<b>Aucun traitement ou PNPP et/ou produit de biocontrôle hors soufre</b> ; Soufre et/ou cuivre; <b>Produit de contact et pénétrant</b>
Type de pulvérisateur utilisé	<b>Mauvais</b> ; Moyen; <b>Bon</b>
Efficacité des mesures prophylactiques	<b>Faible</b> ; Moyenne; <b>Forte</b>
Maîtrise de l'inoculum primaire	<b>Mal maîtrisée</b> ; Moyennement maîtrisée; <b>Bien maîtrisée</b>
Gestion des résidus de taille	<b>Résidus laissés au sol</b> ; <i>Résidus détruits</i> ; <i>Résidus laissés au sol sans historique</i>
Présence de zone humide dans la parcelle	<b>Oui</b> ; <b>Non</b>
Gestion de l'épamprage	<b>Peu efficace</b> ; <b>Efficace</b>
Gestion des relevages	<b>Peu efficace</b> ; <b>Efficace</b>
Maîtrise de la vigueur	<b>Mal maîtrisée</b> ; Moyennement maîtrisée; <b>Bien maîtrisée</b>
Potentiel génétique de vigueur	<b>Très vigoureux et vigoureux</b> ; Peu vigoureux; <b>Faiblement vigoureux</b>
Vigueur du porte-greffe	<b>Très vigoureux et vigoureux</b> ; Peu vigoureux; <b>Faiblement vigoureux</b>
Vigueur du cépage	<b>Très vigoureux et vigoureux</b> ; Peu vigoureux; <b>Faiblement vigoureux</b>
Fertilisation en azote	<b>Excessive</b> ; <b>Raisonnée</b>
Enherbement estival	<b>1 inter-rang sur 2 non enherbé ou totalement non enherbé</b> ; Sous le rang non enherbé et inter-rang totalement enherbé; <b>Totalement enherbé</b>
Potentiel hydrique de la parcelle	<b>Non limitant pour la vigueur</b> ; <i>Limitant pour la vigueur</i>
Tendance au stress hydrique de la parcelle	<b>Non</b> ; <b>Oui</b>
Irrigation de la parcelle	<b>Oui</b> ; <b>Non</b>
Maîtrise de l'aération des grappes	<b>Mal maîtrisée</b> ; Moyennement maîtrisée; <b>Bien maîtrisée</b>
Type de taille	<b>TRP</b> ; <b>Taille manuelle</b>
Espacement inter-rang	<b>&lt; 2 m</b> ; <b>≥ 2 m</b>
Effeillage effectué au plus tard à la nouaison	<b>Non ou jamais</b> ; <b>Oui</b>
Gestion du rognage et de l'écimage	<b>Peu efficace</b> ; <b>Efficace</b>
Ebourgeonnage	<b>Non</b> ; <b>Oui</b>
Environnement de la parcelle	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <i>Défavorable</i>
Présence de vignes abandonnées contigües à la parcelle	<b>Oui</b> ; <b>Non</b>
Parcelle asséchante	<b>Oui</b> ; <b>Non</b>

Figure 28 : Organisation du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot (structure, attributs et valeurs d'échelle). A gauche, la structure hiérarchique du modèle est présentée. Les facteurs non en gras correspondent aux attributs d'entrée saisis par l'utilisateur. Les facteurs en gras sont les attributs agrégés. A droite, les valeurs d'échelle sont présentées pour chaque attribut de IPSIM-VIGNE-Black rot. Le rouge représente la valeur favorable au développement du mildiou et nuisible au développement des grappes. Le noir représente la valeur neutre. Le vert représente la valeur défavorable pour le développement du mildiou et favorable au développement des grappes de la vigne.

## Définition des échelles

Chaque attribut agrégé et attribut d'entrée possède une échelle de valeurs qualitatives ordinales déterminées à l'aide de la bibliographie et de l'expertise. Les échelles sont directement implémentées dans le logiciel DEXi (Figure 28). L'échelle est à interpréter du point de vue de la maladie, c'est-à-dire que si l'échelle est 'Favorable' alors l'attribut est « Favorable » au développement de la maladie et donc potentiellement nuisible pour la parcelle (le code couleur associé peut aider : rouge : négatif pour la parcelle et le viticulteur et positif pour la maladie, vert : bénéfique pour la parcelle et le viticulteur et négatif pour la maladie, noir : neutre) (Figure 28). Certains attributs traduisent des valeurs quantitatives ou valeurs nominales donc il a fallu créer un convertisseur en amont pour les traduire en valeurs qualitatives ordinales. Par exemple le nom d'un cépage est converti en un niveau qualitatif de vigueur (Tableau 15).

Tableau 15 : Convertisseur pour l'attribut « Vigueur du cépage »

Cépage	Vigueur du cépage
Abondance	Très vigoureux et vigoureux
Abondant blanc	Très vigoureux et vigoureux
Abouriou noir	Peu vigoureux
Albarino	Faiblement vigoureux
Aléatico noir	Très vigoureux et vigoureux
Aligoté blanc	Peu vigoureux

## Définition des tables d'agrégation

La Tableau 16 montre la table d'agrégation de l'attribut « Niveau de risque sur grappe de la parcelle année N ». Elle regroupe les 9 combinaisons possibles entre les attributs « Niveau de risque d'inoculum historique » et « Pression historique sur grappe BSV » possédant chacun une échelle à 3 niveaux. Les situations sont étudiées ligne par ligne. Par exemple, si le « Niveau de risque d'inoculum historique » est favorable et la « Pression historique sur grappe BSV » est faible, alors l'attribut agrégé « Niveau de risque sur grappe de la parcelle année N » est fort. Une table d'agrégation est réalisée pour chacun des attributs agrégés. Au total, le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot est composé de 17 tables d'agrégation.

Tableau 16 : Table d'agrégation de l'attribut « Niveau de risque sur grappe de la parcelle année N ».

Niveau de risque d'inoculum historique	Pression annuelle sur grappe dans le vignoble	Niveau de risque sur grappe de la parcelle année N
Favorable	Moyenne à forte	Fort
Favorable	Faible	Fort
Favorable	Nulle à forte localement	Fort
Moyennement favorable	Moyenne à forte	Fort
Moyennement favorable	Faible	Moyen
Moyennement favorable	Nulle à forte localement	Moyen
Défavorable	Moyenne à forte	Moyen
Défavorable	Faible	Faible
Défavorable	Nulle à forte localement	Faible

## Poids des attributs

Le Tableau 17 détaille les poids normalisés (« local » et « global ») de chaque attribut du modèle IPSIM-Vigne-Black rot. L'attribut final « Sévérité du black rot sur grappe dans la parcelle année N » est expliqué à 52% par l'attribut agrégé « Niveau de risque sur grappe de la parcelle N », à 36% par l'attribut agrégé « Pratique culturale sur la parcelle année N » et à 12% par l'attribut agrégé « Environnement de la parcelle » (Tableau 17).

Dans l'ensemble des attributs d'entrée, ceux qui ont le plus de poids sont « Historique de contamination sur grappe dans la parcelle » (22% de la sortie du modèle 86% de l'attribut agrégé « Niveau de risque d'inoculum historique de la parcelle ») et « Pression annuelle sur grappe dans le vignoble » (15% de la sortie du modèle et 29% de l'attribut agrégé « Niveau de risque d'inoculum historique »). Certains attributs d'entrée tels que « Gestion de l'épamprage », « Gestion des relevages » dans l'attribut agrégé « Maîtrise de l'inoculum primaire », possèdent un poids global normalisé de 0%.

Tableau 17 : Poids normalisés « local » et « global » pour les attributs du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot. Les poids « local » et « global » sont exprimés en %, indiqués pour chaque attribut et distribués en 5 niveaux d'agrégation ordonnés en colonnes. Les termes gras et non gras représentent respectivement les attributs agrégés et les attributs d'entrée. Par exemple, Concernant l'attribut agrégé « niveau de risque sur grappe de la parcelle année N » est expliqué à 71% par l'attribut agrégé « Niveau de risque d'inoculum historique » et à 29% par l'attribut agrégé « Pression annuelle sur grappe dans le vignoble ». Chaque point supplémentaire en amont du nom de l'attribut correspond à un niveau inférieur au précédent.

Attributs définissant la sévérité du Black rot sur grappe dans la parcelle année N	Poids local normalisé					Poids global normalisé				
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
<b>. Niveau de risque sur grappe de la parcelle année N</b>	<b>52</b>					<b>52</b>				
.. Niveau de risque d'inoculum historique		71					37			
... Niveau de risque d'inoculum historique de la parcelle			69					26		
.... Historique de contamination sur grappe dans la parcelle				86					22	

... Mise en place d'un protocole de décontamination de la parcelle		14			4
... Historique de contamination sur grappe dans l'ilot de parcelles		31			11
.. Pression annuelle sur grappe dans le vignoble	36	29		15	
<u>Pratique culturale sur la parcelle année N</u>			36		
.. Efficacité des traitements contre le Black rot		63		23	
... Pointe verte à sortie des feuilles non étalées		38		9	
... Type de pulvérisateur utilisé		38			3
... Type de produit utilisé		63			5
... Première feuille étalée à sortie des inflorescences		26		6	
... Type de pulvérisateur utilisé		37			2
... Type de produit utilisé		63			4
... Apparition des inflorescences au développement des fruits		19		4	
... Type de pulvérisateur utilisé		37			2
... Type de produit utilisé		63			3
... Développement des fruits jusqu'à véraison		16		4	
... Type de pulvérisateur utilisé		37			1
... Type de produit utilisé		63			2
.. Efficacité des mesures prophylactiques	38			14	
... Maîtrise de l'inoculum primaire		41		5	
... Gestion des résidus de taille		75			4
... Présence de zone humide dans la parcelle		13			1
... Gestion de l'épamprage		6			0
... Gestion des relevages		6			0
... Maîtrise de la vigueur		33		5	
... Potentiel génétique de vigueur		43			2
... Vigueur du porte-greffe			57		1
... Vigueur du cépage			43		1
... Fertilisation en azote		35			2
... Enherbement estival		15			1
... Potentiel hydrique de la parcelle		6			0
... Tendence au stress hydrique de la parcelle			50		0
... Irrigation de la parcelle			50		0
... Maîtrise de l'aération des grappes		26		4	
... Type de taille		36			1
... Espacement inter-rang		32			1
... Effeuilage effectué au plus tard à la nouaison		15			1
... Gestion du rognage et de l'écimage		11			0
... Ebourgeonnage		6			0
<u>Environnement de la parcelle</u>	12			12	
.. Présence de vignes abandonnées contiguës à la parcelle		50		6	
.. Parcelle asséchante		50		6	

### 1.3.2 Evaluation du modèle

La matrice de confusion obtenue est présentée en Tableau 18 et les mesures statistiques sont résumées dans le Tableau 19. Les données modélisées correctes en vert sont en majorité (39 cas sur 82), suivi par les erreurs de modélisation avec une différence d'une classe en jaune (26 cas sur 82) et ensuite viennent les erreurs de modélisation avec une différence de deux classes en rouge (17 cas sur 82) (Tableau 18).

Tableau 18 : Matrice de confusion du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot et distribution des données. Nombres en italique : pourcentage des données sur un total de 82 données. Vert : modélisations parfaites (0 classe de différence entre données observées et données modélisées), Orange : 1 classe de différence entre données observées et données modélisées, Rouge : 2 classes de différence entre données observées et données modélisées.

		Modélisées			Total
		Faible	Moyenne	Forte	
Observées	Faible	23	18	16	57
		28	22	20	70
	Moyenne	3	3	4	10
		4	4	5	12
	Forte	1	1	13	15

		1	1	16	18
<b>Total</b>		27	22	33	<b>82</b>
		38	27	40	<b>100</b>

Les mesures statistiques (Tableau 19) confirment une précision globale de 0.4756 soit 48% de cas parfaitement modélisés. Le modèle est capable d'exprimer 32% ( $\kappa_{ow}=0.3196$ ) de la variabilité dans la base de données. Le résultat peut donc être interprété comme « passable » (« fair » en anglais) car la valeur est entre 0.21-0.40 selon McHugh (2012). D'après les notes F1, la précision et la sensibilité sont tout juste correctes pour les classes « Faible » (0.5476) et « Forte » (0.5416). La classe « Moyenne » s'approche du mauvais avec une note F1 de 0.1874.

Tableau 19 : Indicateurs statistiques d'évaluation du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot.  $\kappa_{ow}$  = Kappa de Cohen pondéré quadratiquement

<b>Général</b>	<b>Précision globale</b>	$\kappa_{ow}$			
	0,4756	0,3196			
<b>Classes</b>		<b>Sensibilité <i>r</i></b>	<b>Spécificité <i>s</i></b>	<b>Précision <i>p</i></b>	<b>Note F1</b>
	<b>Faible</b>	0,4035	0,8400	0,8518	0,5476
	<b>Moyenne</b>	0,3000	0,7361	0,1363	0,1874
	<b>Forte</b>	0,8667	0,7015	0,3939	0,5416

### 1.3.3 Développement de l'interface utilisateur

La Figure 29 présente l'interface du VBA Excel IPSIM-VIGNE Black rot. Cette interface a pu être testée lors d'un atelier avec des viticulteurs de la coopérative VINOVALIE en août 2022. L'objectif de cet atelier était de valider la facilité d'utilisation de l'interface par les viticulteurs et leur retour sur les simulations de leur propre situation. Les viticulteurs ont apprécié l'interface et n'ont pas eu de difficulté à remplir l'ensemble des attributs d'entrée. Ils ont été très intéressés par les résultats des simulations car ils étaient en accord avec ce qu'ils peuvent observer comme dégâts sur leurs parcelles.

Figure 29 : Interface utilisateur développé sous VBA

## 1.4 Discussion

### 1.4.1 Intérêts de la création de IPSIM-VIGNE-Black rot

La création du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot et son évaluation présentent de nombreux intérêts. Tout d'abord, la création du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot a permis de faire une étude bibliographique approfondie et de mobiliser des experts sous l'angle des dégâts sur grappe qui n'avait jusqu'à présent pas été effectuée pour la vigne. Cette étude bibliographique a permis d'identifier les nombreux facteurs influençant le développement du black rot sur grappes regroupés dans trois grands facteurs : les pratiques culturales, l'environnement et le niveau de risque sur grappe du black rot de la parcelle. Ensuite, le choix d'une démarche qualitative aide à appréhender un niveau de complexité élevé et le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot est évolutif car sa construction offre une grande souplesse d'adaptation. Pour finir, l'évaluation du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot a donné l'occasion de créer une base de données recensant les différents attributs d'entrée nécessaires au fonctionnement du modèle et les sévérités du black rot associées.

### 1.4.2 Validité d'IPSIM-VIGNE-Black rot

Le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot est le premier modèle IPSIM développé pour la vigne et le deuxième développé pour une culture pérenne après le pommier (Demesthas, 2017) mais le premier à être évalué avec une base de données conséquente. Ce modèle est composé de 46 attributs dont 29 attributs d'entrée et 17 attributs agrégés. Le modèle possède une précision globale de 48% de cas parfaitement modélisés et il est capable d'exprimer 32% ( $\kappa_{Qw}=0.3196$ ) de la variabilité dans la base de données. Par rapport aux précédents modèles IPSIM développés pour d'autres pathosystèmes, le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot approche à peine les plus mauvais résultats concernant la précision globale et il est très nettement en dessous par rapport au Kappa de Cohen (Tableau 20). IPSIM-VIGNE-Black rot est le premier modèle qualitatif simulant la sévérité des dégâts sur grappes du black rot sur une parcelle en prenant en compte les pratiques culturales et la situation de production (niveau de risque de développement du black rot et environnement de la parcelle). Ces résultats sont encourageants mais ils demandent d'être améliorés pour permettre une utilisation du modèle sur le terrain.

Tableau 20 : Exemple de données d'évaluation de la qualité prédictive de précédents modèles IPSIM.

Modèle	Précision globale	Kappa de Cohen pondéré quadratiquement	Nombre de données utilisées pour l'évaluation
<b>IPSIM-Wheat-Eyespot (Robin, 2014)</b>	49,5%	Non calculé	526
<b>IPSIM-Wheat-Brown Rust (Robin, 2014)</b>	88%	Non calculé	1045
<b>IPSIM-Tournesol-Phomopsis stem canker (Vedy-Zecchini, 2020)</b>	52%	36,6%	1074
<b>IPSIM-Chayote (Deguine et al., 2021)</b>	58%	79%	50
<b>IPSIM-Cirsium (Lacroix et al., 2021)</b>	78,2%	54,3%	1461

De plus, il est à noter que le modèle IPSIM-VIGNE-Black n'est valide que pour le Sud-Ouest de la France, région de collecte des données de la base de données. En effet, les données de cette base proviennent de trois vignobles du Sud-Ouest de la France : Gaillac, Fronton et Cahors.

Dans le cadre d'une nouvelle évaluation de la qualité prédictive du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot, la base de données utilisée pourrait être étoffée et améliorée. Lors de l'évaluation de la qualité prédictive du modèle, la base de données était composée de 82 données avec une surreprésentation de l'année 2021 qui apporte un déséquilibre dans la base de données. Cela s'explique par le fait que la majorité des données collectées pour l'évaluation l'ont été au travers du projet VITI OBS et que lors de l'évaluation certaines données étaient manquantes pour 2022. La taille de la base de données n'est pas la plus petite utilisée dans le cadre de l'évaluation de la qualité prédictive d'un modèle IPSIM. En effet, 50 données ont été respectivement utilisées pour évaluer le modèle IPSIM-chayote (Deguine et al., 2021). Cependant, d'autres modèles IPSIM ont été évalués avec des bases de données plus étoffées avec respectivement 526 données pour IPSIM-Wheat-Eyespot (Robin et al., 2013) et 1461 données pour IPSIM-Cirsium (Lacroix et al., 2021). En augmentant la taille de la base de données, il sera intéressant d'améliorer la diversité de la base de données. En effet, il faudrait avoir un grand nombre de données rassemblant de nombreux sites et années avec une grande diversité de pratiques culturales, de pédoclimats et de niveau de sévérité de black rot. L'interprétation des résultats pourrait alors être plus fine (Donatelli et al., 2017). La base de données pourrait être étoffée en incorporant les nouvelles données issues du projet VITI OBS et l'ensemble des données issues du projet DEPHY EXPE ECOVITI réparties dans 6 régions viticoles françaises.

### 1.4.3 Les limites d'IPSIM-VIGNE-Black rot

Comme évoqué précédemment, le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot n'est pas opérationnel pour être utilisé en atelier de co-conception ou pour évaluer des systèmes de culture car sa qualité prédictive n'est pas suffisante. Une amélioration du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot mérite d'être réalisée à différents niveaux pour affiner les résultats statistiques. Tout d'abord, des améliorations peuvent être effectuées sur le modèle sans pour autant changer l'arborescence qui semble permettre de décrire avec justesse la complexité de l'agroécosystème incluant le black rot et de couvrir de nombreuses situations même si la base de données est en majorité composée de données de vignobles du Sud-Ouest de la France.

Un des choix forts qui a été fait dans la construction du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot est de ne pas prendre en compte les données climatiques pour simuler le développement du black rot comme cela est fait dans les différents modèles épidémiologiques. Ce choix ne se justifie pas techniquement mais plutôt de manière opérationnelle. Nous aurions pu utiliser un modèle épidémiologique pour estimer le risque de développement du black rot mais en France, il n'y en a pas un qui a été évalué et qui est utilisé en routine. Il aurait fallu en amont le valider pour les cas d'études de notre base de données. Le choix a été d'utiliser les bulletins de santé du végétal pour caractériser indirectement la présence du black rot sur les vignobles. Une amélioration structurelle du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot serait d'utiliser un modèle existant comme le modèle développé par Rossi et al. (2014) pour caractériser le risque de développement du black rot lié aux conditions climatiques. Une simulation des 10 dernières années pourrait être effectuée pour définir un risque moyen à l'échelle d'un vignoble. Cette modification est dépendante de la possibilité d'utiliser ce modèle ce qui n'est pas aujourd'hui envisagé car une valorisation commerciale de ce dernier est en train d'être réalisée au travers d'un outil d'aide à la décision.

Dès à présent, un travail de révision des tables d'agrégation pourrait être réalisé pour améliorer la qualité de prédiction. Par exemple, une mauvaise pondération entre l'historique sanitaire et l'influence des pratiques culturales peut être à l'origine des nombreuses erreurs de modélisation, notamment pour les cas 'Faible'. Par exemple, un poids important est donné à la qualité du pulvérisateur et aux traitements précoces concernant l'attribut « Pointe verte à sortie des feuilles non étalées » mais son importance dans les situations sans historique ou à faible pression est moindre (observation terrain 2022 et 2023) ce qui est aujourd'hui mal simulé. Dans ces cas, il est admis qu'aucun inoculum primaire n'est présent dans la parcelle en année N donc les pratiques n'ont pas l'obligation d'être drastiques pour arriver à une faible sévérité.

L'attribut final du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot « Sévérité du black rot sur grappe dans la parcelle année N » possède une échelle à trois niveaux qui ont été définis lors des ateliers d'experts pour se rapprocher de la demande des viticulteurs. L'ajout de deux niveaux supplémentaires comme réalisé dans le cas du modèle IPSIM-Cirsium (Lacroix et al., 2021) et IPSIM-Wheat-Brown Rust (Robin, 2014) pourrait être envisagé. Cela permettrait de mieux discriminer les différentes situations rencontrées et d'améliorer la représentativité de la modélisation du modèle.

#### 1.4.4 Perspectives d'utilisation du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot

##### Un outil pour une évaluation *ex-ante* et *ex-post* de la sévérité du black rot sur grappe

IPSIM-VIGNE-Black rot pourrait être utilisé pour évaluer *ex-ante* différents systèmes de culture sur leur gestion du black rot. En effet, ce modèle donne une sévérité d'attaque du black rot sur grappe qui pourrait servir d'indicateur pour les viticulteurs, les conseillers ou pour des systèmes expérimentaux moins dépendants des fongicides. Pour les viticulteurs, le risque d'attaque sur grappe est une information essentielle car l'impact des dégâts de black rot sur grappes peut être très important sur le rendement final. Cette information leur permettrait d'adapter leur itinéraire cultural à leur situation de production qui limiterait le risque de dégâts et donc la perte de récolte. De plus, une partie conséquente du modèle est consacrée aux mesures prophylactiques ayant un effet sur le développement du black rot et donc qui peuvent permettre de réduire le recours aux pesticides. Le modèle peut être utilisé comme un outil de sensibilisation des viticulteurs sur ces bonnes pratiques. Il pourrait être mobilisé lors d'ateliers de co-conception pour assister l'activité de conception pour explorer et évaluer de nombreux prototypes (Bergez et al., 2010). IPSIM-VIGNE-Black rot pourrait être utilisé pour réaliser une évaluation *ex-post* des systèmes de culture actuels expérimentaux ou en

production. Cette évaluation permettrait d'identifier les forces et les faiblesses de ces systèmes en déterminant des combinaisons de facteurs qui réduisent la présence de black rot.

IPSIM-VIGNE-Black rot peut donc être un outil important dans le processus de conception/reconception de système et dans la boucle d'amélioration des pratiques pour contrôler le black rot pour les viticulteurs et les conseillers.

Pour faciliter la prise en main de l'outil par les viticulteurs, une interface utilisateur a déjà été réalisée. Cette interface pourrait être optimisée en ajoutant des abaques photos pour illustrer les échelles. Cela limiterait l'objectivité des réponses et rendrait l'interaction avec l'outil plus intuitive. Par exemple, l'attribut "gestion de l'épamprage" possède une échelle peu efficace ou efficace donc deux photos discriminant ces deux situations pourraient être proposées à l'utilisateur pour l'aider à effectuer son choix. L'expérience utilisateur pourrait par la suite être améliorée grâce à la création d'un site internet ce qui a été effectué dans le cadre d'IPSIM-chayote (Deguine et al., 2021) et d'IPSIM-Cirsium (Lacroix et al., 2021).

### Une combinaison avec d'autres modèles IPSIM sur les maladies de la vigne pour créer IPSIM-VIGNE

IPSIM-VIGNE-Black rot a été développé spécifiquement pour la sévérité d'attaque du black rot sur grappe en fonction des pratiques culturales, du climat et de l'environnement d'une parcelle. Cependant, le black rot n'est pas la seule maladie pouvant engendrer des dégâts sur les grappes. En effet, trois autres maladies (mildiou, oïdium et botrytis) sont régulièrement responsables de ces dégâts. Actuellement, deux autres modèles ont été développés pour le mildiou et pour l'oïdium. Pour comprendre les dégâts sur les grappes, la combinaison de ces trois modèles qualitatifs en un seul modèle IPSIM-VIGNE pour représenter un profil de dégâts serait une approche intéressante. Cette approche a été explorée pour la première fois dans l'évaluation de la sévérité des bioagresseurs du blé (Aubertot & Robin, 2013). Néanmoins, pour réaliser cette approche intégrée, il faut connaître les interactions entre les maladies et ces connaissances sont très peu renseignées. En effet, les trois maladies peuvent bénéficier, souffrir ou ne pas être impactées par la présence des autres maladies.

### Une intégration avec d'autres modèles comme le modèle DexiPM Vigne

Le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot pourrait être intégré dans d'autres modèles concernant la vigne. Il permet de simuler la sévérité de dégâts sur les grappes de la vigne. Pour un viticulteur, l'information de la perte de rendement associée serait une information encore plus intéressante. Pour permettre la connaissance de cette information, il faudrait coupler le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot a un modèle de dommages qui n'existe pas actuellement. Par contre, le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot pourrait être intégré dans le modèle DexiPM Vigne. Ce modèle est un outil d'évaluation multicritères de la durabilité des systèmes viticoles (Dubuc et al., 2015). Un des critères pris en compte est le risque de pertes dues aux bioagresseurs. Ce critère estime le risque de pertes de rendement dues à la pression des bioagresseurs (maladies et ravageurs) au regard des pratiques mises en œuvre pour les contrôler (Dubuc et al., 2015). Cette estimation simplificatrice pourrait être remplacée par l'estimation des dégâts donnée par le modèle IPSIM-VIGNE.

## 1.5 Conclusion

La culture de la vigne est l'une des cultures les plus consommatrices de pesticides en France. Malgré cet usage, des problématiques liées aux dégâts des maladies comme le black rot ont lieu chaque année. La modélisation est une discipline qui est en cours de développement dans les vignobles mais elle ne reste qu'au niveau de la modélisation épidémiologique des épisodes climatiques à risque de

contamination par les maladies. Aujourd'hui, la réduction de l'utilisation des pesticides demande une réflexion globale des systèmes à mettre en place dans le vignoble. L'approche IPSIM permet de répondre à ce besoin. Le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot est le premier modèle qualitatif développé concernant les dégâts sur les grappes de la vigne. La première évaluation est encourageante (une précision globale de 48% et un kappa de Cohen de 0.32) et des modifications identifiées sont prévues pour améliorer sa qualité prédictive dans le futur. Il servira de base au développement d'autres modèles IPSIM pour les autres maladies de la vigne.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des participants à l'atelier pour la construction du modèle IPSIM-VIGNE-Black rot. Les auteurs remercient également l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) et le projet VITI OBS financé par la Région Occitanie pour leur soutien à cette étude.

## 2. Les autres modèles développés dans le cadre de la thèse

IPSIM-VIGNE-Black rot a été le premier sous-modèle développé et évalué concernant la vigne (2021-2022). Il constituera un module du modèle IPSIM-VIGNE, modèle qui pourra à l'avenir prédire le profil de dégâts des bioagresseurs (maladies et ravageurs) sur les grappes de la vigne en fonction des pratiques culturales et de l'environnement biotique et abiotique de la parcelle considérée. Afin de représenter le profil complet des principaux dégâts sur les grappes de la vigne, il est nécessaire de concevoir l'ensemble des sous-modèles, un pour chacune des principales maladies de la vigne en mobilisant la structure IPSIM. Dans le cadre de la thèse, deux autres modèles ont été développés : IPSIM-VIGNE-Mildiou et IPSIM-VIGNE-Oïdium. Dans cette prochaine sous-partie, une description de l'avancée du travail concernant ces différents sous-modèles est effectuée. Cette construction a été soutenue par deux stagiaires : Xiao WANG (Wang, 2021) et Aminata KEBE (Kebe, 2023).

### 2.1 IPSIM-VIGNE-Mildiou : construction et évaluation

IPSIM-VIGNE-Mildiou a été construit et l'évaluation de la qualité prédictive de la première version a été réalisée dans le cadre de cette thèse. Le développement de ce modèle est présenté dans la partie suivante.

#### 2.1.1 Effets des pratiques culturales, du climat et de l'environnement de la parcelle sur le développement du mildiou, les 3 entrées du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou

Le développement biologique de *Plasmopore Viticola* (*P.viticola*) au cours de l'année dépend de nombreux paramètres environnementaux. En effet, le développement du mildiou est favorisé par tous les facteurs qui contribuent à augmenter la teneur en eau du sol, de l'air et de la plante comme la pluviométrie et l'humectation du feuillage (Ronzon, 1987) mais aussi par d'autres facteurs. L'ensemble de ces facteurs peuvent ainsi être classés principalement en 3 groupes : les facteurs climatiques, les pratiques culturales et l'environnement de la parcelle. Dans le cas du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou, l'effet du climat est remplacé par le Niveau de risque de Mildiou (Figure 30).

#### Niveau de risque du Mildiou

Le climat est un facteur clé dans le développement du mildiou. La pluie est un facteur épidémiologique majeur et est indispensable à la survie du champignon à toutes les étapes de son cycle. Elle participe à sa dispersion et donc à son envahissement de même que l'hygrométrie (Dubos, 2002). Les brouillards ont un rôle aggravant dans le développement du mildiou (Goulet et al., 2006). La température, avec son rôle modulateur, freine ou accélère le développement de la maladie. En effet, la durée d'incubation et de germination du mildiou sont influencées par la température (Dubos, 2002).

Il a été difficile de prendre en compte le climat au travers des facteurs climatiques précédemment cités. Le choix a été fait de caractériser la pression du mildiou du vignoble de l'année en utilisant les bulletins de santé du végétal bilan édité à la fin de chaque millésime (par exemple Carretier (2023)). Pour rajouter une couche parcellaire, l'historique de contamination de la parcelle l'année antérieure a été pris en compte. Il peut renseigner sur la réserve d'inoculum présente sur la parcelle. Suivant l'intensité de la maladie l'année précédente, le stock d'oospores peut varier entre 30 000 et 50 000 Oospores par m<sup>2</sup> de sol (Rossi et al., 2009).

## Effet des pratiques culturales sur l'année N

L'évolution du mildiou dans la parcelle est fortement liée aux pratiques culturales mises en place. Elle est souvent associée ici à deux facteurs principaux : l'efficacité des mesures prophylactiques et l'efficacité de la stratégie de traitement contre le mildiou.

### *Mesures prophylactiques*

Il s'agit de toutes les pratiques culturales qui permettent de réduire l'apparition, mais également la propagation et l'aggravation d'un bioagresseur. Ces mesures peuvent avoir une action directe sur la réserve d'inoculum, l'aération des grappes et la sensibilité/réceptivité de la vigne. En effet, une mauvaise gestion des résidus de feuilles mortes en hiver (non enfouissement) augmente les risques d'apparition du mildiou dans la parcelle (Carisse, 2009). En outre, une mauvaise gestion du relevage/palissage et de l'épamprage augmente l'accessibilité du mildiou à la vigne (Salaun & Bourdet, 2021). Les jeunes pousses à 20-30 cm du sol favorisent les projections (« splashing ») des pluies contaminatrices en bas du cep (Salaun & Bourdet, 2021). En effet, ce sont les organes jeunes, en croissance active, qui sont les plus sensibles (Ronzon, 1987). L'arrivée à maturité des oospores est d'autant plus précoce que l'humidité du sol est forte et que les températures sont douces. Ainsi un mauvais drainage, occasionnant des sorties d'eau (mouillères) dans la parcelle, favorise le développement du mildiou (Dubos, 2002). Un microclimat aéré grâce à certaines pratiques (l'écimage, le rognage, l'effeuillage, l'ébourgeonnage) limite le développement des maladies cryptogamiques en baissant l'humidité dans la zone des grappes (Chambres d'agriculture Auvergne- Rhône-Alpes/Occitanie/Corse/Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2022). En même temps, elles offrent une meilleure pénétration des traitements (Carisse, 2009). Il a été aussi constaté que les vignes peu vigoureuses sont beaucoup moins sensibles au mildiou (Salaun & Bourdet, 2021). La maîtrise de la vigueur débute dès la plantation en adaptant le porte-greffe, le cépage et le clone et se poursuit lors de la conduite de la vigne en adaptant les pratiques culturales comme l'enherbement, la fertilisation et l'irrigation (IFV et al., 2024).

### *Programme de traitement du mildiou*

L'efficacité de la stratégie de traitement est un facteur essentiel dans la lutte contre le mildiou. En effet, elle est principalement liée à la combinaison du type de produit utilisé et la qualité de pulvérisation. Les types de produits différents selon leur mode d'action dans la plante (systémique, pénétrant et contact) et leur efficacité intrinsèque vis-à-vis du mildiou. Concernant la qualité de pulvérisation, il existe une différence entre les types de pulvérisateurs (aéroconvecteur, appareil face par face, voûte pneumatique, panneau récupérateur) (Auvergne et al., 2017). De plus, le réglage du pulvérisateur est important car peu importe le type de pulvérisateur, un réglage inadapté (mauvais débit de pulvérisation, mauvais choix de buse ...) du pulvérisateur impactera négativement la qualité de pulvérisation (Codis et al., 2016).

## Effet de l'environnement de la parcelle

L'environnement de la parcelle joue aussi un rôle important sur le risque d'apparition et de développement du mildiou. L'aération de la parcelle est un facteur clé du développement du mildiou, pouvant être fortement réduit par une bonne aération de la parcelle (A. Jacquet & Morlat, 1997). L'aération de la parcelle peut être obtenue grâce à son orientation au vent, son exposition au soleil, sa situation topographique. La présence de vignes abandonnées aux alentours de la parcelle est aussi susceptible de constituer une aggravation des épidémies de mildiou en étant des foyers selon les experts interrogés.

## 2.1.3 Construction du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou

### Identification et organisation des attributs

La recherche bibliographique a permis de sélectionner 36 principaux facteurs impliqués (directement ou indirectement) dans le développement du mildiou. L'attribut de sortie de notre modèle est la « Sévérité du Mildiou sur Grappes année N ».

Comme évoqué précédemment, les facteurs climatiques n'ont pas pu être pris en compte directement lors de la définition des attributs. La modélisation de l'ensemble de ces facteurs est compliquée. Nous avons finalement décidé de le substituer avec l'attribut agrégé « Niveau de risque du Mildiou » qui aura comme attribut de base : « Pression biotique sur grappes dans le vignoble année N » et Historique de contamination sur feuilles en fin de saison N-1 ». L'attribut « Pression biotique sur grappes dans le vignoble année N » est renseigné en utilisant les BSV bilan viticulture. Les BSV sont des documents qui résument la situation épidémiologique décrite par les modèles et les seuils de risque, mis à la disposition de tous les acteurs gratuitement sur les sites internet des chambres régionales d'agriculture tout au long de la campagne. Une version bilan est éditée à la fin de la campagne pour effectuer un bilan épidémiologique par bioagresseur à l'échelle du vignoble (Carretier, 2023). Dans cette version bilan, le résultat du développement du mildiou sur les parcelles témoins est utilisé pour caractériser la pression du millésime à l'échelle du vignoble. L'attribut de base « Historique de contamination sur feuilles en fin de saison N-1 » est renseigné par les viticulteurs selon l'historique sur leur parcelle lors de l'année précédente.

L'implémentation de notre modèle dans DEXi a permis d'obtenir la structure hiérarchique d'IPSIM-VIGNE-Mildiou illustrée à la Figure 30. Il est constitué de 28 attributs de base et de 14 attributs agrégés et un attribut de sortie avec à chaque fois, la définition des différentes échelles attribuées à chaque attribut du modèle.

Attribut	Scale
<b>Sévérité du Mildiou sur Grappes année N</b>	<b>Forte; Moyenne; Faible; Nulle</b>
<b>Niveau de risque du Mildiou</b>	<b>Fort; Moyen; Faible; Nul</b>
-Pression biotique sur grappes dans le vignoble année N	<b>Forte; Moyenne; Faible; Nulle</b>
-Historique de contamination sur feuilles en fin de saison N-1	<b>Forte; Moyenne; Faible; Nulle</b>
<b>Pratiques culturales sur la parcelle année N</b>	<b>Favorable; Moyennement favorable; Défavorable</b>
<b>Efficacité de la stratégie de traitements contre le mildiou</b>	<b>Faible; Moyenne; Forte</b>
<b>Efficacité du contrôle de l' inoculum primaire (stage premieres feuilles =&gt;sortie inflorescences)</b>	<b>Faible; Moyenne; Forte</b>
-Type de produit majoritairement utilisé P1	<b>Pas efficace; Efficace; Très Efficace</b>
-Type de pulvérisateur utilisé P1	<b>Mauvais; Moyen; Bon</b>
<b>Efficacité du contrôle de l'inoculum secondaire (floraison jusqu'à la fin du développement des grappes)</b>	<b>Faible; Moyenne; Forte</b>
-Type de produit majoritairement utilisé P2	<b>Pas efficace; Efficace; Très Efficace</b>
-Type de pulvérisateur utilisé P2	<b>Mauvais; Moyen; Bon</b>
<b>Efficacité du contrôle de l' inoculum secondaire (Début véraison jusqu'à fin des traitements)</b>	<b>Faible; Moyenne; Forte</b>
-Type de produit majoritairement utilisé P3	<b>Pas efficace; Efficace; Très Efficace</b>
-Type de pulvérisateur utilisé P3	<b>Mauvais; Moyen; Bon</b>
-Respect de la gestion des résistances	<b>Non; Oui</b>
<b>Efficacité des mesures prophylactiques</b>	<b>Faible; Moyenne; Forte</b>
<b>Gestion de l' inoculum primaire</b>	<b>Mal maîtrisée; Moyennement maîtrisée; Bien maîtrisée</b>
-Gestion de l'épamprage	<b>Peu efficace; Efficace</b>
-Gestion des relevages/palissage	<b>Peu efficace; Efficace</b>
-Élimination des feuilles mortes N-1	<b>Non; Oui ou pas d'historique</b>
-Présence de zone humide dans la parcelle	<b>oui; non</b>
<b>Contrôle de la vigueur</b>	<b>Mal maîtrisée; Moyennement maîtrisée; Bien maîtrisée</b>
<b>Potentiel génétique de vigueur</b>	<b>Forto vigueur; Vigueur Moyenne; Faible vigueur</b>
-Vigueur du porte-greffe	<b>Forto vigueur; Vigueur Moyenne; Faible vigueur</b>
-Vigueur du cépage	<b>Forto vigueur; Vigueur Moyenne; Faible vigueur</b>
<b>Disponibilité de l'azote</b>	<b>Forte; Moyenne; Faible</b>
-Type de sol	<b>Fertile; Peu fertile; Pas fertile</b>
-Fertilisation	<b>oui; non</b>
-Enherbement estival	<b>1 inter-rang sur 2 non enherbé ou totalement non enherbé; Sous le rang non enherbé et inter-rang totalement enherbé; Totalement enherbé</b>
<b>Disponibilité en eau</b>	<b>Forte; Moyenne; Faible</b>
-Tendance au stress hydrique du sol	<b>Non; Oui</b>
-Parcelle irriguée	<b>Oui; Non</b>
<b>Maîtrise de l'aération des grappes</b>	<b>Mal maîtrisée; Moyennement maîtrisée; Bien maîtrisée</b>
-Type de taille	<b>TRP; Taille manuelle</b>
-Espacement inter-rang	<b>Insuffisant; Suffisant</b>
-Effeuillage effectué au plus tard à la nouaison	<b>Non ou jamais; Oui</b>
-Gestion du rognage et de l'écimage	<b>Peu efficace; Efficace</b>
-Ebourgeonnage	<b>Non; Oui</b>
<b>Environnement de la parcelle</b>	<b>Favorable; Moyennement favorable; Défavorable</b>
-Parcelle asséchante	<b>Non; Oui</b>
-Présence de vignes abandonnées contiguës à la parcelle	<b>Oui; Non</b>

Figure 30 : Organisation du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou (structure, attributs et valeurs d'échelle). A gauche, la structure hiérarchique du modèle est présentée. Les facteurs non en gras correspondent aux attributs d'entrée saisis par l'utilisateur. Les facteurs en gras sont les attributs agrégés. A droite, les valeurs d'échelle sont présentées pour chaque attribut de IPSIM-VIGNE-Mildiou. Le rouge

représente la valeur favorable au développement du mildiou et nuisible au développement des grappes. Le noir représente la valeur neutre. Le vert représente la valeur défavorable pour le développement du mildiou et favorable au développement des grappes de la vigne.

### Définition des échelles

L'échelle est à interpréter du point de vue de la maladie, c'est-à-dire que si l'échelle est « Favorable » alors l'attribut est « Favorable » au développement de la maladie et donc potentiellement nuisible pour la parcelle (le code couleur associé peut aider : rouge : négatif pour la parcelle et positif pour la maladie, vert : bénéfique pour la parcelle et négatif pour la maladie, noir : neutre). Dans ce modèle, il y a au maximum une échelle à 4 valeurs d'échelle pour les attributs d'entrée et les attributs agrégés (Figure 30).

La sévérité du mildiou sur grappe dans la parcelle peut prendre la valeur suivante : faible/nulle (0-1%), moyenne (1-5%) et forte (>5%). Ces valeurs ont été définies en concertation avec le service technique et des viticulteurs de la coopérative VINOVALIE. Au-delà de 5% d'intensité d'attaque, l'attaque est forte selon les viticulteurs.

Dans le cas où la valeur de l'attribut est quantitative, un convertisseur de valeurs quantitatives en valeurs qualitatives a été créé. Par exemple, l'attribut d'entrée « l'espacement inter-rang » est une valeur quantitative. Il a fallu convertir cette distance quantitative en valeur qualitative. En convertissant l'échelle, les attributs prendront soit la valeur « Défavorable » pour un espace inter-rang supérieur à 2m qui est considéré comme défavorable au développement du mildiou ou « Favorable » pour un espace inter-rang inférieur à 2m qui est favorable (Tableau 21).

Tableau 21 : Exemple de convertisseur concernant l'attribut « Espacement inter-rang » du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou.

Espace inter-rang	Valeur de l'échelle
< 2m	Favorable
>= 2m	Défavorable

### Définition des tables d'agrégation

Au total, 15 tables d'agrégation sont présentes dans le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou. Le Tableau 22 illustre la table d'agrégation de l'attribut « Efficacité du contrôle de l'inoculum primaire ». Par exemple, si le type de produit majoritairement utilisé n'est pas efficace et si le type de pulvérisateur utilisé est mauvais alors l'efficacité du contrôle de l'inoculum primaire est faible.

Tableau 22 : Table d'agrégation de l'attribut « Efficacité du contrôle de l'inoculum primaire ».

Type de produit majoritairement utilisé P1	Type de pulvérisateur utilisé P1	Efficacité du contrôle de l'inoculum primaire
1 Pas efficace	Mauvais	Faible
2 Pas efficace	Moyen	Faible
3 Pas efficace	Bon	Faible
4 Efficace	Mauvais	Faible
5 Efficace	Moyen	Moyenne
5 Efficace	Bon	Forte
7 Très Efficace	Mauvais	Moyenne
3 Très Efficace	Moyen	Forte
3 Très Efficace	Bon	Forte

## Poids des attributs

Le Tableau 23 montre les différents poids (les poids locaux et globaux, normalisés ou non) des différents attributs du modèle calculés automatiquement par DEXi suite aux différentes tables d'agrégations établies. Les poids normalisés, sur lesquels l'analyse de notre modèle reposera, sont calculés en normalisant toutes les échelles à l'intervalle unitaire, excluant ainsi l'effet des échelles ayant un nombre différent de valeurs. La somme des poids globaux de tous les attributs d'entrée dans le modèle est également de 100%. L'attribut final « Sévérité du mildiou sur grappes année N » est expliqué à 64% par l'attribut agrégé « Niveau de risque du mildiou », à 23% par l'attribut agrégé « Pratiques culturales sur la parcelle année N » et à 13% par l'attribut agrégé « Environnement de la parcelle ».

Les résultats des poids globaux calculés par DEXi sont la suite logique de notre raisonnement qui a été fait lors de la construction des tables d'agrégations. En effet, selon la bibliographie et l'expertise, le niveau de pression de *P.viticola* (nombre de cycles de reproduction) dépend en grande partie des conditions climatiques (Ronzon, 1987). Or, ici dans les simulations, les données de l'attribut d'entrée « Pression biotique sur grappes dans le vignoble année N » sont celles recueillies sur les parcelles témoins du vignoble. Sur ces parcelles, aucune intervention culturale n'est effectuée. La pression biotique dépend des conditions climatiques de l'année correspondante. Ainsi, en agrégeant, la priorité a été donnée à cet attribut qui sort avec 71% sur l'attribut ascendant « Niveau de risque du Mildiou ».

Concernant les pratiques culturales, en termes de poids local normalisés, l'efficacité de la stratégie de traitement a une plus grande importance (75%) que celle des mesures prophylactiques (25%). La prophylaxie réduit juste les risques d'apparition et de développement mais les traitements ont le rôle de protection préventive pour la vigne. Le contrôle de l'inoculum secondaire (stade floraison jusqu'à développement des grappes) est le plus important (35%) des trois contrôles étant donné que la sortie du modèle est la sévérité du mildiou sur grappes. Justement, ce traitement se produit durant la formation et le développement des grappes, stade durant lequel les dégâts sont plus préjudiciables. Un mauvais contrôle du mildiou durant la véraison jusqu'à la récolte a moins de conséquence (11%) étant donné que la sensibilité des baies s'arrête à la véraison (Kennelly et al., 2005). Il a été considéré que même si les traitements ont été bien faits (bon produit avec le bon pulvérisateur) mais que la gestion des résistances n'a pas été respectée, l'efficacité des traitements est fragilisée d'où le poids accordé à cet attribut (29%). Par rapport aux mesures prophylactiques, le contrôle de la vigueur est plus impactant (42%) car la sensibilité de la vigne est fortement liée à la vigueur du cépage (Dubos, 2002). Ainsi une vigueur bien maîtrisée, rend la vigne moins sensible au mildiou. L'aération des grappes (33%) joue aussi un rôle non négligeable dans la sévérité du mildiou en diminuant l'hygrométrie du microclimat des grappes. Parmi les facteurs expliquant l'effet de l'environnement de la parcelle, plus d'importance a été donnée à l'attribut « Parcelle asséchante » (75%) car l'hygrométrie, facteur clé du développement du mildiou peut être fortement réduite selon la situation de la parcelle (A. Jacquet & Morlat, 1997).

Tableau 23 : Poids normalisés « local » et « global » pour les attributs du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou. Les poids « local » et « global » sont exprimés en %, indiqués pour chaque attribut et distribués en 5 niveaux d'agrégation ordonnés en colonnes. Les termes gras et non gras représentent respectivement les attributs agrégés et les attributs d'entrée. Chaque point supplémentaire en amont du nom de l'attribut correspond à un niveau inférieur au précédent.

Attributs définissant la sévérité du mildiou sur grappes année N dans la parcelle	Poids local normalisé					Poids global normalisé				
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
<b><u>Niveau de risque du Mildiou</u></b>	<b>64</b>					<b>64</b>				
.. Pression biotiques sur grappes dans le vignoble année N		71					45			
.. Historique de contamination sur feuilles en fin de saison N-1		29					18			
<b><u>Pratiques culturales sur la parcelle année N</u></b>	<b>23</b>	<b>75</b>				<b>23</b>	<b>18</b>			
.. Efficacité de la stratégie de traitements contre le mildiou										
... Efficacité du contrôle de l'inoculum primaire (jusqu'à la floraison)			24					4		
.... Type de produit majoritairement utilisé P1				63					3	
.... Type de pulvérisateur utilisé P1				37					2	
... Efficacité du contrôle de l'inoculum secondaire (floraison-véraison)			35					6		
.... Type de produit majoritairement utilisé P2				63					4	
.... Type de pulvérisateur utilisé P2				37					2	
... Efficacité du contrôle de l'inoculum secondaire (après la véraison)			11					2		
.... Type de produit majoritairement utilisé P3				63					1	
.... Type de pulvérisateur utilisé P3				37					1	
.. Respect de la gestion des résistances			29					5		
.. Efficacité des mesures prophylactiques		25					6			
... Maîtrise de l'inoculum primaire			25					1		
.... Gestion des résidus de taille				25					0	
.... Présence de zone humide dans la parcelle				25					0	
.... Gestion de l'épamprage				25					0	
.... Gestion des relevages				25					0	
... Contrôle de la vigueur			42					2		
.... Potentiel génétique de vigueur				32					0	
.... Vigueur du porte-greffe					57					0
.... Vigueur du cépage					43					0
.... Disponibilité de l'azote				34				1		
.... Type de sol					50					0
.... Fertilisation					50					0
.... Enherbement estival				22				1		
.... Disponibilité en eau				12				0		
.... Tendance au stress hydrique de la parcelle					50					0
.... Irrigation de la parcelle					50					0
.. Maîtrise de l'aération des grappes			33					2		
.... Type de taille				31					1	
.... Espacement inter-rang				27					1	
.... Effeillage effectué au plus tard à la nouaison				15					0	
.... Gestion du rognage et de l'écimage				15					0	
... Ebourgeonnage				12					0	
<b><u>Environnement de la parcelle</u></b>	<b>13</b>					<b>13</b>				
.. Parcelle asséchante		75					10			
.. Présence de vignes abandonnées contigües à la parcelle		25					3			

## 2.1.4 Résultats de l'évaluation du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou

Globalement, les cas « Faible » de sévérité des dégâts sur grappes dominent dans la base de données (Figure 31). En effet, 88% des cas sont faibles sur le total des données dans la matrice de confusion (Figure 31). Les cas de sévérité « Moyenne » et « Forte » représentent respectivement 5% et 7% dans cette base de données. Une prédominance des années 2021 et 2022 est à signaler. Cela correspond aux données provenant de la mise en place des stratégies de protection du vignoble dans le cadre de la thèse.

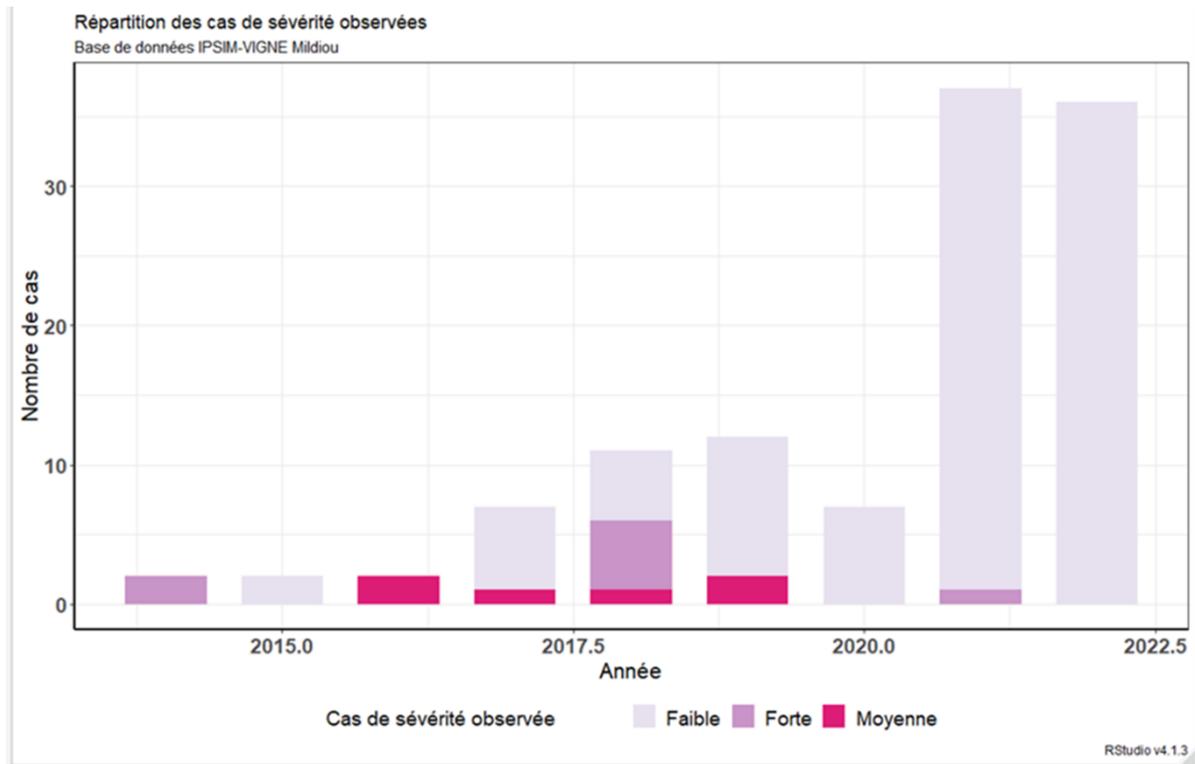


Figure 31 : Répartition des données composant la base de données utilisée pour l'évaluation du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou selon la sévérité observée et l'année d'observation.

La matrice de confusion est présentée dans le Tableau 24. L'évaluation statistique du modèle est plutôt satisfaisante. Ceci étant confirmé par une précision globale de presque 65% de cas parfaitement modélisés. Par ailleurs, le modèle n'est capable d'exprimer que 27% ( $\kappa_{QW}=0.271$ ) de la variabilité dans la base de données. Ce pourcentage est considéré comme « Faible » (McHugh, 2012) remettant ainsi en question la qualité de la base de données utilisée (Tableau 25). Les classes « Faible » et « forte », possèdent une note-F1 moyenne tandis que la classe « Moyenne » possède une note-F1 très faible (Tableau 25).

Tableau 24 : Matrice de confusion du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou et distribution des données. Nombre en italiques : pourcentage des données sur un total de 116 données. Vert : modélisations parfaites (0 classe de différence entre données observées et données modélisées), Orange : 1 classe de différence entre données observées et données modélisées, Rouge : 2 classes de différence entre données observées et données modélisées.

		Modélisées			Total
		Faible	Moyenne	Forte	
Observées	Faible	65	14	23	102
		<i>56</i>	<i>12</i>	<i>20</i>	<i>88</i>
	Moyenne	0	4	2	6
		<i>0</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>5</i>
	Forte	0	2	6	8
		<i>0</i>	<i>2</i>	<i>5</i>	<i>7</i>
Total		65	20	31	116
		<i>56</i>	<i>17</i>	<i>27</i>	<i>100</i>

Tableau 25 : Mesures statistiques pour évaluer le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou.  $\kappa_{Qw}$  = Kappa de Cohen pondéré quadratiquement.

Général	Précision globale	$\kappa_{Qw}$			
	0,646	0,271			
Classes		Sensibilité r	Spécificité	Précision p	Note F1
	Faible	0,4035	0,8400	0,8518	0,5476
	Moyenne	0,3000	0,7361	0,1363	0,1874
	Forte	0,8667	0,7015	0,3939	0,5416

## 2.1.5 Discussion

### Intérêt et validité d'IPSIM-VIGNE-Mildiou

La création du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou a permis d'effectuer une importante étude bibliographique des facteurs influençant le développement du mildiou et impactant les dégâts sur les grappes de la vigne. Ensuite, la mise en relation de ces facteurs au travers de l'arborescence du modèle et une hiérarchisation de ces facteurs au travers de la pondération d'IPSIM a été effectuée. Ces deux tâches n'avaient jusque-là pas été réalisées. IPSIM-VIGNE-Mildiou est le premier modèle qualitatif simulant la sévérité des dégâts sur grappes du mildiou sur une parcelle en prenant en compte les pratiques culturales et la situation de production (niveau de risque de développement du mildiou et

environnement). Le modèle possède une précision globale de 64,6% de cas parfaitement modélisés et il est capable d'exprimer 27,1% ( $\kappa_{QW}=0.271$ ) de la variabilité dans la base de données. Par rapport aux précédents modèles IPSIM développés, le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou se trouve dans la moyenne des résultats concernant la précision globale et il est très nettement en dessous par rapport au Kappa de Cohen (Tableau 20). Ces résultats sont encourageants mais ils demandent d'être améliorés pour permettre une utilisation du modèle sur le terrain.

## Les perspectives d'amélioration du modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou

### *Construction du modèle*

Comme évoqué pour le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot, l'utilisation d'un modèle épidémiologique pourrait être envisagée tel que le modèle « Potentiel Système » mildiou utilisé par l'IFV pour déterminer l'attribut « Niveau de risque du Mildiou ». Cette modification permettrait d'obtenir une information plus fiable à la parcelle.

Dans l'état actuel des choses, le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou peut être amélioré en retravaillant certaines tables d'agrégation. Par exemple, dans l'échelle de l'attribut « Type de produit majoritairement utilisé P1 » les produits systémiques sont plus efficaces que les autres mais il est possible d'avoir une bonne efficacité sans ces produits. En effet, dans les sévérités simulées, des niveaux « Fort » sont simulés en général dès que la pression biotique est « Forte » ou « Moyenne » et ceci surtout chez les producteurs en agriculture biologique. Or très souvent, le niveau de sévérité observé chez ces viticulteurs en agriculture biologique est « Faible ». Le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou ne prend en compte que la molécule la plus utilisée pendant une période et pas le nombre de traitements effectués. Les viticulteurs en agriculture biologique font généralement plus de traitements que ceux en conventionnel. Ceci pourrait expliquer l'efficacité de leur traitement malgré une forte pression dans certaines situations. En effet, l'application de différents types de molécules (pénétrant, contact et systémique) représente juste différentes approches de traitements. L'application d'un fongicide de contact précisément avant l'apparition des symptômes visibles peut s'avérer efficace. Ainsi il s'agirait plus de savoir si le traitement est fait au bon moment et de la bonne manière. Ceci étant le poids des produits de contact et pénétrant devrait être revu à la hausse pour améliorer les écarts de classe entre données observées et données modélisées. Il serait intéressant aussi de revoir le tableau classifiant la qualité de pulvérisation des pulvérisateurs qui permet de remplir l'attribut « Type de pulvérisateur utilisé P1 ».

Dans la table d'agrégation de l'attribut « Efficacité du contrôle de l'inoculum primaire jusqu'à la floraison », l'utilisation de certains pulvérisateurs qualifiés comme « mauvais » a tendance à réduire l'efficacité du traitement surtout avec des produits non systémiques. Dans notre base de données, des exemples des vignobles de Gaillac (en 2017 jusqu'à 2019) en agriculture biologique (produits de contact) comme en conventionnelle (produits systémiques), qui avec des pression « Forte » ont utilisé un pulvérisateur qualifié comme de mauvaise qualité. Les résultats de simulations ont prédit une sévérité « Forte ». Or il a été observé une sévérité « Faible ». Avec ces résultats, il serait judicieux de revoir la source de cette qualification et de réduire le poids accordé à cet attribut.

### *Base de données et interface VBA*

La base de données utilisée pour évaluer le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou est plus importante que celle pour le modèle concernant le black rot (116 données contre 82 données) mais un déséquilibre est toujours présent. Les années 2021 et 2022 correspondantes au projet VITI OBS représentent la grande majorité des données. Les cas « Faible » sont majoritaires donc il faudrait rajouter des données avec des sévérités observées « Moyenne » et « Forte ».

Comme pour le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot, un travail sur l'interface VBA a été initié mais n'a pas pu encore être mené à son terme. Il serait intéressant de finaliser son développement pour pouvoir partager le modèle avec les viticulteurs.

*Intégration dans d'autres modèles*

De même que pour le modèle IPSIM-VIGNE-Black rot, le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou détermine une sévérité de dégâts du mildiou sur les grappes. Il serait intéressant de le coupler avec un module qui permettrait de définir des dommages et des pertes de rendement potentielles liée à ces dégâts.

## 2.2 IPSIM-VIGNE-Oïdium : en cours de construction

IPSIM-VIGNE-Oïdium est encore en cours de construction au moment de la rédaction de ce manuscrit mais des recherches bibliographiques et un atelier d'experts réalisés ont permis d'aboutir à une première version du modèle.

### 2.2.1 Effets des pratiques culturales, du pédoclimat et de l'environnement de la parcelle sur le développement de l'oïdium, les 3 entrées du modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium

De même que pour les deux autres maladies, le développement biologique de *E.necator* au cours de l'année dépend de nombreux paramètres environnementaux. L'ensemble de ces facteurs peuvent ainsi être classés principalement en 3 groupes : les facteurs climatiques, les pratiques culturales et l'environnement de la parcelle.

#### Effet des pratiques culturales

##### *Mesures prophylactiques*

- Maîtrise de la vigueur

L'apparition des feuilles à la véraison est la principale période de développement de l'oïdium. Durant cette période, une forte corrélation positive a été observée entre la vigueur végétative de la vigne et l'incidence de l'oïdium (Constant, 2013; Valdés-Gómez et al., 2006). Les vignes vigoureuses sont plus sensibles aux attaques car il y a plus de feuilles secondaires malades, ce qui engendre une grande quantité d'inoculum produite (Calonnec et al., 2009). Par conséquent, afin de limiter la vigueur, il faut d'abord considérer la vigueur du cépage et la vigueur conférée par le porte-greffe. La vigueur du porte-greffe affecte la vigueur de la plante entière (Jogaiah et al., 2008).

Ensuite, une autre mesure pour limiter la vigueur des vignes de la parcelle est de limiter la disponibilité en eau. C'est un effet combiné de la pluviométrie annuelle, de l'irrigation et de la réserve hydrique du sol. Lors que la vigne est irriguée, le nombre d'étages de feuilles est plus élevé, ce qui entraîne un feuillage trop dense, peu aéré et avec une faible illumination des grappes, créant un microclimat favorable au développement de l'oïdium (C. N. Austin & Wilcox, 2011). Le système de culture irrigué et fertilisé a des conséquences considérables sur la sévérité de la maladie sur les grappes. L'azote est le nutriment majeur qui affecte la vigueur de la vigne. La fertilisation azotée accroît la vigueur des plants et la teneur en azote des feuilles, ce qui induit par la suite une augmentation de la sensibilité des feuilles de la vigne à l'oïdium (Dubos, 2002; Keller et al., 2003).

L'enherbement est également une pratique importante pour maîtriser la vigueur de la vigne qui a des conséquences sur différents aspects du sol. En premier lieu, il modifie les ressources nutritionnelles disponibles pour la vigne, notamment l'eau et l'azote. La concurrence de l'herbe dans l'inter-rang pour l'absorption de l'azote est responsable d'une plus faible incidence de maladie sur la vigne (Marangoni et al., 2011). Par contre, s'il n'y a pas de couverture végétale entre les rangs, et que le désherbage chimique et l'irrigation sont utilisés ensemble, ces méthodes augmenteront la présence de l'oïdium sur la vigne (Valdés-Gómez et al., 2011).

- Maîtrise de l'aération des grappes

La maîtrise de l'aération des grappes peut également contrôler le développement de l'oïdium en permettant d'éviter un microclimat favorable à son développement. Les travaux en vert, par exemple l'ébourgeonnage, permet d'enlever les bourgeons drapeaux produits par la réactivation du mycélium

au printemps, ce qui enlève les sources d'inoculum et réduit aussi l'entassement de la végétation (Duquesne et al., 2013). Ensuite le rognage et l'écimage, réalisés de 3 à 5 fois en général par an, permet de limiter le volume végétatif exposé aux maladies, d'améliorer l'ensoleillement des grappes et d'éliminer la jeune végétation plus sensible (Barbier et al., 2013; Duquesne et al., 2013). Le relevage, effectué deux fois par an en général, permet d'aérer la zone fructifère et le feuillage pour faciliter le passage de la lumière et la pénétration des traitements (Duquesne et al., 2013). L'effeuillage favorise l'exposition des grappes au soleil et l'aération des grappes pour limiter le développement de l'oïdium (C. N. Austin & Wilcox, 2011; Chellemi & Marois, 1992).

- Mode de conduite de la vigne

Le rayonnement du soleil inhibe de manière significative le développement de l'oïdium de la vigne, non seulement dans des conditions d'environnement contrôlées, mais aussi dans les vignobles (C. Austin & Wilcox, 2012; Willocquet et al., 1996; Zahavi et al., 2001). Différents modes de conduite affectent directement l'intensité lumineuse, ce qui influence indirectement la sévérité de l'oïdium. Le niveau de maladie est plus faible dans un système en canopée libre que dans un système palissé, car les baies sont plus exposées au soleil (C. N. Austin & Wilcox, 2011). Nous n'avons pas pris en compte l'impact de la taille dans le modèle car les deux modes de tailles majoritaires (le Cordon et le Guyot) sur les trois vignobles (Cahors, Fronton et Gaillac) sont des systèmes palissés donc l'exposition au soleil est la même.

Cependant, il a été choisi de faire une différence entre la taille manuelle et la taille mécanique de précision dans le modèle car la quantité de bourgeons laissés par différents types de tailles détermine le niveau d'infection de la saison (Gadoury et al., 2001).

La distance inter-rang en tant que facteur d'influence doit également être prise en compte. Un espacement plus rapproché des inter-rangs provoque un ombrage mutuel entre les rangs favorisant une attaque plus forte de l'oïdium (Zahavi & Reuveni, 2012).

### *Efficacité du traitement*

L'efficacité du traitement est un facteur clé dans la lutte contre l'oïdium. Il est principalement divisé en deux aspects : l'efficacité du produit et la qualité de pulvérisation. Il existe plusieurs types de produits pour lutter contre l'oïdium : les produits de contact comme les spécialités à base de soufre, les produits pénétrants à base de SDHI et d'IDM et les produits à base de substances naturelles. Le nombre d'utilisations de certaines molécules est limité car une utilisation multiple ou continue peut provoquer la résistance de l'oïdium (IFV et al., 2022). Les produits pénétrants sont limités à deux applications tandis que le soufre n'est pas soumis à des problèmes de résistance. La rémanence du traitement est différente selon les produits employés. Avec des produits pénétrants, elle est plus élevée (environ 10 à 14 jours) tandis que la rémanence d'un produit contact est d'environ 8 à 10 jours en fonction de la pluviométrie car il est lessivé à partir de 20 mm de pluie. Le dosage de produit est également très important : un dosage inadapté du produit entraîne directement une réduction de la qualité du traitement. Pour effectuer, un traitement à la bonne dose, le logiciel Optidose a été développé pour définir la quantité minimale à appliquer en fonction du gabarit de végétation (déterminant ainsi un volume à protéger) de la pression parasitaire et du stade phénologique (Codis et al., 2013).

La qualité de pulvérisation est différente selon les types de pulvérisateurs et l'efficacité du travail apportée par le traitement de deux faces et le traitement simple face sont également différents (Auvergne et al., 2017). Un réglage adapté du pulvérisateur est essentiel : un mauvais dosage du

produit et un réglage inadapté du pulvérisateur sont à l'origine de la plupart des mauvais résultats (Codis et al., 2016).

### Effet du climat

Le développement de l'oïdium dépend des conditions climatiques, et principalement de la température, de la pluviométrie et de l'hygrométrie.

Au stade de débourrement, les ascospores commencent à se libérer dès que : la somme des températures moyennes journalières depuis le premier novembre est supérieure à 1,100 °C, la température moyenne est supérieure à 11°C, la pluviométrie est supérieure à 2 mm et la durée d'humectation est supérieure à 2.5 heures (Jailloux et al., 1999). Dans ces conditions, le taux de libération des ascospores peut atteindre 80%. Lorsque les précipitations sont inférieures à 2,5 mm, le taux de libération des spores à ce stade n'est que de 20%. Dans des conditions sans pluie, les ascospores peuvent également être sécrétées quand il y a de l'humidité pendant plus de 3,5 heures, mais la proportion est très faible (Holb & Füzü, 2016).

Après le stade de débourrement, les températures de 22 à 27 °C (optimum 24 à 25 °C) sont favorables à la germination des conidies et au développement de la maladie. La germination d'un très faible pourcentage de conidies peut commencer à 8 °C, et le taux de germination augmente presque linéairement entre 10 °C et 24 °C (Fessler & Kassemeyer, 1995). Par contre, une température supérieure à 32 °C inhibe la germination des conidies et une température supérieure à 40 °C tue les conidies (Chellemi & Marois, 1992; Halleen & Holz, 2001). La germination des conidies est terminée dans les 30 heures suivant l'inoculation à des températures comprises entre 12°C et 30°C. Le taux de germination des conidies est fonction de la température pendant le développement.

Dans notre modèle, nous avons considéré la plage de température du modèle d'indice d'évaluation des risques de l'Université de Californie (UC) Davis et du modèle de risque d'instruments Pessl. La température optimale est plus large de 21°C à 32°C (Gubler et al., 1999), afin de prendre en compte tous les dégâts possibles dus à l'oïdium.

Le développement de la maladie est fortement influencé par le taux d'humidité, une humidité relative de 40 à 100% permet la germination des conidies et la contamination (Dubos, 2002). La précipitation est également un facteur clé, une pluie légère et continue (supérieure à 2.5 mm et consécutive de 4 heures) est défavorable à l'oïdium de la vigne, car il provoque un lessivage des conidies et perturbe la croissance mycélienne. Le stock de conidies est susceptible de diminuer et les conidies peuvent être emportées par les feuilles, entraînant une diminution de la concentration de spores (Blaich et al., 1989).

### Effet de l'environnement

L'infection par l'oïdium sur la parcelle au cours de l'année précédente est un facteur très important. Le développement de l'oïdium est proportionnel au nombre de spores infectieuses, et les vignes sont infectées avec un taux d'infection constant (Calonnec et al., 2008). Une fois que la parcelle est infectée, les spores infectieuses dans cette parcelle vont continuer de se propager dans des circonstances normales, ce qui entraînera une forte probabilité d'infection l'année suivante. Cependant, si seuls quelques raisins sont infectés lors de la saison précédente, le taux d'infection de l'année suivante peut être beaucoup plus faible. La fréquence et l'intensité des infections de l'année précédente ont directement un effet sur la pression de la maladie l'année suivante (Rumbolz & Gubler, 2005; Sall, 1982). La réduction de l'inoculum formé l'année précédente est la première étape pour contrôler l'épidémie d'oïdium la deuxième année. Cette réduction peut se faire en limitant la présence de cléistothèces hivernants (Caffi et al., 2013).

Dans le même temps, le niveau d'infection des parcelles voisines et leur superficie contaminée au cours de l'année précédente sont également un facteur à considérer. Il peut y avoir une infection mutuelle entre les parcelles adjacentes en raison du vent et d'autres facteurs (Willoquet et al., 1998). Cela dépend de la superficie de la parcelle étudiée et de la parcelle voisine contaminée. Si la superficie de la parcelle adjacente est plus petite que la parcelle étudiée, cette infection mutuelle peut être ignorée. Mais si la superficie de la parcelle voisine contaminée est beaucoup plus grande que la parcelle d'étude, cette infection peut être considérée comme destructive.

La sensibilité des cépages est également l'un des principaux facteurs de développement de l'oïdium. Certains cépages possèdent une forte sensibilité, tels que le Cabernet Sauvignon, le Chardonnay, le Chenin, le Cabernet Franc. D'autres ont une faible sensibilité à l'oïdium, comme le Cot, la Folle blanche et le Melon. Certaines variétés sont résistantes à l'oïdium, par exemple le Baroque blanc et le Gramon noir (Doster & Schnathorst, 1985; Li, 1993).

En termes du paysage de la parcelle, il y a aussi certains facteurs à considérer. L'orientation de la parcelle détermine principalement le niveau d'exposition de la parcelle au soleil, ce qui est un facteur indirect. Lorsque la direction des rangs est Est-Ouest, la lumière du soleil sera étroitement répartie sur les feuilles au-dessus de chaque rangée, et les feuilles et les zones fruitières en dessous recevront moins de lumière du soleil, ce qui est favorable au développement de l'oïdium. Au contraire, dans le sens Nord-Sud, les deux côtés du rang peuvent être exposés au soleil, inhibant ainsi le développement de l'oïdium. Une parcelle qui reçoit de l'ombre, pendant un certain temps et dans une certaine direction, sera plus sujette au développement de l'oïdium. Le risque de brouillard, de temps maussade et nuageux affectera aussi l'exposition au soleil de la vigne. La parcelle de bas fond ou proche de berges possède un niveau d'humidité plus élevé ce qui est favorable à l'oïdium (Garin, 2011; Lafond et al., 2011). Ce sont les environnements les plus propices à la croissance de l'oïdium, donc par la suite, nous prendrons ces facteurs en considération dans notre modèle.

## 2.2.2 Construction du modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium

### Identification et organisation des attributs

Le modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium possède 49 attributs au total, dont 31 sont des attributs de base/d'entrée et 18 des attributs agrégés. Les 31 attributs de base représentent les variables d'entrée du modèle comme les feuilles de l'arbre, et les attributs agrégés sont des nœuds internes déterminés par des attributs de base (Figure 32). La sortie du modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium est représenté par l'attribut « Sévérité de l'oïdium dans la parcelle », qui est déterminé par 3 attributs agrégés : « le climat », « les pratiques culturales » et « l'environnement de la parcelle » (Figure 32).

Attribute	Scale
<b>Sévérité de l'oïdium dans la parcelle</b>	<b>Forte</b> ; Moyenne; <b>Faible</b>
<b>Environnement de la parcelle</b>	<b>Très favorable</b> ; <b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
-Sensibilité des cépages	<b>Très sensible</b> ; <b>Sensible</b> ; Peu sensible; <b>Résistant</b>
-Historique de la contamination sur la parcelle N-1	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
<b>Risque de la contamination par la parcelle voisine contaminée</b>	<b>Élevée</b> ; Moyenne; <b>Faible</b>
-Parcelles voisines contaminées N-1	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
-Taille de la parcelle par rapport à la PVC	<b>Plus petite</b> ; Similaire; <b>Plus grande</b>
<b>Paysage de la parcelle</b>	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
-Orientation de la parcelle	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
-Parcelle de bas fond ou proche de berges	<b>Oui</b> ; <b>Non</b>
-Parcelle ombragée	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
-Risque de brouillard, de temps maussade et nuageux	<b>Oui</b> ; <b>Non</b>
<b>Pratiques culturales</b>	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
<b>Mesures prophylactiques</b>	<b>Très favorable</b> ; <b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
<b>Maîtrise de la vigueur</b>	<b>Très mal maîtrisée</b> ; <b>Mal maîtrisée</b> ; Moyennement maîtrisée; <b>Bien maîtrisée</b>
-Potentiel génétique de vigueur	<b>Très vigoureux</b> ; <b>Vigoureux</b> ; Peu vigoureux; <b>Faible vigoureux</b>
-Vigueur de clone	<b>Très vigoureux</b> ; <b>Vigoureux</b> ; Peu vigoureux; <b>Faible vigoureux</b>
-Porte-greffe	<b>Très vigoureux</b> ; <b>Vigoureux</b> ; Peu vigoureux; <b>Faible vigoureux</b>
<b>Disponibilité de l'eau</b>	<b>Forte</b> ; Moyenne; <b>Faible</b>
-Pluviométrie	<b>Forte</b> ; Moyenne; <b>Faible</b>
-Irrigation	<b>Oui</b> ; <b>Non</b>
-Réserve hydrique du sol	<b>Élevée</b> ; Moyenne; <b>Faible</b>
-Fertilisation azotée	<b>Niveau excessif</b> ; Niveau d'équilibre; <b>Niveau faible</b>
-Enherbement de la parcelle	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
<b>Maîtrise de l'aération des grappes</b>	<b>Mal maîtrisée</b> ; Moyennement maîtrisée; <b>Bien maîtrisée</b>
-Ebourgeonnage précoce	<b>Non</b> ; <b>Oui</b>
-Rognage et écimage adapté	<b>Favorable</b> ; <b>Défavorable</b>
-Relevage adapté	<b>Favorable</b> ; <b>Défavorable</b>
-Effeuilage précoce	<b>Non</b> ; <b>Oui</b>
<b>Mode de conduite de la vigne</b>	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
-Type de taille	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
-Espacement inter-rang	<b>Étroit</b> ; Moyen; <b>Large</b>
<b>Efficacité du traitement</b>	<b>Faible efficacité</b> ; Moyennement efficacité; <b>Forte efficacité</b>
<b>Efficacité des produits</b>	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
-Niveau de risque de résistance	<b>Favorable</b> ; <b>Défavorable</b>
-Persistance d'action	<b>Courte</b> ; Moyenne; <b>Longue</b>
-Dosage adapté du produit	<b>Favorable</b> ; <b>Défavorable</b>
<b>Qualité de pulvérisation</b>	<b>Mauvais</b> ; Moyenne; <b>Bonne</b>
-Type de pulvérisateurs	<b>Mauvaise</b> ; Moyenne; <b>Bonne</b>
-Réglage adapté de pulvérisateur	<b>Favorable</b> ; <b>Défavorable</b>
<b>Climat</b>	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
<b>Climat au stade de débourrement</b>	<b>Favorable</b> ; <b>Défavorable</b>
<b>Condition d'éjection des ascospores</b>	<b>Favorable</b> ; <b>Défavorable</b>
-Température	<b>Favorable</b> ; <b>Défavorable</b>
-Hygrométrie	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
<b>Climat après stade de débourrement</b>	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
-Température	<b>Favorable</b> ; Moyennement favorable; <b>Défavorable</b>
-Hygrométrie	<b>Favorable</b> ; <b>Défavorable</b>
-Pluviométrie	<b>Favorable</b> ; <b>Défavorable</b>

Figure 32 : Organisation du modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium (structure, attributs et valeurs d'échelle). A gauche, la structure hiérarchique du modèle est présentée. Les facteurs non en gras correspondent aux attributs d'entrée saisis par l'utilisateur. Les facteurs en gras sont les attributs agrégés. A droite, les valeurs d'échelle sont présentées pour chaque attribut de IPSIM-VIGNE-Oïdium. Le rouge représente la valeur favorable au développement du mildiou et nuisible au développement des grappes. Le noir représente la valeur neutre. Le vert représente la valeur défavorable pour le développement du mildiou et favorable au développement des grappes de la vigne.

### Définition des échelles

La sévérité de l'oïdium dans la parcelle peut se refléter principalement sous deux aspects : l'intensité (somme des intensités des organes touchés divisée par le nombre total d'organes) et la fréquence (nombre d'organes atteints par rapport au nombre d'organes observés) de la maladie sur les feuilles ou sur les grappes. Lors de l'atelier d'experts, les suggestions des experts, étaient plus portées sur la

qualité des grappes, donc nous avons finalement retenu l'intensité d'attaques sur les grappes comme la sortie du modèle. Par conséquent, l'échelle de la sévérité de la maladie peut prendre la valeur suivante : faible (intensité d'attaque = 0-1%), moyenne (intensité d'attaque = 1-5%) et forte (intensité d'attaque >5%).

Parfois, pour les attributs de base, une échelle binaire est suffisante, comme pour l'irrigation, l'ébourgeonnage précoce, le rognage. Cette échelle définit si la pratique a été faite. D'autre part, il y a des attributs qui ont besoin d'une échelle à trois valeurs pour décrire la diversité. Par exemple l'attribut « Historique de la contamination sur la parcelle de l'année précédente » peut être favorable quand une partie de la parcelle n'a pas été vendangeable l'année précédente, moyennement favorable (quelques grappes touchées) et défavorable (pas de dégâts observés). Certains attributs sont initialement quantitatifs, ils sont alors traduits en valeurs qualitatives grâce à des convertisseurs à l'aide de la littérature technique. Par exemple, la fertilisation azotée est divisée en 3 échelles : niveau faible (moins de 30 unités), niveau d'équilibre (30-60 unités) et niveau excessif (supérieur à 60 unités d'azote).

### Définition des tables d'agrégation

Le modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium possède 18 tables d'agrégation car chaque attribut agrégé possède une table d'agrégation. Seule la table d'agrégation pour la sévérité de l'oïdium est présentée ici (Tableau 26). La sévérité de l'oïdium est définie en fonction des pratiques culturales, du climat et de l'environnement de la parcelle. Selon les avis des experts, l'importance relative de ces trois attributs est différente. L'importance des pratiques culturales est plus élevée, suivie par l'environnement de la parcelle. Le climat est le plus faible parmi les trois attributs. Par conséquent, les règles de décision de la table d'agrégation des attributs de sortie donnent la priorité aux pratiques culturales.

Tableau 26 : Table d'agrégation de l'attribut final du modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium. Le rouge représente la valeur favorable au développement de l'oïdium et nuisible au développement des grappes. Le noir représente la valeur neutre. Le vert représente la valeur bénéfique pour le développement de l'oïdium et préjudiciable pour les grappes de la vigne.

Environnement de la parcelle 33%	Pratiques culturales 42%	Climat 26%	Sévérité de l'oïdium dans la parcelle
1 Très favorable	*	Favorable	Forte
2 <=Favorable	Favorable	*	Forte
3 <=Favorable	<=Moyennement favorable	<=Moyennement favorable	Forte
4 <=Moyennement favorable	Favorable	<=Moyennement favorable	Forte
5 Très favorable	>=Moyennement favorable	Defavorable	Moyenne
6 <=Favorable	Moyennement favorable	Defavorable	Moyenne
7 Très favorable	Defavorable	>=Moyennement favorable	Moyenne
8 <=Favorable	Defavorable	Moyennement favorable	Moyenne
9 Favorable	Defavorable	<=Moyennement favorable	Moyenne
10 Favorable: Moyennement favorable	Defavorable	Favorable	Moyenne
11 >=Moyennement favorable	Favorable	Defavorable	Moyenne
12 Moyennement favorable	Moyennement favorable	<=Moyennement favorable	Moyenne
13 Moyennement favorable	>=Moyennement favorable	Favorable	Moyenne
14 >=Moyennement favorable	Moyennement favorable	Favorable	Moyenne
15 Defavorable	Favorable	*	Moyenne
16 Defavorable	<=Moyennement favorable	Favorable	Moyenne
17 >=Favorable	Defavorable	Defavorable	Faible
18 >=Moyennement favorable	>=Moyennement favorable	Defavorable	Faible
19 >=Moyennement favorable	Defavorable	>=Moyennement favorable	Faible
20 Defavorable	>=Moyennement favorable	>=Moyennement favorable	Faible
21 Defavorable	Defavorable	*	Faible

### Poids des attributs

Le logiciel DEXi calcule automatiquement le poids de chaque attribut de base et agrégé. Nous considérons seulement le poids local normalisé et le poids global normalisé (Tableau 27). Pour le modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium, l'attribut « Environnement de la parcelle » explique 42% de la sévérité

finale de l'oïdium dans la parcelle, l'attribut « Pratiques culturales » représente 36% et l'attribut « Climat » possède un poids de 22%. Dans l'ensemble des attributs de base, ceux qui ont le plus de poids sont « Sensibilité des cépages » et « Historique d'infection des parcelles de l'année précédente ». L'attribut « Sensibilité des cépages » explique à lui seul 17% de la sortie du modèle et 40% de l'attribut agrégé « Environnement de la parcelle » tandis que l'attribut « Historique de la contamination de la parcelle de l'année précédente » explique 13% de la sortie du modèle et 31% de l'attribut agrégé « Environnement de la parcelle ». Certains attributs de base tels que « Orientation de la parcelle », « Pluviométrie » dans l'attribut agrégé « Disponibilité de l'eau », « Rognage et écimage adapté » et « Relevage adapté » possèdent un poids global normalisé de 0%.

Pour les pratiques culturales, le poids relatif de l'attribut « Efficacité du traitement » est légèrement supérieur par rapport à l'attribut « Mesures prophylactiques ». Parmi les mesures prophylactiques, la maîtrise de la vigueur possède le poids le plus important, elle explique 5% de la sortie du modèle et 44% de l'attribut agrégé « Mesures prophylactiques ». Dans l'attribut agrégé « Efficacité du traitement », l'attribut « Type de pulvérisateurs » est l'attribut de base le plus important, il explique à 10 % de la sortie du modèle et 69% de l'attribut « Qualité de pulvérisation ».

Concernant le climat, le développement et la contamination de l'oïdium commence principalement dans la période des feuillaisons, c'est-à-dire après le stade de débourrement, donc l'attribut « Climat après stade de débourrement » possède un poids local plus important (75%) par rapport à l'attribut « Climat au stade de débourrement ».

Les ascospores de cléistothèce de l'oïdium commencent à se propager pendant la phase de débourrement. Le principal facteur d'influence à ce stade est la température car il faut une certaine température pour la libération et à la propagation d'ascospores. De ce fait, l'attribut « Température » possède à un poids local plus important que l'attribut de base « Hygrométrie ». Pour le climat après le débourrement, les trois attributs de base sont interdépendants, donc le poids local est le même.

Dans l'environnement de la parcelle, le poids normalisé de la sensibilité des cépages est plus important que les autres attributs, il représente 42%, parce que la sensibilité des cépages joue presque un rôle déterminant. Si les cépages de la parcelle sont des cépages résistants, l'oïdium n'apparaîtra pas même dans toutes les conditions de culture très favorable au développement de la maladie oïdium.

Tableau 27 : Poids normalisés « local » et « global » pour les attributs du modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium. Les poids « local » et « global » sont exprimés en %, indiqués pour chaque attribut et distribués en 5 niveaux d'agrégation ordonnés en colonnes. Les termes gras et non gras représentent respectivement les attributs agrégés et les attributs d'entrée. Chaque point supplémentaire en amont du nom de l'attribut correspond à un niveau inférieur au précédent.

Attributs définissant la sévérité de l'Oïdium dans la parcelle	Poids local normalisé					Poids global normalisé				
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
<b>Environnement de la parcelle</b>	<b>42</b>					<b>42</b>				
.. Sensibilité des cépages		40					17			
.. Historique de la contamination sur la parcelle N-1		31					13			
.. Risque de la contamination par la parcelle voisine contaminée		<b>22</b>					<b>9</b>			
... Parcelles voisines contaminées N-1			50					5		
... Taille de la parcelle par rapport à la PVC			50					5		
.. Paysage de la parcelle		<b>7</b>					<b>3</b>			
... Orientation de la parcelle			10					0		
... Parcelle de bas fond ou proche de berges			32					1		
... Parcelle ombragée			35					1		
... Risque de brouillard, de temps maussade et nuageux			23					1		
<b>Pratiques culturales</b>	<b>36</b>					<b>36</b>				
.. Mesures prophylactiques		<b>32</b>					<b>11</b>			
... Maitrise de la vigueur			<b>44</b>					<b>5</b>		
.... Potentiel génétique de vigueur				<b>40</b>					<b>2</b>	
..... Vigueur de clone					62					1
..... Porte-greffe					38					1
..... Disponibilité de l'eau				<b>23</b>					<b>1</b>	
..... Pluviométrie					37					0
..... Irrigation					45					1
..... Réserve hydrique du sol					18					0
.... Fertilisation azotée				15					<b>1</b>	
.... Enherbement de la parcelle				23					<b>1</b>	
.. Maitrise de l'aération des grappes			<b>21</b>					<b>2</b>		
... Ebourgeonnage précoce				45					<b>1</b>	
... Rognage et écimage adapté				18					<b>0</b>	
... Relevage adapté				9					<b>0</b>	
... Effeuilage précoce				27					<b>1</b>	
.. Mode de conduite de la vigne			<b>35</b>					<b>4</b>		
... Type de taille				50					<b>2</b>	
... Espacement inter-rang				50					<b>2</b>	
.. Efficacité du traitement		<b>68</b>						<b>24</b>		
... Efficacité des produits			<b>43</b>					<b>10</b>		
.... Niveau de risque de résistance				54					<b>6</b>	
.... Persistance d'action				23					<b>2</b>	
.... Dosage adapté du produit				23					<b>2</b>	
... Qualité de pulvérisation			<b>57</b>					<b>14</b>		
... Types de pulvérisateurs				69					<b>10</b>	
... Réglage adapté du pulvérisateur				31					<b>4</b>	
<b>Climat</b>	<b>22</b>					<b>22</b>				
.. Climat au stade de débourrement		<b>25</b>					<b>6</b>			
... Condition d'éjection des ascospores			<b>100</b>					<b>6</b>		
.... Température				57					<b>3</b>	
.... Hygrométrie				43					<b>2</b>	
.. Climat après le stade de débourrement		<b>75</b>						<b>17</b>		
... Température			33						<b>6</b>	
... Hydrométrie			33						<b>6</b>	
... Pluviométrie			33						<b>6</b>	

### 2.2.3 Perspectives de développement du modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium

Le modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium a été le premier à être réalisé et n'a, par la suite, pas été retravaillé. Il serait intéressant d'essayer de mettre à jour l'arbre du modèle pour qu'il soit assez proche des deux autres modèles. L'objectif est de ne pas multiplier les données nécessaires pour pouvoir faire fonctionner l'ensemble des modèles. Par exemple, la partie Climat de l'arbre pourrait être remplacée par l'utilisation des informations à l'échelle du vignoble provenant des bulletins de santé du végétal couplées à une échelle parcellaire qui serait l'historique de la maladie sur la parcelle comme réalisé pour les deux autres modèles.

A la suite de ce travail, le modèle IPSIM-VIGNE-Oïdium pourrait être évalué en utilisant la base de données existante. Comme évoqué précédemment, la majorité des données de cette base sont issues du projet VITI OBS et donc de trois vignobles avec une faible pression oïdium. Il faudrait compléter la base de données avec des données provenant des vignobles avec une pression oïdium moyenne et forte. Ces données pourraient provenir du projet DEPHY EXPE ECOVITI de la zone méditerranéenne qui est plus soumise à la problématique de l'oïdium (Métral et al., 2018).

## 2.3 Discussion globale de la partie modélisation

### 2.3.1 Intérêts et limites de la construction des modèles IPSIM

Le modèle IPSIM-VIGNE a pour objectif de prédire un profil de dégâts lié aux maladies de la vigne en utilisant le formalisme développé par Robin et al. (2013) sur le modèle IPSIM-Wheat-Eyespot. Le travail s'est concentré sur les deux maladies les plus importantes à l'échelle mondiale : le mildiou et l'oïdium. En plus, le choix a été de développer le travail sur le black rot, une maladie avec une importance plus régionale (Sud-Ouest), plutôt que sur le botrytis ou sur un ravageur comme les tordeuses de la grappe. Le modèle IPSIM-VIGNE n'est pas développé mais deux modules ont été construits et évalués (IPSIM-VIGNE-Black rot et IPSIM-VIGNE-Mildiou) et le dernier module concernant l'oïdium a été construit. Le formalisme IPSIM a été essentiellement utilisé sur des cultures annuelles telles que le blé (Robin, 2014), le tournesol (Vedy-Zecchini, 2020) et sur une seule culture pérenne : la pomme (Demestihis, 2017). Les modèles IPSIM-VIGNE-Black rot et IPSIM-VIGNE-Mildiou sont les premiers à être évalués sur une culture pérenne en utilisant différents indicateurs d'évaluation comme la précision globale et le kappa de Cohen. Les deux modèles ont une qualité de prédiction encourageante mais qui est insuffisante pour qu'ils soient aujourd'hui utilisés par les viticulteurs et les techniciens. Les pistes d'amélioration pour les deux modèles ont été précédemment évoquées dans leur chapitre respectif.

Ce travail a permis de faire un état des lieux de l'ensemble des facteurs influençant le développement des trois principales maladies de la vigne (mildiou, oïdium et black rot) qui sont à l'origine des dégâts sur grappes lors de la campagne de traitement. De plus, la démarche IPSIM a permis de proposer une hiérarchisation et une prise en considération des interactions de ces facteurs sous la forme d'un arbre de décision et de tables d'agrégation. Les modèles construits sont facilement adaptables et évolutifs selon les nouvelles connaissances qui pourraient avoir lieu.

Cependant, des limites existent à la création de ces modèles IPSIM. Il pourrait être reproché aux modèles leur manque de précision aussi bien dans le nombre des attributs ou des échelles que dans le nombre de classes de sortie du modèle. Ces choix sont un compromis pour pouvoir prendre en compte l'ensemble des interactions existantes au sein d'un écosystème complexe. Par exemple, le nombre de classes des attributs pourrait être augmenté pour apprécier plus finement les attributs mais les tables d'agrégation seraient trop difficiles à compléter. La création des tables d'agrégation est réalisée en mobilisant les références scientifiques et techniques mais elle demande une certaine expertise entraînant une possible subjectivité. Pour limiter au maximum cette subjectivité, le nombre d'échelles par attributs est limité et les tables d'agrégation ont été discutées entre experts. Lors de la création des modèles, certains facteurs difficiles à renseigner ou ceux pour lesquels il n'existe pas de consensus au niveau de la littérature n'ont pas été pris en compte. Cependant, la facilité d'adaptation des modèles permettra de les mettre à jour en fonction des nouvelles connaissances. Les modèles IPSIM ne prennent pas en compte les facteurs socioéconomiques, ni les objectifs et contraintes du viticulteur. Néanmoins, ils pourraient être couplés avec d'autres modèles qui permettraient la conception de systèmes de culture. Pour finir, les modèles IPSIM ne prédisent qu'un profil de dégâts et non des dommages. Ils ne permettent donc pas d'évaluer les performances agronomiques en termes de rendement.

### 2.3.2 Amélioration des modèles en utilisant un algorithme

Comme évoqué précédemment, les modèles IPSIM-VIGNE-Black rot et IPSIM-VIGNE-Mildiou possèdent des qualités de prédictions qui peuvent être améliorées en retravaillant sur les tables d'agrégation en utilisant l'expertise comme évoqué précédemment dans leur chapitre respectif.

Il est possible de les améliorer en optimisant les règles d'agrégations définies par expertise. Pour aider dans ce travail, une méthode algorithmique (Vedy-Zecchini, 2020) a été développée en adaptant une méthode d'estimation des paramètres pour modèles quantitatifs (Wallach et al., 2001). L'objectif de cette méthode est d'identifier là où les règles d'agrégation qui doivent modifier pour améliorer la qualité de prédiction globale du modèle. L'algorithme va étudier l'ensemble des combinaisons des règles d'agrégation pouvant être optimisées. Pour chaque combinaison, le kappa de Cohen pondéré quadratiquement va être estimé pour caractériser la qualité de prédiction. Une comparaison des différents kappas de Cohen pondérés quadratiquement est effectuée pour définir la meilleure combinaison de règles d'agrégation. L'objectif final est d'obtenir le kappa de Cohen pondéré quadratiquement le plus proche de 1. Par la suite, cette combinaison est utilisée sur l'ensemble des données pour obtenir le meilleur modèle possible. Le kappa de Cohen pondéré quadratiquement associé à ce dernier ajustement correspond alors à une qualité d'ajustement et non à une qualité de prédiction.

Cette méthode a été utilisée sur IPSIM - Tournesol - Phomopsis (Vedy-Zecchini, 2020). Par exemple, l'algorithme a permis d'améliorer le modèle IPSIM en augmentant le kappa de Cohen pondéré quadratiquement de 0,352 ce qui signifie que l'accord entre incidences observées et simulées est modéré (« fair », Landis & Koch (1977)) à 0,612 en modifiant une règle d'agrégation. En modifiant deux règles d'agrégation, la valeur du kappa de Cohen est passée à 0,639 (accord très bon) (Vedy-Zecchini, 2020). L'algorithme a été codé sous R ou sous C++ et il est prévu qu'il soit mobilisé pour améliorer les deux modèles IPSIM-VIGNE-Black rot et IPSIM-VIGNE-Mildiou.

### 2.3.3 Création du modèle IPSIM-VIGNE : combinaison des 3 modèles

Les trois modules de IPSIM-VIGNE ont été développés indépendamment sur trois années successives. Individuellement, ils prédisent la sévérité finale de chaque maladie (mildiou, oïdium et black rot) séparément sur les grappes d'une parcelle en fonction des pratiques culturales, du climat et de l'environnement de la parcelle. Cependant, au sein de l'agroécosystème, il existe une multitude de bioagresseurs qui coexistent pour un profil de dégâts unique en fonction d'une situation de production donnée. Ces bioagresseurs peuvent alors se retrouver en interaction sur les grappes. L'objectif final de la démarche IPSIM est de prédire le profil de dégâts de l'ensemble des bioagresseurs majeurs de la vigne. Dans un premier temps, IPSIM-VIGNE pourrait combiner les trois modèles développés dans le cadre de cette thèse et à l'avenir si d'autres IPSIM sont construits (par exemple pour les ravageurs), ils pourraient être couplés.

Pour représenter ces interactions, un modèle générique a été développé par Aubertot et Robin en 2013. Chaque bioagresseur de l'agroécosystème est considéré individuellement en utilisant son modèle IPSIM pour calculer la sévérité finale s'il était seul à affecter la vigne. Ensuite, le modèle IPSIM-VIGNE prendra en compte les interactions entre les bioagresseurs en fonction de leur niveau de sévérité respectif et d'une typologie simple d'interactions possibles entre deux bioagresseurs : soit le bioagresseur n°1 facilite plus ou moins le bioagresseur n°2, soit il le réduit plus ou moins soit il n'interagit pas avec lui (Aubertot & Robin, 2013). Le modèle générique est présenté dans la figure suivante.

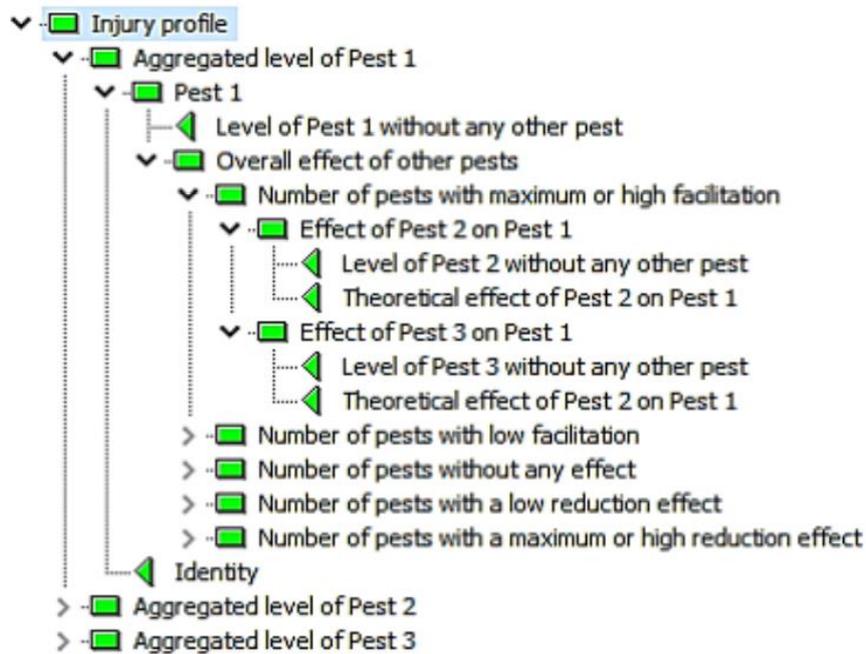


Figure 33 : Modèle générique IPSIM pour une culture et trois bioagresseurs représentant les interactions sous DEXi (Aubertot & Robin, 2013).

La création du modèle IPSIM-VIGNE demande une connaissance sur les interactions entre les maladies concernées. Malheureusement, il n'existe pas d'études sur ces interactions qui seraient intéressantes d'étudier. Les trois maladies attaquent les grappes et donc, on peut supposer qu'elles auraient un effet de réduction entre elles car elles vont réduire l'échantillon de grappes disponibles pour les autres maladies.

Dans l'état actuel des connaissances, la construction indépendante des trois modèles et leur combinaison au travers du modèle IPSIM-VIGNE sans interaction entre eux semble approprié. En fonction des études qui pourraient voir le jour sur les interactions, l'adaptation serait alors possible.

---

## PARTIE IV Discussion générale

---

Ce travail de thèse avait pour objectif de co-construire, expérimenter à la ferme et co-évaluer des stratégies de protection du vignoble moins dépendantes des pesticides avec la participation d'un groupe de viticulteurs du Sud-Ouest de la France et de créer le modèle IPSIM pour trois maladies (mildiou, oïdium et black rot) de la vigne. Dans cette partie, tout d'abord une discussion des résultats obtenus est réalisée suivie par une discussion sur la démarche mise en œuvre et pour finir ? les perspectives sont abordées.

# 1 Discussion des résultats de la thèse

Pour rappel, les trois hypothèses posées dans ce travail étaient :

- H1 : La co-conception de stratégies de protection du vignoble avec les viticulteurs est efficace pour réduire le recours aux pesticides en mobilisant différentes catégories de leviers.
- H2 : Les stratégies de protection du vignoble co-construites permettent de réduire l'utilisation de pesticides, mais peuvent conduire à une plus grande incidence des maladies et donc à une perte de rendement, ainsi qu'à une augmentation du coût de la protection contre les maladies avec l'utilisation de produits de biocontrôle.
- H3 : La modélisation IPSIM qualitative et agrégative des dégâts liés aux maladies selon les pratiques, le climat et l'environnement est un outil d'évaluation et de co-conception de stratégies réduisant le recours aux pesticides.

## 1.1 Une démarche de co-conception aboutissant à des stratégies de protection du vignoble mobilisant l'efficacité et la substitution (cadre ESR) pour réduire l'utilisation des pesticides

Nous avons confirmé l'hypothèse 1 selon laquelle la co-conception de stratégies de protection du vignoble avec les viticulteurs est efficace pour réduire le recours aux pesticides en mobilisant différentes catégories de leviers. En effet, la co-conception des stratégies de protection du vignoble avec les différents participants (viticulteurs, techniciens viticoles et chercheurs) a donné lieu à des stratégies de protection du vignoble mobilisant l'efficacité et la substitution (cadre ESR).

Pour la réduction des fongicides au niveau de l'efficacité (E), le levier qui a été retenu par les participants était l'utilisation d'un outil d'aide à la décision (DéciTrait®) pour aider à programmer les traitements et les doses de produits à appliquer. Pour la substitution (S), les participants ont décidé de substituer les pesticides de synthèse par des produits de biocontrôle. Ces deux leviers (E et S) se combinent tout au long de la campagne de traitement. Ils sont régulièrement cités comme étant les leviers les plus mobilisés par les viticulteurs pour réduire l'utilisation des pesticides (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b).

Concernant les herbicides, le choix s'est porté sur le désherbage mécanique sous le rang et la combinaison de l'enherbement et du travail du sol de l'inter-rang qui sont deux leviers de substitution. L'enherbement d'un inter-rang sur deux était un levier déjà mis en place par les viticulteurs pour permettre une bonne portance du sol lors des traitements. Selon les viticulteurs et les parcelles, l'autre inter-rang peut être enherbé ou accueillir un couvert végétal qui sera travaillé mécaniquement pour

limiter la concurrence pour la vigne. Ces leviers sont les deux premiers mobilisés pour gérer les adventices dans des systèmes viticoles visant à réduire l'utilisation des herbicides (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b; Delière et al., 2016).

Pour finir, la réduction des insecticides s'est focalisée sur la diminution des traitements hors des traitements obligatoires contre la flavescence dorée. L'utilisation de l'argile, un produit de biocontrôle, pour lutter contre la cicadelle verte a été plébiscitée tandis que pour lutter contre les vers de la grappe, la confusion sexuelle a été choisie avec un traitement de produit de biocontrôle en cas de fortes pressions. Ces deux leviers sont classés dans la substitution. Dans les groupes de viticulteurs du projet DEPHY FERME travaillant sur la réduction de l'emploi des insecticides, la substitution arrive après l'optimisation du pilotage des traitements (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b).

Dans l'ensemble, les leviers mobilisés par les stratégies de protection du vignoble co-construites font partie de l'Efficiencia et de la Substitution. Ces choix effectués par les participants aux ateliers de co-conception sont en accord avec ceux faits par de nombreux viticulteurs (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b). La motivation première est que ces leviers ne demandent pas d'investissements financiers importants et sont peu chronophages (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b) à l'inverse des leviers relevant de la Reconception (R) comme la plantation de cépages résistants. Dans notre cas, deux contraintes avaient été définies lors de la création des stratégies de protection du vignoble. La première était qu'elles devaient utiliser des leviers ayant prouvé leur efficacité dans la réduction de l'utilisation des pesticides tout en assurant une bonne protection de la vigne. La deuxième était qu'elles devaient être facilement mises en place par le plus grand nombre de viticulteurs. Les viticulteurs participants aux ateliers de co-conception ont alors précisé que les leviers mobilisés ne devaient pas engendrer un investissement financier et humain (main d'œuvre et temps de travail) important. De ce fait, les stratégies de protection des vignobles « Raisonné », « 0 Résidu » et « BIO à 2 kg de cuivre » ne sont pas innovantes par rapport aux stratégies expérimentées dans le cadre du projet DEPHY EXPE ECOVITI dans les différents vignobles (Delière et al., 2016) et dans le cadre du projet DEPHY FERME (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b). Cependant, la stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle » apportait une innovation car le choix a été fait de ne pas associer de cuivre aux produits de biocontrôle pour gérer le mildiou et le black rot par rapport aux systèmes viticoles expérimentés dans ces différents projets. Pour finir, les quatre stratégies de protection du vignoble co-construites étaient innovantes par rapport aux pratiques mis en place sur les vignobles concernés (Fronton, Gaillac et Cahors).

## 1.2 Des stratégies de protection du vignoble qui ont permis de réduire l'utilisation des pesticides et en particulier les fongicides

Nous avons confirmé une partie de l'hypothèse 2 selon laquelle les stratégies de protection du vignoble co-construites permettent de réduire l'utilisation de pesticides. En effet, malgré le faible niveau d'innovation par rapport à des projets antérieurs (leviers des catégories Efficiencia et Substitution), l'ensemble des stratégies de protection du vignoble en agriculture conventionnel (« Raisonné », « 0 Résidu » et « Biocontrôle ») a permis de réduire l'utilisation des pesticides par rapport à la stratégie des viticulteurs et à la référence HVE. Cette réduction se traduit par une baisse de l'IFTt. Cependant, l'objectif fixé aux stratégies de protection du vignoble « Raisonné » et « 0 Résidu » de réduction de -50% de l'IFTt par rapport à la référence HVE n'est que rarement atteint. En moyenne, la mise en place des stratégies de protection du vignoble « Raisonné » et « 0 Résidu » a permis une réduction de l'IFTt par rapport à celui de la référence HVE de -32.1% et -42.2% respectivement. Cette réduction est

encourageante en comparant avec les deux projets structurants en France sur la réduction DEPHY EXPE ECOVITI et DEPHY FERME. Dans le projet DEPHY EXPE ECOVITI, la réduction moyenne du IFT par rapport à la référence régionale a été de : -40% dans le vignoble alsacien (Thiollet-Scholtus et al., 2019), -50 % dans le vignoble bordelais (Delière et al., 2018) et -65% dans le vignoble de Gaillac (Serrano et al., 2019). En comparant à leur pratiques, la réduction de l'IFTt est moins importante avec -17.9% pour la stratégie de protection du vignoble « Raisonné » et -29.7% pour « 0 Résidu ». Cela s'explique par le fait que les viticulteurs possèdent un IFTt inférieur à celui de la référence HVE. La réduction est équivalente à celle observée dans le projet DEPHY FERME où les viticulteurs ont réduit en moyenne de -24.4% leur IFTt en 10 ans (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023a).

Pour la stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle », l'IFTt a été réduit de -87,8% par rapport à la référence HVE et de -80.7% par rapport à la conduite du viticulteur.

En agriculture biologique, la stratégie de protection du vignoble « BIO à 2 kg de cuivre » a permis à l'ensemble des viticulteurs de réduire la quantité de cuivre appliquée par rapport à leur stratégie. La limite de 2 kg de cuivre par an et par hectare n'a été dépassée qu'une fois sur 13 au cours des deux années et seulement de 7g, ce qui est négligeable. De ce fait, la stratégie de protection du vignoble « BIO à 2 kg de cuivre » permet de remplir l'objectif de limiter la quantité de cuivre appliquée à 2 kg par an et par hectare qui avait été fixée. Les quantités de cuivre appliquées sont inférieures aux quantités appliquées par les viticulteurs participants au projet DEPHY FERME en 2021 et 2022 (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2021, 2022).

Cette réduction de l'IFTt a été totalement obtenue grâce à une forte diminution de l'IFTf pour les trois stratégies de protection du vignoble en agriculture conventionnelle. Cette réduction a été réalisée grâce à l'utilisation d'un outil d'aide à la décision (DéciTrait®) et à la substitution des pesticides de synthèse par des produits de biocontrôle (non pris en compte dans le calcul de l'IFT). En effet, la réduction de l'utilisation des herbicides et des insecticides n'a pas été mobilisée par les viticulteurs même si, lors des ateliers de co-conception, des stratégies mobilisant des leviers pour les réduire ont été discutées et définies.

### **1.3 Des stratégies de protection du vignoble qui ont permis de maintenir le rendement grâce à une bonne protection de la vigne et de limiter le coût des fongicides**

Nous avons en partie infirmé une partie de l'hypothèse 2 selon laquelle les stratégies de protection du vignoble co-construites peuvent conduire à une plus grande incidence des maladies et donc à une perte de rendement, ainsi qu'à une augmentation du coût des fongicides avec l'utilisation de produits de biocontrôle.

Comme vu précédemment, les stratégies de protection du vignoble ont permis de réduire l'utilisation des pesticides et tout particulièrement, les fongicides. En plus de cet objectif de réduction de l'utilisation des pesticides, les stratégies de protection du vignoble devaient permettre de maintenir le rendement et ne pas engendrer une augmentation du coût de la protection phytosanitaire. À l'exception de la stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle », la réduction de l'IFTt, et tout particulièrement de l'IFTf, n'a pas conduit à une plus grande incidence des maladies et donc à une perte de rendement. En effet, les stratégies de protection du vignoble « Raisonné » et « 0 Résidu » n'ont pas engendré une plus grande intensité d'attaque des maladies sur feuilles et sur grappes à la véraison par rapport à la conduite du viticulteur. Cela a permis de maintenir le rendement en limitant globalement la perte par rapport à la conduite du viticulteur, sous la limite fixée de 10% de perte de

rendement. Ces résultats sont en accord avec ceux observés dans le cadre du projet DEPHY EXPE qui ont montré qu'il est possible de réduire l'utilisation de pesticides sans perdre de rendement (Delière et al., 2018; Serrano et al., 2019; Thiollet-Scholtus et al., 2019). En revanche, le projet DEPHY FERME s'est traduit par une perte de rendement moyenne de 19 % sur 10 ans d'implication dans le groupe, avec des différences entre les régions viticoles (Fouillet et al., 2022). Il faudrait donc vérifier pendant plusieurs années que les résultats prometteurs des stratégies de protection du vignoble « Raisonné » et « 0 Résidu » soient robustes. De plus, la réglementation sur les substances actives ne cesse d'évoluer chaque année entraînant une baisse du nombre de produits disponibles. De ce fait, il y a un réel besoin de toujours anticiper ces retraits pour fournir une solution aux viticulteurs.

La stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle » a donné lieu à un contrôle du mildiou sur feuilles et sur grappes et un contrôle du black rot sur les grappes très variable selon les années et les viticulteurs. La variabilité de l'efficacité des produits de biocontrôle et le manque d'efficacité d'une stratégie de gestion des maladies utilisant uniquement des produits de biocontrôle ont été observés (Zanzotto & Morroni, 2016). L'objectif d'utiliser uniquement des produits de biocontrôle comme fongicides sans cuivre et sans variétés résistantes était très ambitieux. Des études antérieures ont combiné des produits de biocontrôle avec des variétés résistantes (projet DEPHY EXPE ECOVITI, France) ou avec de faibles doses de cuivre (Bleyer et al., 2020; Burgun, 2024), et ont montré de meilleurs résultats en termes de lutte contre les maladies.

Concernant la stratégie de protection du vignoble « BIO à 2 kg de cuivre », le contrôle du mildiou sur feuilles et sur grappes a été très bon et le contrôle du black rot sur grappes a été plus variable selon les viticulteurs. Les deux parcelles les plus touchées appartiennent à deux viticulteurs qui ne sont pas en agriculture biologique. Au travers de leur participation, ils voulaient savoir si une conversion en AB était possible. Comme le notent Merot et al. (2020), une telle transition nécessite une adaptation importante et peut entraîner une augmentation de l'incidence des maladies au cours des premières années.

Les stratégies de protection du vignoble « Raisonnée », « 0 Résidu » et « BIO à 2 kg de cuivre » ont réduit le coût des fongicides de -9.1%, -26.2% et -15,8% respectivement, contrairement à la stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle » qui a augmenté le coût des fongicides de +40.6%. Cette réduction s'explique par la diminution de la quantité de pesticides utilisés qui compense l'utilisation des produits de biocontrôle qui coûtent plus chers que les produits de synthèse. Cet effet compensatoire a été observé dans de nombreuses études portant sur la réduction de l'utilisation des pesticides en viticulture (Delière et al., 2018; Métral et al., 2018; Serrano et al., 2019). Dans le cas de la stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle », l'augmentation du coût des fongicides était prévisible car l'ensemble des fongicides utilisés étaient des produits de biocontrôle.

## 1.4 Des modèles IPSIM-VIGNE qui demandent une phase d'amélioration

Nous n'avons pas pu confirmer l'hypothèse 3 de cette thèse selon laquelle la modélisation IPSIM qualitative et agrégative des dégâts liés aux maladies selon les pratiques, le climat et l'environnement est un outil d'évaluation et de co-conception de stratégies réduisant le recours aux pesticides. En effet, les modèles ont été créés mais à ce stade, ils n'ont pas été utilisés pour évaluer ou concevoir des stratégies réduisant l'utilisation des pesticides.

Au cours de la thèse, un modèle IPSIM a été construit pour les trois maladies qui avaient été ciblées : le mildiou (IPSIM-VIGNE-Mildiou), l'oïdium (IPSIM-VIGNE-Oïdium) et le black rot (IPSIM-VIGNE-Black

rot). Deux modèles sur les trois (IPSIM-VIGNE-Mildiou et IPSIM-VIGNE-Black rot) ont été évalués avec l'utilisation d'une base de données élaborée en grande partie par les données collectées au travers de l'expérimentation des stratégies de protection du vignoble co-conçues. Ce travail de modélisation a permis de faire un état des lieux de la combinaison des facteurs influençant le développement de ces maladies, des différentes interactions qu'ils peuvent avoir entre eux et de leur prévalence sur la sévérité d'attaque des maladies sur les grappes à la véraison. La création de ces modèles IPSIM est une preuve de concept de la faisabilité de simuler la sévérité d'attaque d'une maladie sur les grappes en tenant compte des pratiques culturales d'un viticulteur, des conditions pédoclimatiques et de l'environnement de la parcelle. Cependant, dans le cadre de la thèse, la capacité à simuler le profil de dégâts liés aux principales maladies cryptogamiques (mildiou, oïdium et black rot) au travers de la création du modèle IPSIM-VIGNE n'a pas pu être vérifiée. Cette capacité de prédiction des modèles IPSIM a été prouvée dans le cadre de la thèse de Marie-Hélène Robin (Robin, 2014). On peut donc envisager que le modèle IPSIM-VIGNE (combinaison des trois modèles individuels) pourra aussi y parvenir.

Les modèles IPSIM-VIGNE-Mildiou et IPSIM-VIGNE-Black rot présentent une qualité de prédiction (respectivement de 65% pour IPSIM-VIGNE-Mildiou et de 48% pour IPSIM-VIGNE-Black rot) qui n'est pas suffisante pour envisager une utilisation avec les viticulteurs et les conseillers. Des pistes d'améliorations (voir chapitre 3 de la partie Résultats) sont envisagées pour atteindre une meilleure qualité prédictive. Ces modèles pourraient alors être utilisés comme outil d'évaluation de stratégies suite à leur expérimentation à la ferme (*ex-post*) ou comme outil d'aide à la conception pour concevoir des stratégies de protection du vignoble moins consommatrices de pesticides (*ex-ante*). Cette utilisation des modèles pour accompagner le processus de conception avec des agriculteurs a été de nombreuses fois explorées par le passé (Couderc et al., 2014; Naulleau et al., 2022; Queyrel et al., 2023). Dans un second temps, il est envisageable de mettre à disposition en libre accès et gratuitement le modèle IPSIM-VIGNE sur un site internet comme cela a pu être fait pour le modèle IPSIM-chayote (<https://pvbmt-apps.cirad.fr/apps/ipsim-chayote/>) et IPSIM-Cirsium ([https://shiny.biosp.inrae.fr/app\\_direct\\_i/ipsimcirsium/\\_/?lang=fr](https://shiny.biosp.inrae.fr/app_direct_i/ipsimcirsium/_/?lang=fr)). Cette interface pourrait alors être utilisée par les viticulteurs et leurs techniciens viticoles pour estimer la prise de risque liée à l'itinéraire technique que le viticulteur souhaite mettre en place.

## 2 Retour sur la démarche mise en place et les différentes méthodes utilisées

La démarche mise en œuvre dans cette thèse mobilise trois grands types de méthode d'agronomie systémique : les ateliers de co-conception et de co-évaluation, l'expérimentation à la ferme et la modélisation. Dans cette partie, la discussion est développée en fonction de la pertinence, de la robustesse et de la démarche mise en place dans le cadre de la thèse.

### 2.1 Une démarche pertinente pour répondre aux objectifs fixés

La stratégie méthodologique choisie permet de répondre aux objectifs scientifiques et opérationnels de la thèse.

Tout d'abord, cette démarche a permis de co-construire des stratégies de protection du vignoble permettant de réduire le recours aux pesticides tout en maintenant les rendements et en baissant le

coût des fongicides chez les viticulteurs expérimentateurs sur leur parcelle expérimentale (voir chapitre 2 de la partie Résultats). Cependant, l'objectif de réduction fixé pour les stratégies de protection du vignoble « Raisonné » et « 0 Résidu » n'a pas été atteint (diminution de -50% de l'IFT par rapport à la référence HVE). Les ateliers de co-conception se sont appuyés sur la connaissance et l'expérience des participants et sur l'apport de connaissance grâce aux résultats du projet DEPHY EXPE ECOVITI (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2019). L'apport de connaissances plus innovantes dans les ateliers de co-conception aurait pu être envisagé. Cet apport aurait pu venir d'une traque aux innovations (Salembier, 2019) chez des viticulteurs possédant des IFTs faibles en viticulture conventionnelle ou utilisant une faible quantité de cuivre en agriculture biologique. Ces viticulteurs pourraient être issus des vignobles de la zone d'étude (Gaillac, Fronton et Cahors) et/ou de vignobles possédant des conditions de pressions de bioagresseurs équivalentes ou pire que la zone d'étude comme le Bordelais ou le Gers. Ils pourraient être dans des systèmes de production à fort potentiel de rendement proche de ceux des viticulteurs de VINOVALIE et/ou à l'inverse avec des systèmes de production avec un rendement visé limité. Cet apport de retour d'expérience de ces viticulteurs innovants pourrait se faire en les invitant à participer aux ateliers de co-conception ou au travers de visites sur leur vignoble avec le groupe de participants de l'atelier de co-conception. Ces viticulteurs pourraient être identifiés grâce à leur présence dans ces trois projets. En viticulture, nous avons identifiés deux traques aux innovations intéressantes. La première a été effectuée dans le cadre du projet VITINNOBIO dans lequel un travail de repérage et caractérisation des innovations techniques chez des viticulteurs biologiques en France a été mené (Petit et al., 2019). La deuxième a eu lieu dans le cadre d'un rapport de stage de césure sur les systèmes viticoles innovants diversifiés dans le Sud de la France (Bernard-Michinov, 2023). Actuellement, un travail intéressant est mené au travers du projet VITAE dont un des axes de travail est l'identification des leviers à l'échelle des systèmes de culture et de production viticoles pour permettre d'atteindre le zéro-pesticide. Ce travail s'appuie sur des entretiens semi-directifs avec des viticulteurs de tous les grands bassins viticoles français ainsi que sur des suivis parcellaires (Mauguin & Monod, 2024). Nous pourrions contacter certains des viticulteurs interrogés.

Ensuite, cette démarche a été pertinente pour recruter des viticulteurs coopérateurs qui n'étaient pas nécessairement innovants dans leur pratique de traitement et qui ne réduisaient pas naturellement leur utilisation des pesticides par rapport aux viticulteurs de leur vignoble. Elle a permis de mettre les viticulteurs au centre de la réflexion au travers des actions collectives comme les ateliers de co-conception ou des actions individuelles comme l'entretien individuel annuel de la campagne. Cette démarche a répondu à l'objectif de mise en expérimentation chez les viticulteurs de ces stratégies de protection du vignoble sans investissement (achat de matériel, plantation par exemple) et sans bouleversement important de l'organisation du viticulteur (augmentation du temps de travail, observation terrain par exemple).

Puis, la démarche de la thèse a permis le transfert en 2023 à plus grande échelle de la stratégie de protection du vignoble « 0 Résidu » au sein des exploitations des viticulteurs participants à l'étude et chez d'autres viticulteurs de la coopérative. Lors des deux années d'expérimentation (2021 et 2022), la stratégie de protection du vignoble « 0 Résidu » avait donné de très bons résultats sur l'ensemble des parcelles d'expérimentation. Au cours de l'hiver 2022-2023, le choix a été fait par la direction et le conseil d'administration de VINOVALIE de mettre un démonstrateur sur plusieurs hectares chez des volontaires. L'objectif de ce démonstrateur était d'étudier les performances de cette stratégie de protection du vignoble sur d'autres cépages, des modes de tailles différents (taille rase de précision) et des objectifs de production différents (IGP à 90 hl/ha ou 120 hl/ha). Ce besoin d'observation des performances dans d'autres conditions que celles des parcelles d'expérimentation mises en place dans le cadre de la thèse s'explique par l'impact de ces facteurs sur le développement des maladies (e.g

sensibilité des cépages aux maladies). Malheureusement, l'année 2023 a été une année avec une pression mildiou historique qui restera dans les annales comme l'exprime le BSV bilan 2023 de Gaillac suivi par une période caniculaire fin août. Ces deux phénomènes ont engendré des pertes de récolte sur l'ensemble du vignoble de Gaillac (Carretier, 2023). Fronton et Cahors ont été tout autant impactés par les mêmes phénomènes. Les parcelles du démonstrateur n'ont pas été épargnées ce qui a eu l'effet de freiner la dynamique de déploiement de la stratégie de protection du vignoble « 0 Résidu ». Cette expérience montre l'impact positif que peut avoir le travail mené avec un collectif de viticulteurs (ici la coopérative VINOVALIE) pour enclencher une dynamique de changement de pratique mais aussi que l'appréciation du risque associé à ce changement doit être au maximum pris en compte dans le déploiement. Pour se faire, une proposition d'un accompagnement efficace des viticulteurs pour allier réduction de l'utilisation des pesticides et atteinte des objectifs de production est faite dans la partie suivante. Indépendamment d'un transfert collectif organisé par la coopérative VINOVALIE, comme ce fut le cas pour la stratégie de protection du vignoble « 0 Résidu », il serait intéressant d'étudier si les viticulteurs ont adopté ces stratégies de protection du vignoble en totalité ou en partie dans 5-10 ans. Par exemple, l'adoption de certains leviers d'efficacité et de substitution a été effectuée dans les fermes DEPHY FERME sur un temps plus important d'environ une dizaine d'années (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023a). L'appropriation par les viticulteurs de ces nouvelles stratégies de protection du vignoble demande un temps beaucoup plus long que le temps de réalisation d'une thèse.

Enfin, la démarche devait permettre la création de modèles IPSIM pour une utilisation lors des ateliers de co-évaluation comme outil d'évaluation *ex-post* des systèmes testés et lors d'un atelier de co-conception en dernière année comme outil d'aide à la conception *ex-ante* des prochaines/futures stratégies de protection du vignoble. Durant la thèse, le travail concernant la modélisation a été consacré à la création des modèles indépendants pour les trois maladies, la création de la base de données pour l'évaluation (la majorité des données venant de la mise en place des stratégies co-construites de protection du vignoble) et l'évaluation de deux modèles sur les trois. Malheureusement, les modèles n'ont pas pu être utilisés, comme prévu au départ, lors des différents types d'ateliers car leur qualité prédictive n'était pas suffisamment élevée. Cette non réalisation s'explique par un manque de temps consacré à la modélisation tout au long de la thèse. Précédemment les thèses incluant la création de modèles IPSIM ont été totalement orientées sur la modélisation (Demestihis, 2017; Robin, 2014; Vedy-Zecchini, 2020) ce qui n'était pas le cas de ma thèse. Dans mon cas, il aurait peut-être fallu se consacrer à une seule maladie qui aurait pu être le mildiou pour pouvoir développer, évaluer et utiliser le modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou dans les différents ateliers. Je pense que cette focalisation sur une maladie aurait permis d'obtenir un modèle IPSIM-VIGNE-Mildiou optimisé et prêt à l'emploi pour les utilisateurs au bout de la thèse.

## 2.2 Une démarche robuste mais comportant des limites

La démarche suivie est robuste dans sa capacité à fournir des résultats proches de ceux obtenus dans le cadre de la thèse mais avec certaines limites.

Tout d'abord, l'expérimentation à la ferme s'est traduite par la mise en place d'un réseau de parcelles composé d'une parcelle d'expérimentation chez plusieurs viticulteurs dans différentes conditions de production. Le maillage effectué a permis d'appréhender les différents contextes de production de la coopérative VINOVALIE. Cependant, les résultats obtenus sont sur des parcelles en AOP avec un objectif de rendement de 50-60 hl/ha et en taille classique (guyot ou cordon de royat) et sur un seul cépage par vignoble. Ces caractéristiques du réseau de parcelles ne permettent pas de conclure sur le déploiement des stratégies de protection du vignoble sur d'autres cépages, des modes de tailles

différents comme la taille rase de précision et des objectifs de production (IGP à 90 hl/ha ou 120 hl/ha). De plus, la mise en place des stratégies de protection du vignoble sur une seule parcelle chez chaque agriculteur, donc sur une surface limitée, a permis de réduire les fongicides mais pas les herbicides et les insecticides. Pour réduire les herbicides, le désherbage mécanique sous le rang de vigne avait été sélectionné comme levier. Pour le mettre en place, il faut posséder des outils comme les lames intercepts et les disques émotteurs. Les viticulteurs n'étaient pas équipés de ces outils et ne voulaient pas investir pour expérimenter sur une petite surface.

Ensuite, la réussite de cette démarche est dépendante du public touché car elle demande un engagement et une motivation de la part des viticulteurs pour y participer et mettre en place l'expérimentation à la ferme. Un des risques de cette démarche est l'abandon des viticulteurs en cours de campagne ou à la fin d'une année. Pour limiter ce risque, le recrutement s'est fait par le volontariat et le choix a été fait de ne pas insister fortement pour que les viticulteurs participent. Les viticulteurs qui ont participé à la démarche n'étaient pas des viticulteurs innovants avec des pratiques équivalentes à celles mises en place dans le vignoble. Cette caractéristique permet d'envisager que la démarche peut être mise en place avec de nombreux groupes d'agriculteurs.

Pour finir, cette démarche a été conduite avec la réglementation actuelle sur les produits phytosanitaires. Certes, les stratégies de protection du vignoble ne précisent pas les produits à utiliser mais leur mise en place a été faite avec l'ensemble des substances actives disponibles sur le marché. Aujourd'hui, la volatilité des retraits des molécules est très forte et peut parfois être difficilement anticipable. Dans notre cas, le retrait du métiram à partir de la campagne 2025 a été connu au début de l'année 2022. Cela nous a permis de l'anticiper et de ne pas l'utiliser sur les parcelles d'expérimentation dès 2022. A l'inverse, la classification de la substance active fluopicolide en CMR à partir de 2024 n'a été connue que lors de l'hiver 2023-2024, ce qui ne nous a pas permis d'anticiper son retrait et il a été utilisé sur les parcelles d'expérimentation. L'expérimentation des stratégies de protection du vignoble demande plusieurs années pour appréhender leurs performances en fonction de différents niveaux de pression des bioagresseurs. Le risque est donc d'expérimenter des stratégies avec certains produits qui ne pourraient pas être mises en place chez les viticulteurs à la fin de l'expérimentation car ces produits ont été retirés du marché. Pour limiter ce risque, une adaptation annuelle des stratégies de protection du vignoble en fonction des résultats de l'année passée et en prenant en compte les connaissances du moment sur le futur retrait de substances actives semble une bonne solution.

## 3. Perspectives

### 3.1 Deux axes de travail pour atteindre l'objectif de réduction des pesticides fixé aux stratégies de protection du vignoble « Raisoné » et « 0 Résidu »

Pour envisager de remplir l'objectif de réduction de -50% de l'IFTt par rapport à la référence HVE concernant les stratégies de protection du vignoble « Raisoné » et « 0 Résidu », deux axes de travail sont envisageables : réduire l'utilisation des insecticides et des herbicides ou réduire encore plus les fongicides.

Le premier axe de travail serait de garder les stratégies de protection du vignoble « Raisoné » et « 0 Résidu » telles que définies dans cette thèse et de mobiliser les leviers choisis lors des ateliers de co-conception pour réduire l'utilisation des herbicides et des insecticides. Pour les insecticides,

L'utilisation de l'argile s'oppose à une crainte de la part des viticulteurs sur la casse des pompes du pulvérisateur tandis que la confusion sexuelle fait face à un frein financier (Contrat de solutions, 2024). En effet, elle coûte plus chère à l'hectare que l'utilisation d'insecticides à cause des insecticides obligatoires contre la flavescence dorée qui permettent de gérer aussi les vers de la grappe (Contrat de solutions, 2024). Pour encourager la mise en place de cette dernière, une incitation financière peut être de nouveau envisagée pour encourager les non pratiquants comme cela a été fait dans le Tarn (Viguès & Massol, 2018). De plus, des innovations technologiques sur la confusion qui pourraient inciter les viticulteurs sont arrivées ou vont arriver sur le marché comme les diffuseurs biodégradables, les puffers et la pulvérisation des phéromones. Pour encourager l'utilisation de l'argile, des discussions avec des utilisateurs convaincus comme des viticulteurs en agriculture biologique pourraient être envisagées pour évoquer l'efficacité de l'argile et la stratégie d'application mais aussi le sujet de la peur de la casse mécanique. En plus, des formations pourraient être mise en place sur la diversité des produits disponibles sur le marché et sur la bonne application de l'argile grâce au bon réglage du pulvérisateur et au bon dosage de l'argile pour éviter les problèmes techniques.

Concernant la réduction des herbicides, les freins sont d'ordre organisationnels et financiers. En effet, comme évoqué précédemment, le désherbage mécanique, premier levier mobilisé pour réduire le recours aux herbicides (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2023b), demande une réorganisation du travail et engendre régulièrement une augmentation du temps de travail (F. Jacquet et al., 2019). Une solution pourrait être la gestion mixte des adventices sous le rang qui combinerait le désherbage mécanique et les herbicides.

Le deuxième axe de travail est de retravailler les stratégies de protection du vignoble contre les maladies en mobilisant d'autres leviers pour envisager une réduction plus importante de l'IFTf au travers de nouveaux ateliers de co-conception. Tout d'abord, un état des lieux sur les pratiques relevant de la prophylaxie mis en place par les viticulteurs pourrait être réalisé. Suite à cet état des lieux, nous pourrions envisager de plus la mobilisée que ce qu'elle est déjà par les viticulteurs pour limiter la quantité d'inoculum primaire. Concernant le black rot, le retrait des rafles momifiées semble être efficace pour diminuer l'intensité d'attaque de l'année suivante (Chambres d'agriculture Auvergne- Rhône-Alpes/ Occitanie/ Corse/ Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2022). La prise en compte de la qualité de pulvérisation serait un axe majeur pour optimiser l'application des produits. En effet, il pourrait y avoir un réglage des pulvérisateurs en début de campagne puis des tests de pulvérisation en cours de campagne pour évaluer la qualité de pulvérisation et envisager des modifications de réglages si besoin. Ensuite, la place des produits de biocontrôle pourrait être plus importante en combinaison avec le cuivre comme réalisé dans le projet BEE (Burgun, 2024). Enfin, pour envisager une importante réduction de l'utilisation des fongicides, le levier « cépages résistants » de la catégorie Reconception (cadre ESR) semble être une orientation à prendre. En effet, les cépages résistants permettent de réduire de -87% à -95% l'IFTf selon les années par rapport à la référence nationale 2016 (Miclou et al., 2022). Cette réduction doit se faire de manière raisonnée car ces cépages ne sont pas résistants au black rot mais certains possèdent une tolérance à cette maladie. Leur plantation doit être réfléchi car leur présence est limitée par les cahiers des charges des AOP (Perrot, 2024) et l'ancrage des cépages traditionnels est fort dans la consommation de vin. Actuellement, les viticulteurs de l'aire géographique étudiée (Gaillac, Fronton et Cahors) ne peuvent valoriser les cépages résistants qu'au travers de l'IGP « Comté Tolosan » ou en Vin de France.

## 3.2 Un accompagnement efficace des viticulteurs pour allier réduction de l'utilisation des pesticides et atteinte des objectifs de production

La démarche mise en place dans le cadre de la thèse a permis d'accompagner les viticulteurs en alliant réduction de l'utilisation des pesticides et quasi-atteinte des objectifs de production. Cependant, elle est très coûteuse en termes de temps et de main-d'œuvre pour les viticulteurs et la coopérative. En effet, il n'est pas possible financièrement d'avoir un technicien viticole pour suivre une vingtaine de viticulteurs et quelques parcelles. A l'échelle d'une coopérative, il est courant d'avoir un technicien viticole pour une soixantaine de viticulteurs et environ 900 hectares.

Pour permettre un accompagnement efficace des viticulteurs combinant réduction de l'utilisation des pesticides et atteinte des objectifs de production, une combinaison entre la démarche mise en place dans le cadre de la thèse avec des améliorations (Figure 34) et un accompagnement personnalisé des viticulteurs serait un bon compromis.

### 3.2.1 Une démarche collective en plusieurs étapes pour une adoption des nouvelles pratiques efficace et durable dans le temps

Comme évoqué précédemment, la mise en place d'une seule parcelle d'expérimentation chez un viticulteur n'est pas une maille suffisante pour explorer la diversité de cépages, de parcelles et de modes de production dans une exploitation. Pour envisager un changement d'échelle et l'engagement dans la réduction de l'utilisation des pesticides d'un nombre plus important de viticulteurs et de parcelles, la démarche mise en œuvre dans le cadre de la thèse pourrait être accompagnée d'autres dispositifs : évaluation de nouvelles solutions en station d'expérimentation et groupes 30 000 (Figure 34).

Tout d'abord, la démarche (observatoire piloté dans la Figure 34) garderait la même organisation (atelier de co-conception, expérimentation à la ferme et atelier co-évaluation annuel) et elle pourrait accueillir le même nombre de viticulteurs expérimentateurs, environ 25. Le seul changement serait la modification de l'unité expérimentale qui ne serait plus une parcelle mais un îlot de 5-10 hectares composé de plusieurs parcelles (une parcelle est une combinaison entre un cépage et un mode de production) avec une pluralité de cépages et de modes de production offrant une représentativité des différentes situations rencontrées sur l'exploitation. De plus, cette augmentation de surface de l'unité expérimentale permettrait de mobiliser des leviers pour réduire les herbicides via l'investissement dans des outils de désherbage mécanique et pour réduire les insecticides en installant la confusion sexuelle. L'engagement des viticulteurs expérimentateurs serait sur trois années, ce qui permettrait d'évaluer les stratégies avec différentes conditions climatiques et d'effectuer des ajustements en fonction de leur efficacité comme c'était déjà le cas. Au bout des trois ans d'expérimentations, une présentation des résultats au travers différentes réunions serait effectuée aux groupes 30 000 présents sur les bassins viticoles (Chambre régionale d'Agriculture d'Occitanie et équipe du SRAL & DRAAF Occitanie, 2020). Cette présentation permettrait d'effectuer un nouveau recrutement de viticulteurs expérimentateurs qui intégrerait le réseau de l'observatoire piloté pour expérimenter les stratégies à l'échelle de 5-10 hectares. En parallèle, les viticulteurs expérimentateurs de la première génération pourraient déployer la stratégie de réduction de l'utilisation des pesticides sur l'ensemble de leur exploitation. Le pas de temps envisagé serait d'environ 5 ans (au lieu de 3 ans dans le cadre de la thèse) pour permettre une adoption des nouvelles pratiques efficace et durable dans le temps. L'objectif de cette démarche est d'utiliser l'effet « boule de neige » au travers des visites des essais et des échanges

entre les viticulteurs pour convaincre les viticulteurs qui se trouvent encore en dehors de la démarche de réduction de l'utilisation des pesticides. Les agriculteurs expérimentateurs seraient les ambassadeurs et le moteur du changement des pratiques au sein du territoire comme ce fut le cas dans la transition agroécologique qui a lieu dans le territoire de la Borborema dans le Semi-aride brésilien (Piroux et al., 2010).

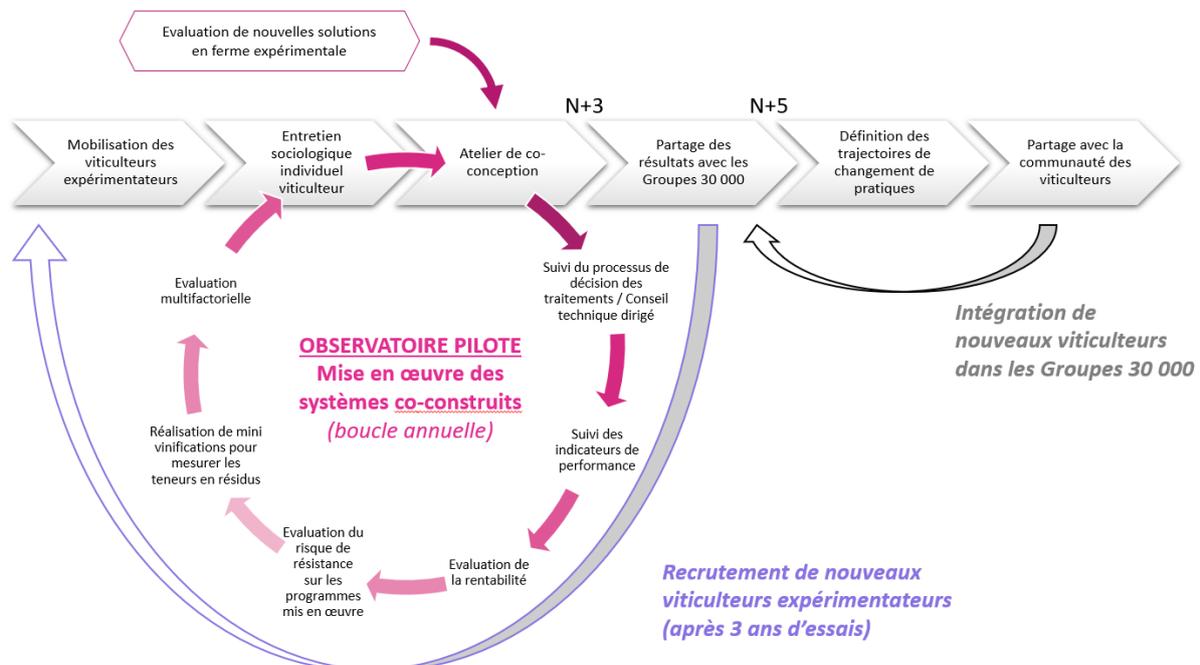


Figure 34 : Démarche envisagée pour un déploiement à plus grande échelle des stratégies de réduction de l'utilisation des pesticides.

Pour les inciter à réduire leur utilisation de pesticides, une incitation financière significative par le biais d'une « prime de risque de production » semble nécessaire (Chèze et al., 2019). Cette incitation pourrait venir de la mise en place d'un système d'assurance couvrant le risque de dommages aux cultures dus aux maladies cryptogamiques lié à la réduction des intrants phytosanitaires, tel que proposé par Raynal et al. (2022), pourrait contribuer à encourager la réduction de l'utilisation des pesticides. Cette « assurance récolte » pourrait être mise en place lors des trois premières années durant laquelle le viticulteur est considéré comme étant un viticulteur expérimentateur pour permettre un engagement plus serein.

### 3.2.2 Un accompagnement personnalisé des viticulteurs faisable à l'échelle d'une coopérative

En parallèle de la démarche développée en 3.2.1, un accompagnement technique personnalisé des viticulteurs peut être envisageable à l'échelle d'une coopérative. La coopérative VINOVALIE a interdit l'utilisation des fongicides CMR depuis 2019. Suite à une année 2023 sur la gestion du mildiou qui a engendré une perte récolte conséquente et le retrait de la molécule active métirame (fongicide de contact contre le mildiou et le black rot), le conseil d'administration de VINOVALIE a décidé de réautoriser de manière dérogatoire deux molécules CMR présentes dans des fongicides de contact contre le mildiou et le black rot : le folpel et le dithianon. Les viticulteurs ont fait cette demande de réautorisation pour avoir une meilleure diversité de substances actives disponibles par crainte

d'apparition de cas de résistances du mildiou et du black rot. Cette crainte se justifie car la majorité des substances actives disponibles pour la viticulture française sont des unisites (un seul site d'action de la substance active dans le champignon) qui sont soumises à des cas de résistances tandis que les substances multisites non soumises à des cas de résistances sont peu disponibles sur le marché : cuivre, dithianon, folpel, métirame (interdit à partir 2025) et soufre (IFV et al., 2024). Une des recommandations qui est faite est de combiner les modes d'action tout au long de la campagne et d'utiliser les substances actives non soumises aux résistances, substances multisites et phosphonates, en complément des molécules unisites (IFV et al., 2024). Pour anticiper le retrait des substances actives dans les années à venir, le projet PARSADA est en train de se structurer pour travailler sur le mildiou et le black rot de la vigne car l'ensemble des substances actives multisites efficaces à ce jour contre le mildiou et l'ensemble des molécules actives efficaces contre le black rot sont sur la sellette (Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire, 2023).

Cette demande a été accompagnée du souhait d'être mieux suivi sur la protection phytosanitaire tout au long de la campagne. L'équipe technique et R&D de la coopérative VINOVALIE a décidé de retravailler l'accompagnement des viticulteurs durant l'hiver 2023-2024 pour répondre à cette demande. L'objectif était d'améliorer le conseil sur la protection phytosanitaire pour allier réduction de l'utilisation des pesticides et atteinte des objectifs de production tout en utilisant le moins possible les produits CMR réautorisés. Pour se faire, il a fallu prendre en compte l'ensemble des informations sur une situation donnée pour effectuer le meilleur choix. Ces informations sont multiples : la prévision météorologique et le risque de contamination associé, la présence ou non de symptômes sur les parcelles, les objectifs de production et l'organisation propre à chaque viticulteur. Cette nouvelle organisation permet aujourd'hui de suivre l'ensemble des viticulteurs tout au long de la campagne phytosanitaire. Elle est axée sur un suivi terrain renforcé et l'utilisation d'outils pour avoir des données précises.

Le suivi est géré par l'équipe technique de VINOVALIE composé des techniciens viticoles et du responsable viticole et de l'équipe R&D de VINOVALIE composée du chef de projet sur la réduction de l'utilisation des pesticides et le responsable des démarches environnementales. Ce nouveau suivi a été anticipé en choisissant avec les viticulteurs des parcelles de référence de suivi au sein de leur exploitation. L'objectif est qu'un suivi hebdomadaire tout au long de la campagne soit effectué sur ces parcelles pour permettre une surveillance de la pression au sein de chacune des exploitations. Ce suivi se matérialise concrètement par un aller-retour sur la parcelle. Ces parcelles sont choisies car ce sont des parcelles soit à historique maladie fort soit parce qu'elles sont représentatives du vignoble avec des objectifs de production bien définis. Par exemple, les parcelles à fort potentiel de rendement conduit en taille rase plus sensibles aux maladies sont particulièrement suivies. En plus, le suivi de témoin à non traité (TNT) qui était déjà mis en place sur chaque vignoble est poursuivi. Ces TNT permettent un maillage du vignoble pour estimer la pression en maladies sans traitement. Ces deux types de suivi permettent d'estimer la pression des maladies sur l'ensemble du vignoble. Depuis plusieurs années, la coopérative VINOVALIE a accompagné ses viticulteurs dans l'investissement de station météo connectée permettant un maillage de l'ensemble des trois vignobles. Les viticulteurs ont positionné en plus des pluviomètres pour mailler leur vignoble permettant un rendu réel de la pluviométrie tombée sur les différents îlots de parcelles. En plus de ces stations météo connectées et des pluviomètres, VINOVALIE a investi dans l'achat de licence d'outils de décision permettant de suivre et de prédire les risques de contamination liés aux différentes maladies. Aujourd'hui, VINOVALIE utilise l'OAD DéciTrait® de l'IFV et chaque année, d'autres OAD sont testés pour permettre une amélioration du conseil phytosanitaire auprès des viticulteurs qui sont de plus en plus familiers avec ces outils. L'utilisation des OAD est réalisée par le chef de projet sur la réduction de l'utilisation des pesticides car les viticulteurs ne les utilisent pas en autonomie. Une réunion téléphonique hebdomadaire est faite

avec l'ensemble de l'équipe. Tout d'abord, un point sur les observations terrain est réalisé par chacun des techniciens viticoles puis un point sur les prévisions météorologiques et les informations fournies par les OAD est effectué par le chef de projet sur la réduction de l'utilisation des pesticides. Ces deux points donnent lieu à une discussion sur les préconisations de traitements pour la semaine à venir. Le responsable des démarches environnementales rédige un bulletin de préconisation global aux trois vignobles et les techniciens viticoles le personnalisent avec les observations concernant chacun des vignobles.

Le lien avec les viticulteurs se fait en priorité au travers d'échanges téléphoniques (appels ou messages). Le suivi des parcelles de référence donne lieu à un compte-rendu qui est envoyé au viticulteur concerné permettant le début d'une discussion sur le choix du positionnement et des produits du prochain traitement à effectuer selon la présence ou l'absence de symptômes de maladie et le risque de contamination future. En plus de ce point téléphonique hebdomadaire avec les viticulteurs, au sein du vignoble de Gaillac, une réunion hebdomadaire animée par le technicien viticole rassemblant une vingtaine de viticulteurs continue d'être organisée sur la réflexion des traitements. Sur les deux autres vignobles, cette réunion n'a pas lieu car les viticulteurs n'en ont pas émis le souhait. Cela montre bien la problématique et le besoin de s'adapter aux viticulteurs auquel nous avons à faire car il n'existe pas une solution unique. Certains viticulteurs ont besoin de conseils plus importants et d'autres sont plus autonomes sur les choix qu'ils peuvent faire au niveau des traitements. L'autonomie de certains viticulteurs n'empêche pas un suivi et un appel téléphonique hebdomadaire car ils ont des plannings chargés et donc ils peuvent de temps en temps passer à côté du risque de contamination ou au contraire envisager un traitement qui n'est pas nécessaire selon la pression qui peut exister dans le vignoble.

### **3.3 Un besoin de valoriser les démarches de réduction des pesticides auprès du consommateur pour une valorisation des efforts des viticulteurs et pour rechercher une meilleure valorisation commerciale pour la coopérative**

Le changement de pratiques de la part des viticulteurs demande une réelle motivation et des investissements économiques qui peuvent être non négligeables. L'effort qui est consenti par les viticulteurs pour réduire l'utilisation des pesticides doit être valorisé pour ne pas décourager les viticulteurs et cette valorisation peut permettre à la coopérative d'envisager une différenciation commerciale sur le marché.

Tout d'abord, un des risques de la non valorisation est le découragement des viticulteurs s'ils réalisent que cet effort n'est pas valorisé par des communications positives. En effet, les agriculteurs prennent différentes décisions en fonction de facteurs économiques (coûts, bénéfices) et de facteurs psychologiques et sociaux comme par exemple une volonté d'avoir de la reconnaissance sociale. Par exemple, le choix d'interdire les fongicides CMR à ses coopérateurs qu'à fait la coopérative VINOVALIE n'a pas été communiqué et valorisé. A l'inverse, d'autres coopératives ayant fait le même choix ont décidé de communiquer comme la coopérative TUTIAC (Abellan, 2019) et la coopérative LES VIGNERONS DE BUZET (Philippe, 2019). Ce choix a été contraignant pour les viticulteurs car ces produits étaient fortement utilisés. Les viticulteurs ont dû s'adapter en utilisant d'autres produits qu'ils n'avaient pas l'habitude d'utiliser. La non valorisation de cette amélioration des pratiques a eu l'effet de décourager les viticulteurs et de faire monter la contestation de ce choix. Un des arguments avancés

par les viticulteurs contestataires était : « Nous sommes contraints de ne pas utiliser les fongicides CMR alors que nos concurrents les utilisent et cela n'est même pas valorisé ».

La valorisation auprès des consommateurs est un moyen pour une coopérative de se différencier et d'envisager une meilleure valorisation commerciale. Lors de l'acte d'achat, une partie des consommateurs est attentive à des vins plus respectueux de l'environnement (Schäufele & Hamm, 2017). En France, 51% des consommateurs de vins prennent le temps de regarder si la bouteille comporte une certification environnementale pour un gage de qualité et de respect de l'environnement et 48% des répondants sont prêts à payer plus cher pour un vin labellisé (SOWINE & Dynata, 2024). Plusieurs études ont confirmé l'intérêt des consommateurs à un consentement à payer plus important pour des vins avec des pratiques environnementales mises en place par les viticulteurs comme la réduction du nombre de traitements et de la quantité de résidus de pesticides dans les vins (Fuentes Espinoza et al., 2018), la bonne gestion de l'eau (Pomarici et al., 2018), et le respect de la biodiversité (Mazzocchi et al., 2019). Le consentement à payer correspond au prix maximal qu'un consommateur consent à payer pour un bien (Gall-Ely, 2009). Cependant, dans le baromètre de SOWINE et DYNATA, 48% des consommateurs expriment que le premier frein à l'achat de vin labellisé est le prix trop élevé de ces derniers et le second est la méconnaissance des labels (SOWINE & Dynata, 2024). En effet, le label Agriculture Biologique est de loin le label le plus connu tandis que les autres labels sont connus par moins d'un français sur deux (SOWINE & Dynata, 2024). Ces deux informations montrent l'importance de proposer un prix proche du consentement à payer des consommateurs pour les vins certifiés et la problématique d'arriver à faire passer l'information aux consommateurs. Dans une récente étude en France, 60% des consommateurs déclarent être intéressés pour avoir des informations sur les pratiques viticoles et leur effet sur l'environnement (Ugalde, 2021). Cette communication doit être plutôt axée sur l'apport des pratiques environnementales sur la biodiversité et la santé humaine que sur les moyens mis en place (Ugalde, 2021). L'étiquette et la contre-étiquette de la bouteille pourraient être le premier vecteur de cette communication pour les pratiques environnementales et leurs impacts. Cette communication pourrait être réalisée directement au travers de texte et de logos mais aussi via le biais d'un QR-code présent sur la contre-étiquette qui renverrait à une présentation des pratiques environnementales et leurs résultats. Les stratégies de protection du vignoble sont différentes sur les résultats des pratiques environnementales attendues donc la communication doit être adaptée. Pour la stratégie de protection du vignoble « Raisonné » (IPM), une valorisation de la réduction de l'utilisation des pesticides en général et l'interdiction de certains pesticides comme ceux classés CMR pourraient être un axe de communication. Concernant la stratégie de protection du vignoble « 0 Résidu » (ORES), une mention concernant la réduction de la présence de résidus de pesticides dans le vin voire leur absence pourrait être mentionnée. Au sein de la coopérative VINOVALIE, une tentative de valorisation de cette stratégie de protection du vignoble a été initiée à partir de 2021 avec la sortie de la gamme Pur&quilibre (Figure 35) labellisé Zéro Résidu de Pesticides, un label privé créé en 2018 à l'initiative du collectif nouveaux champs (Vinovalie, 2022). Malheureusement, l'ambition de développement (vente insuffisante) de cette gamme et la valorisation commerciale envisagée n'ont pas été au rendez-vous (obligation de baisser le prix de vente pour réussir à la commercialiser chez les distributeurs). La stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle » (BCT) est plus compliquée à valoriser car son impact ne conserve que les fongicides mais une mention sur l'utilisation stricte de fongicides d'origine naturelle pourrait être envisagée. Pour finir, la stratégie de protection du vignoble « BIO à 2 kg de cuivre » (ORG2kgCu) serait naturellement valorisé au travers de la certification en Agriculture Biologique mais une communication sur les impacts positifs de cette conduite pourrait accompagner le vin comme la non utilisation des pesticides de synthèse et l'interdiction des herbicides qui favorise la biodiversité. Ces différentes mentions doivent être soigneusement choisies pour éviter de tomber dans du greenwashing qui serait contreproductif

en renforçant la méfiance des consommateurs comme l'évoque Ugalde (2021) en conduisant une démarche participative avec des consommateurs et des viticulteurs pour améliorer le déploiement des pratiques environnementales dans les vignobles : étude de cas au sein du Cabernet d'Anjou.



Figure 35 : Pur&quilibre, gamme Zéro résidu de Pesticides de Vinotalie - IGP Comté Tolosan (Vinovalie, 2022).

# Conclusion générale

Le travail réalisé dans cette thèse avait pour objectif d'accompagner des viticulteurs dans la réduction de l'utilisation des pesticides. Dans le même temps, un autre objectif de la thèse était de développer et d'évaluer les modèles qualitatifs de simulation des dégâts IPSIM pour trois maladies de la vigne (mildiou, black rot et oïdium).

Pour accompagner les viticulteurs dans la réduction de l'utilisation des pesticides, une démarche participative originale combinant des ateliers de co-conception, des expérimentations à la ferme et des ateliers de co-évaluation impliquant différentes parties prenantes dont les viticulteurs a été conduite avec un groupe de viticulteurs du Sud-Ouest de la France. Les ateliers de co-conception ont permis la construction de quatre stratégies de protection du vignoble dont trois en agriculture conventionnelle et une en agriculture biologique avec chacune un objectif de réduction de l'utilisation des pesticides identifié dans un cadre contraint qui était d'envisager un déploiement rapide de ces stratégies de protection du vignoble par les viticulteurs et de limiter l'impact sur la quantité et qualité de la vendange. Par la suite, un groupe de viticulteurs a mis en place ces stratégies de protection du vignoble durant deux années (2021 et 2022) et différentes données ont été collectées pour évaluer leurs performances.

Les quatre stratégies de protection du vignoble co-conçues ont permis de réduire l'utilisation des pesticides et plus particulièrement les fongicides. En effet, les viticulteurs n'ont pas mis en place les leviers sélectionnés pour réduire les herbicides et les insecticides. Cette réduction ne s'est pas faite au détriment de la qualité de la protection de la vigne. Les stratégies de protection du vignoble sauf la stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle » (n'autorisant que des produits de biocontrôle en fongicide) ont permis de maintenir le rendement par rapport à la stratégie de protection du vignoble des viticulteurs tout en limitant les dégâts des maladies. De plus, à part la stratégie de protection du vignoble « Biocontrôle », elles n'ont pas engendré une augmentation du coût des fongicides. De ce fait, les viticulteurs sont satisfaits dans l'ensemble des performances des stratégies de protection du vignoble sauf pour la stratégie « Biocontrôle ». Cependant, ils sont frileux à l'idée de les mettre en place sur l'ensemble de leur exploitation car elles n'ont pas été expérimentées dans d'autres conditions que des parcelles en AOP et aussi ils seraient rassurés d'avoir une assurance qui pourrait couvrir une perte de rendement liée à des conditions météorologiques non maîtrisables sans certaines molécules.

La démarche mise en œuvre a permis d'accompagner les viticulteurs dans la réduction de l'utilisation des pesticides. Toutefois, afin de savoir si cette démarche permettrait l'adoption durable de ces stratégies de protection du vignoble par les viticulteurs, il serait intéressant de faire analyse des transitions dans 5 à 10 ans comme réalisé par Fouillet et al. (2024).

Ce travail de thèse a également contribué à développer trois modèles IPSIM pour chacune des maladies ciblées : le mildiou, le black rot et l'oïdium, initialement prévus pour être mobilisés dans des ateliers de co-évaluation. Deux d'entre eux (mildiou et black rot) ont pu être évalués avec une base de données composée en majorité de données provenant de la mise en place des quatre stratégies de protection du vignoble par les viticulteurs. L'évaluation de la qualité prédictive de ces deux modèles est encourageante mais des améliorations concernant les tables d'agrégation doivent être réalisées avant une utilisation par les viticulteurs et leurs conseillers. Il serait intéressant de poursuivre ce travail de modélisation et d'étudier la possibilité d'intégration de ces modèles IPSIM dans un processus de réduction de l'utilisation des pesticides.

Pour la coopérative VINOVALIE, ce travail de thèse a permis d'explorer des stratégies de protection du vignoble transférables à ses coopérateurs et valorisables commercialement (Pur&quilibre, gamme Zéro résidu de Pesticides de VINOVALIE). Il a aidé à améliorer l'accompagnement technique des viticulteurs et à lancer une dynamique d'expérimentation à la ferme qui est appréciée par les viticulteurs.

# Références bibliographiques

- Abellan, A. (2019). *Tutiac s'interdit les CMR et vise le 0 résidu phytos*. <https://www.vitisphere.com//actualite-89471-tutiac-sinterdit-les-cmr-et-vise-le-0-residu-phytos.html>
- Acquavella, J., Olsen, G., Cole, P., Ireland, B., Kaneene, J., Schuman, S., & Holden, L. (1998). Cancer among Farmers : A Meta-Analysis. *Annals of Epidemiology*, 8(1), 64-74. [https://doi.org/10.1016/S1047-2797\(97\)00120-8](https://doi.org/10.1016/S1047-2797(97)00120-8)
- Agrios, G. N. (2005). *Plant Pathology*. Elsevier.
- Aka, J., Ugaglia, A. A., & Lescot, J.-M. (2018). Pesticide Use and Risk Aversion in the French Wine Sector. *Journal of Wine Economics*, 13(4), 451-460. <https://doi.org/10.1017/jwe.2018.55>
- Ali, S., Ullah, M. I., Sajjad, A., Shakeel, Q., & Hussain, A. (2021). Environmental and Health Effects of Pesticide Residues. In Inamuddin, M. I. Ahamed, & E. Lichtfouse (Éds.), *Sustainable Agriculture Reviews 48* (Vol. 48, p. 311-336). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54719-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54719-6_8)
- Angeli, D., Pellegrini, E., & Pertot, I. (2009). Occurrence of Erysiphe necator Chasmothecia and Their Natural Parasitism by Ampelomyces quisqualis. *Phytopathology*®, 99(6), 704-710. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-6-0704>
- Aouadi, N., Aubertot, J. N., Caneill, J., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.02.006>
- Atmo Occitanie. (2023, octobre). *Suivi des pesticides dans l'air en Occitanie 2021-2022 Une surveillance renforcée pour mieux évaluer l'évolution de la composition du compartiment aérien d'une année sur l'autre*.
- Aubertot, J.-N., & Robin, M.-H. (2013). Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Crop Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and the Abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual Bases. *PLoS ONE*, 8(9), e73202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073202>
- Austin, C. N., & Wilcox, W. F. (2011). Effects of Fruit-Zone Leaf Removal, Training Systems, and Irrigation on the Development of Grapevine Powdery Mildew. *American Journal of Enology and Viticulture*, 62(2), Article 2.
- Austin, C., & Wilcox, W. (2012). Effects of Sunlight Exposure on Grapevine Powdery Mildew Development. *Phytopathology*, 102, 857-866.
- Auvergne, C., Carra, M., Cavalier, R., Codis, S., Cuq, S., Delpuech, X., Lion, J., Ruelle, B., Thiery, J., & Vergès, A. (2017, janvier). *Guide pratique de réglages et d'utilisation des pulvérisateurs viticoles*. [https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2019/03/CAHIER\\_PULVE-1.pdf](https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2019/03/CAHIER_PULVE-1.pdf)
- Aveline, N. (2024, avril). *Liste des produits de biocontrôle homologués en viticulture (avril 2024)*.

- Aveline, N., Dupin, S., Becquet, L., & Cayla, L. (2022, mai). *Le biocontrôle en viticulture : Recherche et expérimentations*. [https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2023/06/itineraires\\_biocontrole\\_web.pdf](https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2023/06/itineraires_biocontrole_web.pdf)
- Ayouba, K., & Vigeant, S. (2020). Can We Really Use Prices to Control Pesticide Use? Results from a Nonparametric Model. *Environmental Modeling & Assessment*, 25(6), 885-900. <https://doi.org/10.1007/s10666-020-09714-w>
- Bakker, L., Sok, J., Van Der Werf, W., & Bianchi, F. J. J. A. (2021). Kicking the Habit : What Makes and Breaks Farmers' Intentions to Reduce Pesticide Use? *Ecological Economics*, 180, 106868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106868>
- Baldi, I., Cordier, S., Coumoul, X., Elbaz, A., Gamet-Payrastre, L., Lebailly, P., Multigner, L., Rahmani, R., Spinosi, J., & van Maele-Fabry, G. (2013). *Pesticides : Effets sur la santé* (Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM), p. 1014) [Rapport de recherche].
- Baldi, I., & Lebailly, P. (2013). *Indicateurs d'exposition aux pesticides dans les études épidémiologiques : Exemple de l'étude PHYTONER sur les troubles neurocomportementaux* *Innovations Agronomiques* 28, 15-23. <https://doi.org/10.17180/P714-7002>
- Barbier, J.-M., Constant, N., & Bavidou, L. (2013). *Guide de co-conception de systèmes viticoles économes en produits phytosanitaires*.
- Barbier, J.-M., Constant, N., Davidou, L., Deliere, L., Guisset, M., Jacquet, O., Lafond, D., Panon, M.-L., & Sauvage, D. (2011). *CEPVITI Co-conception de systèmes viticoles économes en produits phytosanitaires Guide méthodologique*. [https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2019/03/Guide\\_Methodologiq\\_CEPViti2011.pdf](https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2019/03/Guide_Methodologiq_CEPViti2011.pdf)
- Barzman, M., & Dachbrodt-Saaydeh, S. (2011). Comparative analysis of pesticide action plans in five European countries. *Pest Management Science*, 67(12), 1481-1485. <https://doi.org/10.1002/ps.2283>
- Battany, M. C., & Grismer, M. E. (2000). Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards : Effects of slope, cover and surface roughness. *Hydrological Processes*, 14(7), 1289-1304. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200005\)14:7<1289::AID-HYP43>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200005)14:7<1289::AID-HYP43>3.0.CO;2-R)
- Bazireau, M. (2020). *Suivre l'humectation des feuilles pour sortir traiter au bon moment*. <https://www.vitisphere.com//actualite-92686-suivre-lhumectation-des-feuilles-pour-sortir-traiter-au-bon-moment.html>
- Beauvineau, M.-A. (2018). *Pulvérisation confinée : Approche technique et économique*. Vinitech 2018, Bordeaux.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Becker, C. M., & Pearson, R. C. (1996). *Black Rot Lesions on Overwintered Canes of Euvitis Supply Conidia of Guignardia bidwellii for Primary Inoculum in Spring* (1). 80(1), Article 1.
- Bergez, J. E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M. H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., & Sadok, W. (2010). Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy*, 32(1), Article 1. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.001>

- Bernard-Michinov, R. (2023). *Traque aux systèmes viticoles innovants diversifiés dans le Sud de la France* [Mémoire de fin d'études].
- Blaich, R., Heintz, C., & Wind, R. (1989). Studies on conidial germination and initial growth of the grapevine powdery mildew *Uncinula necator* on artificial substrates. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 30(4), 415-421. <https://doi.org/10.1007/BF00296633>
- Blancard, D., Davy, A., Raynal, M., & Coulon, T. (2015). *Black-Rot (Guignardia bidwellii)*. UGVB. <https://www6.bordeaux-aquitaine.inrae.fr/sante-agroecologie-vignoble/content/download/4642/41998/version/1/file/2015+ASCL+BlancardUGVBblackrot.pdf>
- Bleyer, G., Kassemeyer, H.-H., Krause, R., Viret, O., & Siegfried, W. (2008). „VitiMeteo Plasmopara“ – Prognosemodell zur Bekämpfung von Plasmopara viticola (Rebenperonospora) im Weinbau. *Gesunde Pflanzen*, 60(3), 91-100. <https://doi.org/10.1007/s10343-008-0187-1>
- Bleyer, G., Lösch, F., Schumacher, S., & Fuchs, R. (2020). Together for the Better : Improvement of a Model Based Strategy for Grapevine Downy Mildew Control by Addition of Potassium Phosphonates. *Plants*, 9(6), 710. <https://doi.org/10.3390/plants9060710>
- Bohanec, M. (2020, juin 1). *DEXi : A Program for Multi-Attribute Decision Making*.
- Bohanec, M. (2021). *DEXi : Program for Multi-Attribute Decision Making User's Manual*. 71.
- Bohanec, M., Cortet, J., Griffiths, B., Žnidaršič, M., Debeljak, M., Caul, S., Thompson, J., & Krogh, P. H. (2007). A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia*, 51(3), 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2007.03.006>
- Bohanec, M., Žnidaršič, M., Bratko, I., & Zupan, B. (2013). DEX Methodology : Three Decades of Qualitative Multi-Attribute Modeling. *Informatica*, 37, 49-54.
- Bosch, A., Marcantoni, G., Mazeau, J., & Thavaud, P. (2021). *Le vitipastoralisme*.
- Boulestreau, Y., Casagrande, M., & 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. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00700-4>
- Bourgade, E., Bustillo, V., Del'Homme, B., Desanlis, M., Dufourcq, T., Guenser, J., Grimaldi, J., Montagne, V., Ranjard, L., & Alonso, A. (2018). Agroforesterie et viticulture. *Itinéraires*, 28. [https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2019/03/1811\\_ESOPE\\_IFV\\_Brochure\\_Agroforesterie\\_web100\\_DPI\\_VF-1.pdf](https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2019/03/1811_ESOPE_IFV_Brochure_Agroforesterie_web100_DPI_VF-1.pdf)
- Brittain, C. A., Vighi, M., Bommarco, R., Settele, J., & Potts, S. G. (2010). Impacts of a pesticide on pollinator species richness at different spatial scales. *Basic and Applied Ecology*, 11(2), 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.11.007>
- Burgun, X. (2024, mai 16). *BEE : Biocontrôle et Equilibre de l'Ecosystème vigne*. Carrefour de l'innovation : Résultats des projets DEPHY EXPE 2, Paris.
- Caffi, T., Legler, S. E., Bugiani, R., & Rossi, V. (2013). Combining sanitation and disease modelling for control of grapevine powdery mildew. *European Journal of Plant Pathology*, 135(4), Article 4. <https://doi.org/10.1007/s10658-012-0124-0>
- Caffi, T., Rossi, V., Cossu, A., & Fronteddu, F. (2007). Empirical vs. Mechanistic models for primary infections of *Plasmopara viticola*. *EPPO Bulletin*, 37(2), 261-271. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2007.01120.x>

- Caffi, T., Rossi, V., Legler, S. E., & Bugiani, R. (2011). A mechanistic model simulating ascospore infections by *Erysiphe necator*, the powdery mildew fungus of grapevine. *Plant Pathology*, 60(3), 522-531. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02395.x>
- Calonnec, A., Cartolaro, P., & Chadoeuf, J. (2009). Highlighting features of spatiotemporal spread of powdery mildew epidemics in the vineyard using statistical modeling on field experimental data. *Phytopathology*, 99(4), Article 4. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-4-0411>
- Calonnec, A., Cartolaro, P., Delière, L., & Chadoeuf, J. (2006). Powdery mildew on grapevine : The date of primary contamination affects disease development on leaves and damage on grape. *Bulletin IOBC/WPRS Bulletin*, 29, 67-73.
- Calonnec, A., Cartolaro, P., Naulin, J. -M., Bailey, D., & Langlais, M. (2008). A host-pathogen simulation model : Powdery mildew of grapevine. *Plant Pathology*, 57(3), 493-508. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01783.x>
- Calonnec, A., Cartolaro, P., Poupot, C., Dubourdieu, D., & Darriet, P. (2004). Effects of *Uncinula necator* on the yield and quality of grapes (*Vitis vinifera*) and wine. *Plant Pathology*, 53(4), 434-445. <https://doi.org/10.1111/j.0032-0862.2004.01016.x>
- Carisse, O. (2009). *Gestion raisonnée des principales maladies de la vigne au Québec*.
- Carisse, O., Bacon, R., & Lefebvre, A. (2009). Grape powdery mildew (*Erysiphe necator*) risk assessment based on airborne conidium concentration. *Crop Protection*, 28(12), 1036-1044. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.06.002>
- Carretier, D. (2021). *BSV BILAN 2021*. EDITION MIDI-PYRENEES GAILLAC.
- Carretier, D. (2022a). *BSV BILAN 2022*. EDITION MIDI-PYRENEES GAILLAC.
- Carretier, D. (2022b). *DONNEES DE LA MODELISATION DANS LES BSV VIGNE CARACTERISTIQUES DES MODELES*. [https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Occitanie/512\\_Fichiers-communs/documents/BSV/BSV\\_ex-LR/Note/Modeles\\_BSV\\_Viticulture\\_LR\\_2022.pdf](https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/512_Fichiers-communs/documents/BSV/BSV_ex-LR/Note/Modeles_BSV_Viticulture_LR_2022.pdf)
- Carretier, D. (2023). *BSV BILAN 2023*. EDITION MIDI-PYRENEES GAILLAC.
- Carton, N., Swiergiel, W., Tidåker, P., Rööös, E., & Carlsson, G. (2022). On-farm experiments on cultivation of grain legumes for food – outcomes from a farmer–researcher collaboration. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 37(5), 457-467. <https://doi.org/10.1017/S1742170522000102>
- Catalogna, M., Dubois, M., & Navarrete, M. (2018). Diversity of experimentation by farmers engaged in agroecology. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(5), 50. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0526-2>
- Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto. (2018). *Projets lauréats des Appels à Projets 2017 & 2018 DEPHY EXPE « Expérimentation de systèmes agro-écologiques pour un usage des pesticides en ultime recours »*.
- Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto. (2019). *Résumés des articles de synthèse des projets DEPHY EXPE 2012-2018*. [https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2020-02/Brochure\\_R%C3%A9sum%C3%A9s\\_EXPE.pdf](https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2020-02/Brochure_R%C3%A9sum%C3%A9s_EXPE.pdf)
- Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto. (2021). *Bilan de Campagne 2021 Filière Viticulture*.
- Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto. (2022). *Bilan de Campagne 2022 Filière Viticulture*.

Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto. (2023a). *FERMES DU RÉSEAU DEPHY : 10 ANS DE RÉSULTATS*. Trajectoires et performances des systèmes de culture.

Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto. (2023b). *Synthèse nationale des données DEPHY FERME Viticulture sur la période 2017-2020* (p. 62p). <https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2023-06/Synth%C3%A8se%20DEPHY%20FERME%20Viticulture%202023.pdf>

Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., & Meynard, J.-M. (2012). Participatory design of agricultural decision support tools : Taking account of the use situations. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(4), 899-910. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0091-z>

Chambre d'Agriculture de la Gironde, & IFV. (2021). *Movida*<sup>®</sup>.

Chambre régionale d'Agriculture d'Occitanie et équipe du SRAL, & DRAAF Occitanie. (2020). *LES GROUPES 30 000 Synthèse des indicateurs de suivi 2020*.

Chambres d'agriculture Auvergne- Rhône-Alpes/Occitanie/Corse/Provence-Alpes-Côte d'Azur. (2022). *Guide des vignobles Rhône-Méditerranée 2022-2023 Viticulture raisonnée et biologique*. [https://po.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Occitanie/073\\_Inst-Pyrenees-Orientales/FICHIERS/ACTUALITES/VITI/2022/GDV\\_2022\\_2023.pdf](https://po.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/073_Inst-Pyrenees-Orientales/FICHIERS/ACTUALITES/VITI/2022/GDV_2022_2023.pdf)

Chantre, E., & Cardona, A. (2014). Trajectories of French Field Crop Farmers Moving Toward Sustainable Farming Practices : Change, Learning, and Links with the Advisory Services. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38(5), 573-602. <https://doi.org/10.1080/21683565.2013.876483>

Chantre, E., Guichard, L., Ballot, R., Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Prigent, C., & Barzman, M. (2016). Co-click'eau, a participatory method for land-use scenarios in water catchments. *Land Use Policy*, 59, 260-271. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.09.001>

Chellemi, D. O., & Marois, J. J. (1992). Influence of Leaf Removal, Fungicide Applications, and Fruit Maturity on Incidence and Severity of Grape Powdery Mildew. *American Journal of Enology and Viticulture*, 43(1), Article 1.

Chèze, B., David, M., & Martinet, V. (2019). Understanding farmers' reluctance to reduce pesticide use : A choice experiment. *Ecological Economics*, 167, 106349. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.06.004>

Chinchor, N. (1992). MUC-4 Evaluation Metrics. *Fourth Message Uunderstanding Conference (MUC-4): Proceedings of a Conference Held in McLean, Virginia, June 16-18, 1992*. MUC 1992. <https://aclanthology.org/M92-1002>

Codis, S., Davy, A., & Chapuis, G. (2013). Comparaison des systèmes d'expression des doses de produits de protection de la vigne dans 5 pays européens et les besoins d'une harmonisation. *Lettre actualités*, 62, 9.

Codis, S., Vergès, A., Savajols, B., Delpuech, X., Ruelle, B., Carra, M., Montegano, P., & Ribeyrolles, X. (2016). Adapter le parc matériel pour traiter plus précisément. Deuxième proposition pour une contribution réaliste des agroéquipements aux objectifs du plan Écophyto : Utiliser des appareils permettant une application précise garantie grâce à des tests reconnus. *PHYTOMA*, 698, 24-27.

Codis, S., Vergès, A., Trinquier, E., Ribeyrolles, X., Lewis, M., Auvergne, C., Delpuech, X., Cheraiet, A., & Naud, O. (2024). Performance Pulvé : Trois ans après. *PHYTOMA*, 773. [https://www.performancepulve.fr/documents/download/guide\\_utilisation\\_11](https://www.performancepulve.fr/documents/download/guide_utilisation_11)

- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), Article 1. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Compagnone, C. (2004). Agriculture raisonnée et dynamique de changement en viticulture bourguignonne. *Recherches Sociologiques*, 103-121pp.
- Constant, N. (2013). *LA MAITRISE DE L'OIDIUM EN VITICULTURE BIOLOGIQUE*.
- Contrat de solutions. (2024). *Confusion sexuelle vigne*.
- Couderc, V., Barbier, J. M., Hammond, R., Hossard, L., Mailly, F., Mouret, J.-C., Tardivo, C., & Delmotte, S. (2014). *Farming systems design : Complementarities between experts' prototyping and modeling*. 515 p.
- Crisan, M. (2019). *Pratiques culturales en grandes cultures 2017* (Agreste Chiffres et Données) [Rapport Technique]. Ministère de la transition et la cohésion des territoires.
- Dartigoyte, L. (2006). Les différents itinéraires techniques de l'entretien des sols viticoles. *Chambre d'Agriculture de la Gironde*, 7.
- Davy, A., Raynal, M., Vergnes, M., Debord, C., Codis, S., Naud, O., Deliere, L., Fermaud, M., Roudet, J., Metral, R., Bouisson, Y., Davidou, L., Guilbault, P., Dupin, S., Genevet, B., Mahieux, V., Baron, M., & Perot, S. (2020). DeciTrait® : Un OAD pour la protection de la vigne. *Innovations Agronomiques*, 79, 89-99. <https://doi.org/10.15454/7FK8-GT23>
- de la Rocque, B. (2002). Viticulture raisonnée et méthodes alternatives de protection. Une réflexion sur les enjeux et les difficultés, notamment en matière de prophylaxie. *Phytoma*, 548, 18-20.
- Deguine, J.-P., Robin, M.-H., Corrales, D. C., Vedy-Zecchini, M.-A., Doizy, A., Chiroleu, F., Quesnel, G., Païtard, I., Bohanec, M., & Aubertot, J.-N. (2021). Qualitative modeling of fruit fly injuries on chayote in Réunion: Development and transfer to users. *Crop Protection*, 139, 105367. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105367>
- Delecourt, E., Joannon, A., & Meynard, J.-M. (2019). Work-related information needed by farmers for changing to sustainable cropping practices. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2), 28. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0571-5>
- Delière, L., Guimier, S., Petitgenet, M., Goutouly, J. P., Vergnes, M., Dupin, S., Davidou, L., Christen, M., Rochas, A., & Guilbault, P. (2018). Projet EcoViti Aquitaine : Performances de systèmes viticoles à faible niveau d'intrants phytopharmaceutiques dans le vignoble bordelais. *Innovations Agronomiques*, 70, 37-53pp. <https://doi.org/10.15454/3WLRXP>
- Delière, L., & Ley, L. (2024, mai 15). *SALSA systèmes viticoles agroécologiques mobilisant la résistance variétale et les régulations naturelles*. Carrefour de l'innovation : Résultats des projets DEPHY EXPE 2, Paris.
- Delière, L., Rougier, M., Emonet, E., Pillet, E., Burgun, X., Lafond, D., Mahé, H., Metral, R., Serrano, E., & Thiollet-Scholtus, M. (2016). *Réseau DEPHY EXPE: Synthèse des résultats à mi-parcours à l'échelle nationale—Filière Viticulture* (Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, p. 70 p.) [Rapport technique].
- Demestihias, C. (2017). *Analyse des conflits et synergies entre services écosystémiques multiples en vergers de pommiers*. Sciences agricoles. Université d'Avignon.

Deytieux, V., Vivier, C., Minette, S., Nolot, J. M., Piaud, S., Schaub, A., Lande, N., Petit, M. S., Reau, R., Fourrié, L., & Fontaine, L. (2012). Expérimentation de systèmes de culture innovants : Avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. *Innovations Agronomiques*, 20, 49-78pp. <https://doi.org/10.17180/2G3G-ER50>

Direction Générale de la Santé. (2023). *BILAN DE LA QUALITÉ DE L'EAU AU ROBINET DU CONSOMMATEUR VIS-À-VIS DES PESTICIDES EN FRANCE EN 2022*.

Donatelli, M., Magarey, R. D., Bregaglio, S., Willocquet, L., Whish, J. P. M., & Savary, S. (2017). Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agricultural Systems*, 155, 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.019>

Doster, M. A., & Schnathorst, W. C. (1985). Comparative Susceptibility of Various Grapevine Cultivars to the Powdery Mildew Fungus *Uncinula Necator*. *American Journal of Enology and Viticulture*, 36(2), Article 2.

Drinkwater, L. E. (2002). Cropping Systems Research : Reconsidering Agricultural Experimental Approaches. *HortTechnology*, 12(3), 355-361. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.12.3.355>

Dubos, B. (2002). *Maladies cryptogamiques de la vigne : Champignons parasites des organes herbacés et du bois de la vigne* (2e éd. rev. et augm.). Éd. Féret.

Dubuc, M., Metral, R., Fortino, G., & Gary, C. (2015). *DEXiPM Vigne® (version 1.0), un outil pour l'analyse de la durabilité des systèmes de culture viticoles. Manuel des entrées de DEXiPM Vigne®* (p. 105).

Dubuis, P.-H., Bloesch, B., Mittaz, C., Bleyer, G., Weinbauinstitut, S., Krause, R., & Ingenieurpartnerschaft, G. (2014). Lutte contre l'oïdium à l'aide du modèle VitiMeteo-Oidium. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, 46(6), 368-375.

Ducourt, J. (2023, mai). *Tout savoir sur les outils d'aide à la décision en viticulture*. <https://www.vinopole.com/fiches-pratiques/agro-ecologie/diminution-des-intrants/choisir-et-bien-utiliser-un-outil-daide-a-la-decision/>

Dupin, S., Aveline, N., Guégniard, S., & Errecart, C. (2023, mars 21). *Le Biocontrôle pour lutter contre les maladies de la vigne*. <https://www.vinopole.com/recherches-experimentations-vitivinicoles/agro-ecologie/diminution-des-intrants/biocontrôle-contre-les-maladies-de-la-vigne/>

Duquesne, L., Aimon-Marie, F., Bernard, F.-M., Boitaud, L., & Paulhac, L. (2013). Guide viticulture durable charentes, Cognac, vignoble charentais—Viticulteurs de Charentes-Cognac. *Modes de conduite, travaux en vert et contrôles de maturation*. <http://www.vignevin-charentes.com/infos-pratiques/guide-viticulture-durable.html>

Ellis, M. A., Madden, L. V., & Wilson, L. L. (1986). Electronic Grape Black Rot Predictor for Scheduling Fungicides with Curative Activity. *Plant Disease*, 70(10), 938-940. <https://doi.org/10.1094/PD-70-938>

Farra, S. (2022). *Modélisation qualitative des facteurs épidémiologiques de Guignardia bidwellii, pathogène responsable du Black rot, pour la prédiction des dégâts sur la vigne* [Mémoire de fin d'études]. UFR de Sciences et Technologies de Reims.

Fermaud, M., Smits, N., Merot, A., Roudet, J., Thiéry, D., Wery, J., & 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. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12238>

- Fernández-Mena, H., Frey, H., Celette, F., Garcia, L., Barkaoui, K., Hossard, L., Naulleau, A., Métral, R., Gary, C., & Metay, A. (2021). Spatial and temporal diversity of service plant management strategies across vineyards in the south of France. Analysis through the Coverage Index. *European Journal of Agronomy*, *123*, 126191. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126191>
- Fersing, C. (2016). *Réduire l'utilisation des produits phytosanitaires en viticulture*.
- Fessler, C., & Kassemeyer, H. H. (1995). The influence of temperature during the development of conidia on the germination of *Uncinula necator*. *Vitis* *34*, 63-64.
- Fleiss, J. L., & Cohen, J. (1973). The Equivalence of Weighted Kappa and the Intraclass Correlation Coefficient as Measures of Reliability. *Educational and Psychological Measurement*, *33*(3), Article 3. <https://doi.org/10.1177/001316447303300309>
- Fouillet, E., Delière, L., Chartier, N., Munier-Jolain, N., Cortel, S., Rapidel, B., & Merot, A. (2022). Reducing pesticide use in vineyards. Evidence from the analysis of the French DEPHY network. *European Journal of Agronomy*, *136*, 126503. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126503>
- Fouillet, E., Gosme, M., Metay, A., Rapidel, B., Rigal, C., Smits, N., & Merot, A. (2024). Lowering pesticide use in vineyards over a 10-year period did not reduce yield or work intensity. *European Journal of Agronomy*, *158*, 127199. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127199>
- Francony, F. (2022). *Bilan annuel 2021 des pesticides dans l'air en Nouvelle-Aquitaine* (p. 4p) [Synthèse d'étude]. Observatoire régional de l'air.
- Fuentes Espinoza, A., Hubert, A., Raineau, Y., Franc, C., & Giraud-Héraud, É. (2018). Resistant grape varieties and market acceptance : An evaluation based on experimental economics. *OENO One*, *52*(3). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.3.2316>
- Gadoury, D. M., Cadle-Davidson, L., Wilcox, W. F., Dry, I. B., Seem, R. C., & Milgroom, M. G. (2012). Grapevine powdery mildew (*Erysiphe necator*) : A fascinating system for the study of the biology, ecology and epidemiology of an obligate biotroph. *Molecular Plant Pathology*, *13*(1), 1-16. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00728.x>
- Gadoury, D. M., & Pearson, R. C. (1990). Ascocarp Dehiscence and Ascospore Discharge in *Uncinula necator*. *Phytopathology*, *80*(4), 393. <https://doi.org/10.1094/Phyto-80-393>
- Gadoury, D. M., Seem, R. C., Pearson, R. C., Wilcox, W. F., & Dunst, R. M. (2001). Effects of Powdery Mildew on Vine Growth, Yield, and Quality of Concord Grapes. *Plant Disease*, *85*(2), Article 2.
- Galet, P. (1977). *Les maladies et les parasites de la vigne, Volume 1*. Impr. du Paysan du Midi.
- Gall-Ely, M. L. (2009). Définition, mesure et déterminants du consentement à payer du consommateur : Synthèse critique et voies de recherche. *Recherche et Applications en Marketing (French Edition)*, *24*(2), 91-113. <https://doi.org/10.1177/076737010902400205>
- Garcia, L., Celette, F., Gary, C., Ripoché, A., Valdés-Gómez, H., & Metay, A. (2018). Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards : A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *251*, 158-170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.030>
- Garin, G. (2011). *Modélisation du cycle de l'oïdium de la vigne dans un outil d'aide à la décision : Intégration de nouveaux formalismes*.
- Gaviglio, C. (2009). Alternatives au désherbage chimique sous le rang : Désherbage mécanique. *Itinéraires*, *21*.

- Gessler, C., Pertot, I., & Perazzolli, M. (2011). Plasmopara viticola a review of knowledge on downy mildew of grapevine and effective disease management.pdf. *Phytopathologia Mediterranea*, 50(1), 3-44.
- Giampietri, E., & Trestini, S. (2023). Pro-Environmental Viticulture : Status Quo and Perspectives from Prosecco Winegrowers in Italy. *Sustainability*, 15(2), 1073. <https://doi.org/10.3390/su15021073>
- Goulet, É., Cady, E., & Chrétien, P. (2006). *Sensibilité de la vigne face aux maladies cryptogamiques : Utilisation croisée d'une cartographie des terroirs viticoles et d'une enquête parcellaire*. Vle Congrès International des terroirs viticoles.
- Grimonprez, B., & Terryn, F. (2021). Pesticides : Les enfants empoisonnés, les viticulteurs condamnés. *Droit de l'environnement [La revue jaune]*, 297, 70.
- Grinbaum, M., Dubernet, M., Bouazza, V., Debez, E., & Lempereur, V. (2019). Résidus phytosanitaires dans les vins : État des lieux, analyses et expertise. *BIO Web of Conferences*, 12, 04010. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191204010>
- Gubler, W. D., Rademacher, M. R., & Vasquez, S. J. (1999). Control of Powdery Mildew Using the UC Davis Powdery Mildew Risk Index. *APSnet Feature Articles*. <https://doi.org/10.1094/APSnetFeature-1999-0199>
- Guichard, L., Dedieu, F., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Reau, R., & 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. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017004>
- Guilpart, N. (2014). *Relations entre services écosystémiques dans un agroécosystème à base de plantes pérennes : Compromis entre rendement de la vigne et régulation de l'oïdium*. Montpellier SupAgro.
- Guiral, C. (2014). *AGRICULTURE ET POLLUTION DE L'AIR IMPACTS, CONTRIBUTIONS, PERSPECTIVES Etat de l'art des connaissances*. ADEME.
- Halleen, F., & Holz, G. (2001). An Overview of the Biology, Epidemiology and Control of Uncinula necator (Powdery Mildew) on Grapevine, with Reference to South Africa. *South African Journal of Enology & Viticulture*, 22(2). <https://doi.org/10.21548/22-2-2205>
- Hausmann, L., Rex, F., & Töpfer, R. (2017). Evaluation and genetic analysis of grapevine black rot resistances. *Acta Horticulturae*, 1188, 285-290. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1188.37>
- Heap, I. (2024a). *Chronological Increase In Resistant Weeds Globally*. WeedScience.org. <https://www.weedscience.org/Pages/ChronologicalIncrease.aspx>
- Heap, I. (2024b). *Herbicide Resistant Weeds by Country and Site of Action*. WeedScience.org. <https://www.weedscience.org/Pages/CountrySummary.aspx>
- Heinrich-Böll-Stiftung, Friends of the Earth Europe, Bund für Umwelt und Naturschutz, & PAN Europe. (2022). *Pesticide Atlas 2022*. [https://eu.boell.org/sites/default/files/2023-04/pesticideatlas2022\\_ii\\_web\\_20230331.pdf](https://eu.boell.org/sites/default/files/2023-04/pesticideatlas2022_ii_web_20230331.pdf)
- Henry, M., Béguin, M., Requier, F., Rollin, O., Odoux, J.-F., Aupinel, P., Aptel, J., Tchamitchian, S., & Decourtye, A. (2012). A Common Pesticide Decreases Foraging Success and Survival in Honey Bees. *Science*, 336(6079), 348-350. <https://doi.org/10.1126/science.1215039>
- Hervieu, C., Barul, J., Guillaume, D., & Laborie, A. (2024). *RAPPORT D'ACTIVITÉ DE L'EXERCICE 2023 présenté à l'Assemblée Générale du 14 mai 2024*. 35.

- Hill, S. B., & MacRae, R. J. (1996). Conceptual Framework for the Transition from Conventional to Sustainable Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 7(1), 81-87. [https://doi.org/10.1300/J064v07n01\\_07](https://doi.org/10.1300/J064v07n01_07)
- Hoffman, L. E., Wilcox, W. F., Gadoury, D. M., Seem, R. C., & Riegel, D. G. (2004). *Integrated Control of Grape Black Rot : Influence of Host Phenology, Inoculum Availability, Sanitation, and Spray Timing* (6). 94(6), Article 6.
- Holb, I. J., & Füzi, I. (2016). Monitoring of ascospore density of *Erysiphe necator* in the air in relation to weather factors and powdery mildew development. *European Journal of Plant Pathology*, 144(4), Article 4. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0823-4>
- Hossard, L., Guichard, L., Pelosi, C., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.008>
- Hossard, L., Jeuffroy, M. H., Pelzer, E., Pinochet, X., & Souchere, V. (2013). A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale. *Environmental Modelling & Software*, 48, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.014>
- Hossard, L., Schneider, C., & Voltz, M. (2022). A role-playing game to stimulate thinking about vineyard management practices to limit pesticide use and impacts. *Journal of Cleaner Production*, 380, 134913. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134913>
- IFV, Anses-CASPER, INRAe, CIVC, Chambres d'agriculture, & DGAL-SDSPV. (2022, janvier 14). *Note technique 2022 sur les résistances aux maladies de la vigne*. <https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2022/01/Note-technique-commune-vigne-2022-Vdef.pdf>
- IFV, Anses-CASPER, INRAE, CIVC, Chambres d'agriculture, & DGAL-SDSPV. (2024, janvier). *NOTE TECHNIQUE COMMUNE RESISTANCES 2024 MALADIES DE LA VIGNE : MILDIOU, OÏDIUM, POURRITURE GRISE, BLACK-ROT*.
- Inserm. (2021). *Pesticides et effets sur la santé : Nouvelles données*. Collection Expertise collective. Montrouge : EDP Sciences.
- Interprofession des Vins du Sud-Ouest. (2024a). *Cépages*. <https://www.vignobles-sudouest.fr/cepages/>
- Interprofession des Vins du Sud-Ouest. (2024b). *Dénominations*. Vignobles du Sud-Ouest. <https://www.vignobles-sudouest.fr/denominations/>
- Interprofession des Vins du Sud-Ouest. (2024c). *Economie*. Vignobles du Sud-Ouest. <https://www.vignobles-sudouest.fr/economie/>
- IVSO. (2022). *Économie des vins du Sud-ouest*. <https://www.vignobles-sudouest.fr/economie/>
- Jacquet, A., & Morlat, R. (1997). Caractérisation de la variabilité climatique des terroirs viticoles en val de Loire. Influence du paysage et des facteurs physiques du milieu. *Agronomie*, 17(9-10), 465-480. <https://doi.org/10.1051/agro:19970904>
- Jacquet, F., Delame, N., Lozano-Vita, J., Reboud, X., & Huyghe, C. (2019). *Alternatives au glyphosate en viticulture : Évaluation économique des pratiques de désherbage* (p. 25p.). INRA.

- Jailloux, F., Willocquet, L., Chapuis, L., & Froidefond, G. (1999). *Effect of weather factors on the release of ascospores of Uncinula necator, the cause of grape powdery mildew, in the Bordeaux region*. <https://doi.org/10.1139/CJB-77-7-1044>
- Jeuffroy, M.-H., Ballot, R., Merot, A., Meynard, J.-M., & Sylvaine, S. (2022). Des systèmes de culture agroécologiques pour diminuer l'usage des pesticides. In *ZÉRO PESTICIDE : Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable* (Edition Quae).
- Jeuffroy, M.-H., Bergez, J.-E., David, C., Flénet, F., Gate, P., Loyce, C., Maupas, F., Meynard, J.-M., Reau, R., & Surleau-Chambenoit, C. (2008). Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : Bilan et perspectives. In *Systèmes de culture innovants et durables* (p. 109-128). Éducagri éditions. <https://doi.org/10.3917/edagri.reau.2008.01.0109>
- Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Lefeuvre, T., Valantin-Morison, M., Colnenne-David, C., Gauffreteau, A., Médiène, S., Pelzer, E., Reau, R., Salembier, C., & Meynard, J.-M. (2022). Design workshops for innovative cropping systems and decision-support tools : Learning from 12 case studies. *European Journal of Agronomy*, 139, 126573. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126573>
- Jogaiah, S., Doshi, P., & Adsule, P. (2008). Influence of rootstocks on changing the pattern of phenolic compounds in Thompson Seedless grapes and its relationship to the incidence of powdery mildew. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32, 1-9.
- Kast, W. K. (1997). A step by step risk analysis (SRA) used for planning sprays against powdery mildew (OiDiag-System). *Viticulture Enological Sci*, 52, 230-231.
- Kast, W. K., & Bleyer, K. (2010). *The expert system OiDiag2.2 -an useful tool for the precise scheduling of sprays against the powdery mildew of vine (Erysiphe necator Schwein)*. 151-153.
- Keating, B. A., & McCown, R. L. (2001). Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems*, 70(2-3), 555-579. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00059-2)
- Kebe, A. (2023). *Modélisation qualitative des facteurs épidémiologiques de P.viticola, champignon responsable du mildiou de la vigne, pour la prédiction des dégâts sur grappes* [Mémoire de fin d'études]. Université de Picardie Jules Verne.
- Keller, M., Rogiers, S., & Schultz, H. (2003). Nitrogen and ultraviolet radiation modify grapevines' susceptibility to powdery mildew. *Vitis -Geilweilerhof-*, 42, 87-94.
- Kennelly, M. M., Gadoury, D. M., Wilcox, W. F., Magarey, P. A., & Seem, R. C. (2005). Seasonal Development of Ontogenic Resistance to Downy Mildew in Grape Berries and Rachises. *Phytopathology*®, 95(12), 1445-1452. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-1445>
- Kensing, F., & Blomberg, J. (1998). Participatory Design : Issues and Concerns. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 7(3-4), 167-185. <https://doi.org/10.1023/A:1008689307411>
- King, C., Gunton, J., Freebairn, D., Coutts, J., & Webb, I. (2000). The sustainability indicator industry:where to from here ? A focus group study to explore the potential of farmer participation in the development of indicators. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 40(4), 631. <https://doi.org/10.1071/EA99148>
- Kummer, S., Milestad, R., Leitgeb, F., & Vogl, C. R. (2012). Building Resilience through Farmers' Experiments in Organic Agriculture : Examples from Eastern Austria. *Sustainable Agriculture Research*, 1(2), 308. <https://doi.org/10.5539/sar.v1n2p308>

- Kyveryga, P. M., Mueller, T. A., & Mueller, D. S. (2018). On-Farm Replicated Strip Trials. In D. Kent Shannon, D. E. Clay, & N. R. Kitchen (Éds.), *ASA, CSSA, and SSSA Books* (p. 189-207). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0096>
- Lacombe, C., Couix, N., & Hazard, L. (2018). Designing agroecological farming systems with farmers : A review. *Agricultural Systems*, *165*, 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.014>
- Lacoste, M., Cook, S., McNee, M., Gale, D., Ingram, J., Bellon-Maurel, V., MacMillan, T., Sylvester-Bradley, R., Kindred, D., Bramley, R., Tremblay, N., Longchamps, L., Thompson, L., Ruiz, J., García, F. O., Maxwell, B., Griffin, T., Oberthür, T., Huyghe, C., ... Hall, A. (2021). On-Farm Experimentation to transform global agriculture. *Nature Food*, *3*(1), 11-18. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00424-4>
- Lacroix, O., Aubertot, J.-N., Bohanec, M., Cordeau, S., Corrales, D. C., & Robin, M.-H. (2021). IPSIM-Cirsium, a Qualitative Expert-Based Model to Predict Infestations of Cirsium arvense. *Frontiers in Agronomy*, *3*, 655383. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.655383>
- Lafond, D., Marsault, J., & Rioux, D. (2011). *Cartographie des Risques Epidémiologiques Mildiou et Oïdium en relation avec les Sensibilités liées au Terroir*. 5.
- Lairez, J., Lopez-Ridaura, S., Jourdain, D., Falconnier, G. N., Lienhard, P., Striffler, B., Syfongxay, C., & Affholder, F. (2020). Context matters : Agronomic field monitoring and participatory research to identify criteria of farming system sustainability in South-East Asia. *Agricultural Systems*, *182*, 102830. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102830>
- Lançon, J., Wery, J., Rapidel, B., Angokaye, M., Gérardeaux, E., Gaborel, C., Ballo, D., & Fadegnon, B. (2007). An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development*, *27*(2), 101-110. <https://doi.org/10.1051/agro:2006037>
- Landais, E., Deffontaines, J.-P., & Benoît, M. (1988). Les pratiques des agriculteurs. Point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique. *Études rurales*, *109*(1), 125-158. <https://doi.org/10.3406/rural.1988.3226>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, *33*(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Larsen, A. E., Patton, M., & Martin, E. A. (2019). High highs and low lows : Elucidating striking seasonal variability in pesticide use and its environmental implications. *Science of The Total Environment*, *651*, 828-837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.206>
- Le Bellec, F., Rajaud, A., Ozier-Lafontaine, H., Bockstaller, C., & Malezieux, E. (2012). Evidence for farmers' active involvement in co-designing citrus cropping systems using an improved participatory method. *Agronomy for Sustainable Development*, *32*(3), 703-714. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0070-9>
- Le Gal, P.-Y., Dugué, P., Faure, G., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.07.007>
- Lechenet, M., Dessaint, F., Py, G., Makowski, D., & Munier-Jolain, N. (2017). Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants*, *3*(3), 17008. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.8>

- Leclère, M., Loyce, C., & Jeuffroy, M.-H. (2018). Growing camelina as a second crop in France : A participatory design approach to produce actionable knowledge. *European Journal of Agronomy*, *101*, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.08.006>
- Leclère, M., Loyce, C., & Jeuffroy, M.-H. (2023). A participatory and multi-actor approach to locally support crop diversification based on the case study of camelina in northern France. *Agronomy for Sustainable Development*, *43*(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00871-2>
- Legler, S. E., Caffi, T., & Rossi, V. (2012). A nonlinear model for temperature-dependent development of *Erysiphe necator chasmothecia* on grapevine leaves. *Plant Pathology*, *61*(1), 96-105. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02498.x>
- Legler, S. E., Caffi, T., Rossi, V., & Giosuè, S. (2010). *Modelling the life cycle of Erysiphe necator*. 6th International Workshop on Grapevine Downy and Powdery Mildew, Bordeaux.
- Li, H. (1993). Studies on the resistance of grapevine to powdery mildew. *Plant Pathology*, *42*(5), Article 5. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1993.tb01566.x>
- Lilja, N., & Bellon, M. (2008). Some common questions about participatory research : A review of the literature. *Development in Practice*, *18*(4-5), 479-488. <https://doi.org/10.1080/09614520802181210>
- Lu, W., Newlands, N. K., Carisse, O., Atkinson, D. E., & Cannon, A. J. (2020). Disease Risk Forecasting with Bayesian Learning Networks : Application to Grape Powdery Mildew (*Erysiphe necator*) in Vineyards. *Agronomy*, *10*(5), 622. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050622>
- Lukowicz, C., Ellero-Simatos, S., Régnier, M., Polizzi, A., Lasserre, F., Montagner, A., Lippi, Y., Jamin, E. L., Martin, J.-F., Naylies, C., Canlet, C., Debrauwer, L., Bertrand-Michel, J., Al Saati, T., Théodorou, V., Loiseau, N., Mselli-Lakhal, L., Guillou, H., & Gamet-Payraastre, L. (2018). Metabolic Effects of a Chronic Dietary Exposure to a Low-Dose Pesticide Cocktail in Mice : Sexual Dimorphism and Role of the Constitutive Androstane Receptor. *Environmental Health Perspectives*, *126*(6), 067007. <https://doi.org/10.1289/EHP2877>
- Mailly, F., Hossard, L., Barbier, J.-M., Thiollet-Scholtus, M., & Gary, C. (2017). Quantifying the impact of crop protection practices on pesticide use in wine-growing systems. *European Journal of Agronomy*, *84*, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.12.005>
- Marangoni, B., Toselli, M., Venturi, A., Fontana, M., & Scudellari, D. (2011). Effects of vineyard soil management and fertilization on grape diseases and wine quality. *Integrated Fruit Production*, 353-358.
- Masson, J. E., Soustre-Gacougnolle, I., Perrin, M., Schmitt, C., Henaux, M., Jaugey, C., Teillet, E., Lollier, M., Lallemand, J.-F., Schermesser, F., GIEE Westhalten, Isner, P., Schaeffer, P., Koehler, C., Rominger, C., Boesch, M., Rué, P., Miclo, Y., Bursin, A., ... Lassablière, R. (2021). Transdisciplinary participatory-action-research from questions to actionable knowledge for sustainable viticulture development. *Humanities and Social Sciences Communications*, *8*(1), 24. <https://doi.org/10.1057/s41599-020-00693-7>
- Mauguin, P., & Monod, H. (2024). *Reconception des systèmes de culture—WP5 | vitae*. <https://vitae.inrae.fr/work-package-5>
- Maurin, G., Cartolaro, P., Clerjeau, M., & Benac, G. (1991). Black-rot : Vers une methode de previsions des risques. Resultats de six annees d'etudes. *Phytoma la Défense des Végétaux*.

- Mazzocchi, C., Ruggeri, G., & Corsi, S. (2019). Consumers' preferences for biodiversity in vineyards : A choice experiment on wine. *Wine Economics and Policy*, 8(2), 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.wep.2019.09.002>
- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability : The kappa statistic. *Biochemia Medica*, 22(3), Article 3.
- Menapace, L., Colson, G., & Raffaelli, R. (2013). Risk Aversion, Subjective Beliefs, and Farmer Risk Management Strategies. *American Journal of Agricultural Economics*, 95(2), 384-389. <https://doi.org/10.1093/ajae/aas107>
- Merot, A., Fermaud, M., Gosme, M., & Smits, N. (2020). Effect of Conversion to Organic Farming on Pest and Disease Control in French Vineyards. *Agronomy*, 10(7), 1047. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071047>
- Merot, A., & Smits, N. (2020). Does Conversion to Organic Farming Impact Vineyards Yield? A Diachronic Study in Southeastern France. *Agronomy*, 10(11), 1626. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111626>
- METEO FRANCE. (2024). *Le climat en France métropolitaine*. <https://meteofrance.com/comprendre-climat/france/le-climat-en-france-metropolitaine>
- Métral, R., Chevrier, C., Bals, N., Bouisson, Y., Didier, V., Enard, C., Fremond, N., Garin, P., Gautier, T., Genevet, B., Goma-Fortin, N., Guillois, F., Ohl, B., & Thiery, J. (2018). DEPHY EXPE EcoViti Arc Méditerranéen : Synthèse des résultats 2012-2017. *Innovations Agronomiques*, 70, 3-20pp. <https://doi.org/10.15454/UKKOBW>
- Meynard, J.-M. (2016). Les savoirs agronomiques pour le développement : Diversité et dynamiques de production. *Agronomie environnement et sociétés*, 6(2), 19-28pp.
- Meynard, J.-M. (2019, août). *The step-by-step approach for farming systems design, in the frame of agroecological transition*. 6th International symposium for Farming System Design, Montevideo, Uruguay.
- Meynard, J.-M., Dedieu, B., & Bos, A. P. (2012). Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In I. Darnhofer, D. Gibbon, & B. Dedieu (Éds.), *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic* (p. 405-429). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2_18)
- Mian, G., Buso, E., & Tonon, M. (2021). Decision Support Systems for Downy Mildew (*Plasmopara viticola*) Control in Grapevine : Short Comparison Review. *Asian Research Journal of Agriculture*, 12-20. <https://doi.org/10.9734/arja/2021/v14i230120>
- Miclot, A. S., Delmotte, F., Bourg, J., Mazet, I. D., Fabre, F., & Delière, L. (2022). Four years of monitoring of disease-resistant grapevine varieties in French vineyards. *BIO Web of Conferences*, 50, 02008. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225002008>
- Millet, M., & Bedos, C. (2016). La contamination de l'atmosphère par les produits phytosanitaires : Protéger les végétaux des attaques de pesticides nuisibles. *Pollution atmosphérique*, N°229-230. <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.5655>
- Ministère de la santé et de l'accès aux soins. (2019, décembre 30). *Pesticides*. Ministère de la santé et de l'accès aux soins. <https://sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-microbiologiques-physiques-et-chimiques/pesticides/>

Ministère de la Transition écologique et solidaire, & Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature. (2018, septembre). *PLAN ÉCOPHYTO II+*. [https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/plan\\_ecophyto2\\_.pdf](https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/plan_ecophyto2_.pdf)

Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire. (2023). *Plan d'action stratégique pour l'anticipation du potentiel retraits européen des substances actives et le développement de techniques alternatives pour la protection des cultures (PARSADA)*.

Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, & Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. (2015, octobre). *Plan Ecophyto II*.

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire Français. (2022). *Le plan Écophyto, qu'est-ce que c'est ?* Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire et de la Forêt. <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest>

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. (2019). *Une certification environnementale pour les exploitations agricoles*.

Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation, le ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques et le ministère du Logement et de la Rénovation urbaine. (2022). *Publication des ventes de produits phytopharmaceutiques en 2022 (données définitives)*. <https://www.ecologie.gouv.fr/actualites/publication-ventes-produits-phytopharmaceutiques-2022-donnees-definitives>

Molitor, D., Augenstein, B., Mugnai, L., Rinaldi, P. A., Sofia, J., Hed, B., Dubuis, P.-H., Jermini, M., Kühner, E., Bleyer, G., Hoffmann, L., & Beyer, M. (2016). Composition and evaluation of a novel web-based decision support system for grape black rot control. *European Journal of Plant Pathology*, 144(4), 785-798. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0835-0>

Molitor, D., & Berkelmann-Loehnertz, B. (2011). *Simulating the susceptibility of clusters to grape black rot infections depending on their phenological development*. 30, 1649-1654. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2011.07.020>

Molitor, D., Fruehauf, C., Baus, O., & Berkelmann-Loehnertz, B. (2012). A Cumulative Degree-Day-Based Model to Calculate the Duration of the Incubation Period of *Guignardia bidwellii*. *Plant Disease*, 96(7), Article 7. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-11-1005-RE>

Montaigne, E., Coelho, A., & Khefifi, L. (2016). Economic issues and perspectives on innovation in new resistant grapevine varieties in France. *Wine Economics and Policy*, 5(2), 73-77. <https://doi.org/10.1016/j.wep.2016.11.002>

Motais, F., & Girad, M. (2015). *Fiche technique Black-Rot*.

Naulleau, A., Gary, C., Prévot, L., Vinatier, F., & Hossard, L. (2022). How can winegrowers adapt to climate change? A participatory modeling approach in southern France. *Agricultural Systems*, 203, 103514. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103514>

Nguwi, Y.-Y., & Cho, S.-Y. (2010). An unsupervised self-organizing learning with support vector ranking for imbalanced datasets. *Expert Systems with Applications*, 37(12), Article 12. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.05.054>

Nolot, J. M., & Debaeke, P. (2003). Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. *Cahiers Agriculture*, 12, 387-400.

- Onesti, G. (2015). *Studies on inoculum dynamics of Guignardia bidwellii, causal agent of grape black-rot*. Università Cattolica Del Sacro Cuore.
- Onesti, G., González-Domínguez, E., & Rossi, V. (2016). Accurate prediction of black rot epidemics in vineyards using a weather-driven disease model : Accurate prediction of black rot in vineyards. *Pest Management Science*, 72(12), 2321-2329. <https://doi.org/10.1002/ps.4277>
- Onesti, G., González-Domínguez, E., & Rossi, V. (2017). Production of Pycnidia and Conidia by *Guignardia bidwellii*, the Causal Agent of Grape Black Rot, as Affected by Temperature and Humidity. *Phytopathology*®, 107(2), Article 2. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-16-0255-R>
- Pant, L. P., & Hambly Odame, H. (2009). The promise of positive deviants : Bridging divides between scientific research and local practices in smallholder agriculture. *Knowledge Management for Development Journal*, 5(2), 160-172. <https://doi.org/10.1080/18716340903201504>
- Park, E. W., Seem, R. C., Gadoury, D., & Pearson, R. C. (1997). DMCast : A prediction model for grape downy mildew development. *Viticultural and enological Science*, 52, 182-189.
- Pelzer, E., Fortino, G., Bockstaller, C., Angevin, F., Lamine, C., Moonen, C., Vasileiadis, V., Guérin, D., Guichard, L., Reau, R., & Messéan, A. (2012). Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators*, 18, 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.11.019>
- Percival, D. C., Fisher, K. H., & Sullivan, J. A. (1994). Use of Fruit Zone Leaf Removal With *Vitis vinifera* L. cv. Riesling Grapevines. I. Effects on Canopy Structure, Microclimate, Bud Survival, Shoot Density, and Vine Vigor. *American Journal of Enology and Viticulture*, 45(2), 123-132. <https://doi.org/10.5344/ajev.1994.45.2.123>
- Pereira, Á., Turnes, A., & Vence, X. (2017). Barriers to shifting to a serviced model of crop protection in smallholding viticulture. *Journal of Cleaner Production*, 149, 701-710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.126>
- Perez, M., Hossard, L., Gary, C., Lacapelle, P., Robin, M.-H., & Metay, A. (2024). A participatory approach to involve winegrowers in pesticide use reduction in viticulture in the south-western region of France. *Italian Journal of Agronomy*, 18(4). <https://doi.org/10.4081/ija.2023.2209>
- Perrot, C. (2024, mars 15). *Mildiou, oïdium, les cépages résistants gagnent du terrain*. <https://www.pleinchamp.com/actualite/mildiou-oidium-les-cepages-resistants-gagnent-du-terrain>
- Pertot, I., Caffi, T., Rossi, V., Mugnai, L., Hoffmann, C., Grando, M. S., Gary, C., Lafond, D., Duso, C., Thiery, D., Mazzoni, V., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.025>
- Pesticide Action Network Europe. (2023). *Pesticides : Play it safe !*
- Petit, A., Barbier, J.-M., Thiollet-Scholtus, M., Cresson, C., Chovelon, M., & Meynard, J.-M. (2019). VITINNOBIO - Repérage et caractérisation des innovations techniques chez des viticulteurs biologiques en France. *Innovations Agronomiques* 71, 123-134. *Innovations Agronomiques*, 71, 123-134. <https://doi.org/10.15454/7VRFSW>
- Philippe, P. (2019). *Les vigneronns de Buzet le mag*.

Phyteis. (2022, juillet). *Légère hausse des volumes de phytopharmaceutiques vendus en 2021 sous l'impulsion des produits utilisables en agriculture biologique.*

Picart, D., Milner, F. A., & Thiéry, D. (2015). Optimal Treatment Schedule in Insect Pest Control in Viticulture. *Mathematical Population Studies*, 22(3), 172-181. <https://doi.org/10.1080/08898480.2015.1049107>

Pingault, N., Pleyber, É., Champeaux, C., Guichard, L., & Omon, B. (2009). Produits phytosanitaires et protection intégrée des cultures : L'indicateur de fréquence de traitement. *Notes et études socio-économiques*, 32.

Piraux, M., Silveira, L., Diniz, P., & Duque, G. (2010). *LA TRANSITION AGROECOLOGIQUE COMME UNE INNOVATION SOCIO-TERRITORIALE.*

Pirrello, C., Mizzotti, C., Tomazetti, T. C., Colombo, M., Bettinelli, P., Prodorutti, D., Peressotti, E., Zulini, L., Stefanini, M., Angeli, G., Masiero, S., Leocir, J. W., Hausmann, L., & Vezzulli, S. (2019). *Emergent Ascomycetes in Viticulture: An Interdisciplinary Overview* (1394). 10(1394), Article 1394. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01394>

Polge De Combret - Champart, L., Guilpart, N., Mérot, A., Capillon, A., & 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. <https://doi.org/10.1111/sum.12071>

Pomarici, E., Asioli, D., Vecchio, R., & Næs, T. (2018). Young consumers' preferences for water-saving wines : An experimental study. *Wine Economics and Policy*, 7(1), 65-76. <https://doi.org/10.1016/j.wep.2018.02.002>

Potts, S. G., Imperatriz-Fonseca, V. L., Ngo, H. T., Biesmeijer, J. C., Breeze, T. D., Dicks, L. V., Garibaldi, L. A., Hill, R., Settele, J., & Vanbergen, A. J. (2016). *The assessment report on pollinators, pollination and food production : Summary for policymakers.* Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.

Price, R. H. (1892). *Black Rot of the Grape : Physalospora Bidwellii, Sachs.* Texas Agricultural and Mechanical College System.

Prost, C. (2023). *Enquête Pratiques culturelles en viticulture en 2019 IFT et nombre de traitements Données révisées* (Rapport Technique 4; Chiffres & données). Ministère de la transition et la cohésion des territoires.

Prost, L. (2019). *La recherche agronomique au prisme de la conception* [Rapport HDR]. Université Paris-Est – Ecole doctorale ABIES.

Puech, C., Brulaire, A., Paraiso, J., & Faloya, V. (2021). Collective design of innovative agroecological cropping systems for the industrial vegetable sector. *Agricultural Systems*, 191, 103153. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103153>

Queyrel, W., Van Inghelandt, B., Colas, F., Cavan, N., Granger, S., Guyot, B., Reau, R., Derrouch, D., Chauvel, B., Maillot, T., & Colbach, N. (2023). Combining expert knowledge and models in participatory workshops with farmers to design sustainable weed management strategies. *Agricultural Systems*, 208, 103645. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103645>

R4P. (2020). *Qu'est-ce que la résistance aux PPP ?* <https://www.r4p-inra.fr/fr/quest-ce-que-la-resistance-aux-ppp/>

- Raynal, M., Davadan, L., Lely, D., Magot, C., Gizardin, F., Taillée, M., & Robichon, G. (2022). Experimentation in the vineyard of an insurance protocol to cover the harvest's risk of damage due to cryptogamic diseases linked to the reduction of phytosanitary inputs. *BIO Web of Conferences*, 50, 04008. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225004008>
- Raynal, M., Davy, A., Heinzlé, Y., & Guittard, S. (2013). *La réduction maîtrisée des doses de produits phytosanitaires*.
- Reau, R., Meynard, J.-M., Robert, D., & Gitton, C. (1996). *Reau, R., Meynard, J.M., Robert, D., Gitton, C.* 52-62pp.
- Regnault-Roger, C. (2014). *Produits de protection des plantes : Innovation et sécurité pour une agriculture durable*. Tec & doc-Lavoisier.
- Regnault-Roger, C., Fabres, G., & Philogène, B. (2005). *Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement*. Éd. Tec & doc.
- Ries, S. M. (1999). *Report on Plant Diseases—Black Rot of Grape*. University of Illinois Extension. <http://ipm.illinois.edu/diseases/series700/rpd703/#:~:text=December%201999&text=Black%20rot%2C%20caused%20by%20the,stem%2C%20tendrils%2C%20and%20fruit>.
- Rigal, S., Dakos, V., Alonso, H., Auniņš, A., Benkő, Z., Brotons, L., Chodkiewicz, T., Chylarecki, P., De Carli, E., Del Moral, J. C., Domşa, C., Escandell, V., Fontaine, B., Foppen, R., Gregory, R., Harris, S., Herrando, S., Husby, M., Ieronymidou, C., ... Devictor, V. (2023). Farmland practices are driving bird population decline across Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(21), e2216573120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2216573120>
- Rinaldi, P., Skaventzou, M., Rossi, M., Comparini, C., Sofia, J., Molitor, D., & Mugnai, L. (2013). *Guignardia bidwellii*. Epidemiology and symptoms development in mediterranean environment. *Journal of Plant Pathology*, 95, S1.74-S1.75.
- Robin, M.-H. (2014). *Analyse et modélisation des effets des pratiques culturales et de la situation de production sur les dégâts causés par les bioagresseurs des cultures. Application au blé d'hiver*. Université de Toulouse.
- Robin, M.-H., Bancal, M.-O., Cellier, V., Délos, M., Felix, I., Launay, M., Magnard, A., Olivier, A., Robert, C., Rolland, B., Sache, I., & Aubertot, J.-N. (2018). IPSIM-Web, An Online Resource for Promoting Qualitative Aggregative Hierarchical Network Models to Predict Plant Disease Risk : Application to Brown Rust on Wheat. *Plant Disease*, 102(3), 488-499. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-16-1816-SR>
- Robin, M.-H., Colbach, N., Lucas, P., Montfort, F., Cholez, C., Debaeke, P., & Aubertot, J.-N. (2013). Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and Abiotic and Biotic Environment. II. Proof of Concept : Design of IPSIM-Wheat-Eyespot. *PLoS ONE*, 8(10), e75829. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075829>
- Romero, P., Navarro, J. M., & Ordaz, P. B. (2022). Towards a sustainable viticulture : The combination of deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards. A review and update. *Agricultural Water Management*, 259, 107216. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107216>
- Ronzon, C. (1987). *Modélisation du comportement épidémique du mildiou de la vigne : Étude du rôle de la phase sexuée de Plasmopara Viticola*. Université de Bordeaux II.
- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. *Phytopathologia Mediterranea*, 51(3), 457-479.

- Rossi, V., Giosuè, S., & Caffi, T. (2009). MODELLING THE DYNAMICS OF INFECTIONS CAUSED BY SEXUAL AND ASEQUAL SPORES DURING PLASMOPARA VITICOLA EPIDEMICS. *Journal of Plant Pathology*, 91(3), 615-627. JSTOR.
- Rossi, V., Giosuè, S., & Caffi, T. (2010). Modelling Plant Diseases for Decision Making in Crop Protection. In E.-C. Oerke, R. Gerhards, G. Menz, & R. A. Sikora (Éds.), *Precision Crop Protection—The Challenge and Use of Heterogeneity* (p. 241-258). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9\\_15](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9_15)
- Rossi, V., Onesti, G., Legler, S. E., & Caffi, T. (2015). Use of systems analysis to develop plant disease models based on literature data : Grape black-rot as a case-study. *European Journal of Plant Pathology*, 141(3), 427-444. <https://doi.org/10.1007/s10658-014-0553-z>
- Rossi, V., Salinari, F., Poni, S., Caffi, T., & Bettati, T. (2014). Addressing the implementation problem in agricultural decision support systems : The example of vite.net®. *Computers and Electronics in Agriculture*, 100, 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.011>
- Rossing, W. A. H., Meynard, J. M., & Van Ittersum, M. K. (1997). Model-based explorations to support development of sustainable farming systems : Case studies from France and the Netherlands. *European Journal of Agronomy*, 7(1-3), 271-283. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(97\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(97)00042-7)
- Roussel, C. (1971). Etude comparative de l'évolution du mildiou et du black-rot de la vigne. *Phytoma*, 228, 19-24.
- Roznik, D., Hoffmann, S., & Kozma, P. (2017). Screening a large set of grape accessions for resistance against black rot (*Guignardia bidwellii*/(ELL.)). 67, 149-157.
- Rumbolz, J., & Gubler, W. D. (2005). Susceptibility of grapevine buds to infection by powdery mildew *Erysiphe necator*. *Plant Pathology*, 54(4), Article 4. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01212.x>
- Salaun, P.-A., & Bourdet, S. (2021). *La lutte contre le mildiou en viticulture bio*.
- Salembier, C. (2019). *Stimuler la conception distribuée de systèmes agroécologiques par l'étude de pratiques innovantes d'agriculteurs* [Agronomie]. Université Paris Saclay.
- Salembier, C., Elverdin, J. H., & Meynard, J.-M. (2016). Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>
- Salembier, C., Segrestin, B., Berthet, E., Weil, B., & Meynard, J.-M. (2018). Genealogy of design reasoning in agronomy : Lessons for supporting the design of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 164, 277-290. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.05.005>
- Sall, M. A. (1982). *Perennation of Powdery Mildew in Buds of Grapevines*. <https://doi.org/10.1094/PD-66-678>
- Savary, S., Teng, P. S., Willocquet, L., & Nutter, F. W. (2006). Quantification and Modeling of Crop Losses : A Review of Purposes. *Annual Review of Phytopathology*, 44(1), 89-112. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143342>
- Schäufele, I., & Hamm, U. (2017). Consumers' perceptions, preferences and willingness-to-pay for wine with sustainability characteristics : A review. *Journal of Cleaner Production*, 147, 379-394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.118>

- Schnee, S. (2008). *Facteurs de résistance à l'oïdium (Erysiphe necator Schwein.) chez la vigne (Vitis vinifera L.)*. Université de Neuchâtel.
- Schoch, C. L., Shoemaker, R. A., Seifert, K. A., Hambleton, S., Spatafora, J. W., & Crous, P. W. (2006). A multigene phylogeny of the Dothideomycetes using four nuclear loci. *Mycologia*, 98(6), 1041-1052. <https://doi.org/10.1080/15572536.2006.11832632>
- Schumacher, S., Mertes, C., Wohlfahrt, Y., Kaltenbach, T., Schwab, S., Eisenmann, B., Kauer, R., Bleyer, G., Berkelmann-Loehnertz, B., & Fuchs, R. (2022). VITIFIT : Aiming for copper reduction in organic viticulture - Improvement of established strategies and new techniques for plant protection against *Plasmopara viticola*. *BIO Web of Conferences*, 50, 03008. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225003008>
- Sédillot, B. (2023, juin). *La pollution chimique des cours d'eau et des plans d'eau en France de 2000 à 2020*.
- Serrano, E., Petit, A., Gaviglio, C., Gontier, L., Dufourcq, T., Cogo, R., Massol, T., Mora, J., Rafenne, X., & Cichosz, B. (2019). Ecoviti Sud-Ouest : Performances de systèmes viticoles innovants à faible niveau d'intrants phytopharmaceutiques sur le bassin de production Sud-Ouest. *Innovations Agronomiques*, 76, 254-272pp.
- Silva, V., Mol, H. G. J., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils – A hidden reality unfolded. *Science of The Total Environment*, 653, 1532-1545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441>
- Simonovici, M. (2019). *Enquête Pratiques phytosanitaires en viticulture en 2016* (Agreste Les Dossiers) [Rapport technique]. Ministère de la transition écologique et solidaire.
- Simonovici, M., & Caray, J. (2023). *Enquête des pratiques culturales en 2019 IFT et nombre de traitements Données révisées* (ECOPHYTO) [Rapport Technique]. Ministère de la transition écologique.
- Skardon, J. (2011). The role of trust in innovation networks. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 26, 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.10.565>
- SOWINE, & Dynata. (2024). *Décryptage des tendances de consommation dans l'univers des vins et spiritueux en 2024*. SOWINE®. <https://www.sowine.com/blog/decryptage-barometre-2024/>
- Spotts, R. A. (1977). Effect of Leaf Wetness Duration and Temperature on the Infectivity of *Guignardia bidwellii* on Grape Leaves. *Phytopathology*, 77(11), 1378. <https://doi.org/10.1094/Phyto-67-1378>
- Statista. (2024a). *Global pesticide consumption 1990-2022*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1263077/global-pesticide-agricultural-use/>
- Statista. (2024b). *Pesticide consumption worldwide 2022*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1263069/global-pesticide-use-by-country/>
- Stef, C. (2024, mars). *4 usages phytos menacés en vigne par les futurs retraits*. <https://www.vitisphere.com/>. <https://www.vitisphere.com//actualite-101503-4-usages-phytos-menaces-en-vigne-par-les-futurs-retraits.html>
- Storkey, J., & Cussans, J. W. (2007). Reconciling the conservation of in-field biodiversity with crop production using a simulation model of weed growth and competition. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122(2), 173-182. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.031>

Strizyk, S. (1994, décembre). *Une deuxième génération de modèles systémiques : Les potentiels systèmes—Vers une utilisation appuyée sur réseaux de stations météorologiques*. ANPP - Quatrième conférence internationale sur les maladies des plantes, Bordeaux.

Szabó, M., Csikász-Krizsics, A., Dula, T., Farkas, E., Roznik, D., Kozma, P., & Deák, T. (2023). Black Rot of Grapes (*Guignardia bidwellii*)—A Comprehensive Overview. *Horticulturae*, *9*(2), 130. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020130>

Tacoli, F., Pavan, F., Cargnus, E., Tilatti, E., Pozzebon, A., & Zandigiacomo, P. (2017). Efficacy and Mode of Action of Kaolin in the Control of *Empoasca vitis* and *Zygina rhamni* (Hemiptera : Cicadellidae) in Vineyards. *Journal of Economic Entomology*, *110*(3), 1164-1178. <https://doi.org/10.1093/jee/tox105>

Thiollet-Scholtus, M., Muller, A., Abidon, C., Audema, P., Bailly, C., Chaumonnot, S., Grignon, J., Keichinger, O., Klein, C., Koller, R., Langenfeld, A., Ley, L., Lemarquis, G., Nassr, N., Nibaudeau, R., Rabolin-Meinrad, C., Ribeiro, S., Schneider, C., & Weissbart, J. (2019). Performances multicritères de systèmes viticoles à réduction drastique d'intrants dans le vignoble alsacien (PEPSVI). *Innovations Agronomiques*, *76*, 219-236pp. <https://doi.org/10.15454/MGHRXL>

Thiollet-Scholtus, M., Muller, A., Abidon, C., Grignon, J., Keichinger, O., Koller, R., Langenfeld, A., Ley, L., Nassr, N., Rabolin-Meinrad, C., & Wohlfahrt, J. (2021). Multidimensional assessment demonstrates sustainability of new low-input viticulture systems in north-eastern France. *European Journal of Agronomy*, *123*, 126210. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126210>

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, *418*(6898), 671-677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>

Toffolini, Q., & Jeuffroy, M.-H. (2022). On-farm experimentation practices and associated farmer-researcher relationships : A systematic literature review. *Agronomy for Sustainable Development*, *42*(6), 114. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00845-w>

Ugalde, D. (2021). *Conception d'une démarche participative avec des consommateurs et des viticulteurs pour améliorer le déploiement des pratiques environnementales dans les vignobles '' : Etude de cas au sein du Cabernet d'Anjou*. Sciences agricoles. Université d'Angers.

Ullrich, C. I., Kleespies, R. G., Enders, M., & Koch, E. (2009). *Biology of the black rot pathogen, Guignardia bidwellii, its development in susceptible leaves of grapevine Vitis vinifera* (3). *61*(3), Article 3.

Urruty, N., Deveaud, T., Guyomard, H., & Boiffin, J. (2016). Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture. *European Journal of Agronomy*, *80*, 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.07.004>

Valdés-Gómez, H., Fermaud, M., Calonnec, A., & Gary, C. (2006). *Relationships between vine vigour and the incidence of grey mold and powdery mildew in Aranel grapevine*.

Valdés-Gómez, H., Gary, C., Cartolaro, P., Lolas-Caneo, M., & Calonnec, A. (2011). Powdery mildew development is positively influenced by grapevine vegetative growth induced by different soil management strategies. *Crop Protection*, *30*(9), Article 9. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.05.014>

- Vall, E., Chia, E., Blanchard, M., Koutou, M., Coulibaly, K., & Andrieu, N. (2016). La co-conception en partenariat de systèmes agricoles innovants. *Cahiers Agricultures*, 25(1), 15001. <https://doi.org/10.1051/cagri/2016001>
- Vedy-Zecchini, M.-A. (2020). *Analyse et modélisation des effets du système de culture et de la situation de production sur les principaux bioagresseurs du tournesol*. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Vereijken, P. (1997). A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy*, 7(1-3), 235-250. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(97\)00039-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(97)00039-7)
- Viala, P., & Ravaz, L. (1886). *Mémoire sur une nouvelle maladie de la vigne : Le black rot (pourriture noire)*. Bureaux du Progrès agricole et viticole.
- Viguès, V., & Massol, T. (2018). *Bulletin spécial CONFUSION SEXUELLE*. Chambre d'agriculture du Tarn.
- 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.
- Vinovalie. (2022, juin 8). *Pur&quilibre : Nouvelles cuvées Zéro Résidu de Pesticides*. <https://www.vinovalie.com/purquilibre-nouvelles-cuvees-zero-residu-de-pesticides>
- Vinovalie. (2024). *Une passion collective*. <https://www.vinovalie.com/une-passion-collective>
- Wallach, D., Goffinet, B., Bergez, J.-E., Debaeke, P., Leenhardt, D., & Aubertot, J.-N. (2001). Parameter Estimation for Crop Models : A New Approach and Application to a Corn Model. *Agronomy Journal*, 93(4), 757-766. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.934757x>
- Wang, X. (2021). *Modélisation des effets des pratiques culturales, du climat et de l'environnement de la parcelle sur la maladie oïdium pour la prévision des dégâts de la vigne* [Mémoire de fin d'études]. Université de Reims Champagne-Ardenne.
- Wilcox, W. F. (2003). *Black Rot*. Cornell Cooperative Extension.
- Wilocquet, L., Berud, F., Raoux, L., & Clerjeau, M. (1998). Effects of wind, relative humidity, leaf movement and colony age on dispersal of conidia of *Uncinula necator*, causal agent of grape powdery mildew. *Plant Pathology*, 47(3), Article 3.
- Wilocquet, L., Colombet, D., Rougier, M., Fargues, J., & Clerjeau, M. (1996). Effects of radiation, especially ultraviolet B, on conidial germination and mycelial growth of grape powdery mildew. *European Journal of Plant Pathology*, 102(5), Article 5.
- Witten, I. H., Frank, E., & Hall. (2011). *Data Mining : Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-19715-5>
- Yobregat, O. (2022). Variétés résistantes : Un choix de plus en plus large pour limiter les intrants au vignoble. *La Grappe d'Autan*, 123, 2-5 pp.
- Zahavi, T., & Reuveni, M. (2012). Effect of grapevine training systems on susceptibility of berries to infection by *Erysiphe necator*. *European Journal of Plant Pathology*, 133(3), Article 3.
- Zahavi, T., Reuveni, M., Scheglov, D., & Lavee, S. (2001). Effect of Grapevine Training Systems on Development of Powdery Mildew. *European Journal of Plant Pathology*, 107(5), Article 5. <https://doi.org/10.1023/A:1011289018599>

Zanzotto, A., & Morroni, M. (2016). Major biocontrol studies and measures against fungal and oomycete pathogens of grapevine. In S. Compant & F. Mathieu (Éds.), *Biocontrol of major grapevine diseases : Leading research* (1<sup>re</sup> éd., p. 1-34). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780647128.0001>

# Annexe

Annexe A : Rapport annuel rendu aux viticulteurs chaque année



---

**Projet VITI OBS**  
**Rapport d'essai 2021**

---

**CONFIDENTIEL**



## **TABLE DES MATIERES**

<b>1</b>	<b>Objectif de l'essai</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Conditions expérimentales</b> .....	<b>4</b>
2.1	Dispositif expérimental .....	4
2.2	Cahier des charges testé : Raisonné .....	5
2.3	Climatologie.....	6
<b>3</b>	<b>Résultats</b> .....	<b>7</b>
3.1	Bilan des traitements et sur l'IFT.....	7
3.1.1	Programme de traitement .....	7
3.1.2	Comparaison des IFT.....	9
3.1.3	Taux de couverture des pluies contaminatrice selon DecITrait® .....	10
3.2	Performances techniques .....	11
3.2.1	Maîtrise des bioagresseurs .....	11
3.2.2	Comparaison du rendement.....	13
3.2.3	Analyse de résidus .....	14
3.3	Performances économiques .....	15
3.3.1	Comparaison du coût de traitement.....	15
<b>4</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>15</b>

**- CONFIDENTIEL -**

Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 2/15

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Plan d'expérimentation de la parcelle	4
Figure 2 : Pluies cumulées et températures moyennes mensuelles	6
Figure 3 : Comparaison des IFT par modalité et par rapport aux références HVE	9
Figure 4 : Graphique ombrothermique 2021 issu de DeciTrait®	10
Figure 5 : Comparaison de la fréquence et de l'intensité d'attaque du mildiou sur feuille par modalité	11
Figure 6 : Comparaison de la fréquence et de l'intensité d'attaque du black rot sur feuille par modalité	12
Figure 7 : Comparaison de la fréquence et de l'intensité d'attaque de la cicadelle des grillures sur feuille par modalité	12
Figure 8 : Comparaison de la fréquence et de l'intensité d'attaque du botrytis sur grappe par modalité	13
Figure 9 : Comparaison du rendement en hectolitre par hectare par modalité	14
Figure 10 : Comparaison des analyses de résidus par modalité	14
Figure 11 : Comparaison des coûts de traitement fongique par modalité	15

## TABLE DES TABLEAUX

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

- CONFIDENTIEL -

Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 3/15

## 1 OBJECTIF DE L'ESSAI

L'objectif de cet essai est de vérifier si une conduite en agriculture conventionnelle raisonnée avec une réduction de 50 % de l'IFT total hors biocontrôle par rapport à l'IFT total hors biocontrôle de référence HVE permet d'obtenir une récolte acceptable en qualité et en quantité sans perte de marge nette.

## 2 CONDITIONS EXPERIMENTALES

### 2.1 Dispositif expérimental

La parcelle se situe sur l'exploitation du [REDACTED]. Elle est conduite en agriculture conventionnelle. Les rangs sont comptés en partant du hangar (voir sens de la flèche rouge). Les modalités testées sont les suivantes :

	Raisonné (CDC)	VITI
Nombre de rang	8	
Rangs	5-12	Reste de la parcelle (13-20)
Taille	Guyot	Guyot
Affectation parcellaire	IGP Premium	
Objectif de production	90 hl/ha	



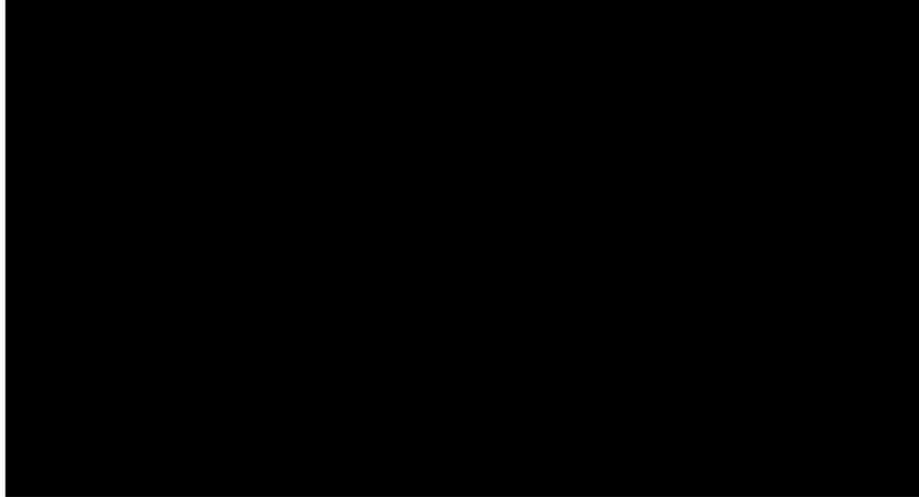
Figure 1 : Plan d'expérimentation de la parcelle [REDACTED]

- CONFIDENTIEL -

Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 4/15

## 2.2 Cahier des charges testé : Raisonné



- CONFIDENTIEL -  
Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 5/15

## 2.3 Climatologie

L'année 2021 a été, sauf au printemps, plus pluvieuse que les années précédentes (Figure 2). De ce fait, les températures ont été un peu plus basses que la moyenne. Les précipitations des mois de mai à juillet ont été beaucoup plus élevées que la moyenne, ce qui a engendré un millésime très favorable au développement des maladies de la vigne.

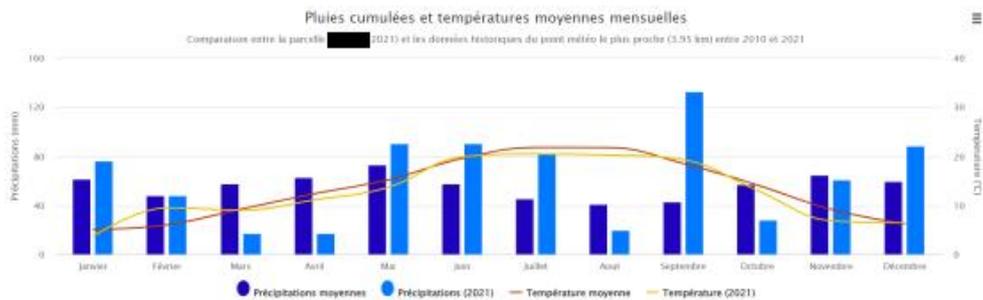


Figure 2 : Pluies cumulées et températures moyennes mensuelles

- CONFIDENTIEL -  
Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 6/15

### 3 RESULTATS

---

#### 3.1 Bilan des traitements et sur l'IFT

##### 3.1.1 Programme de traitement

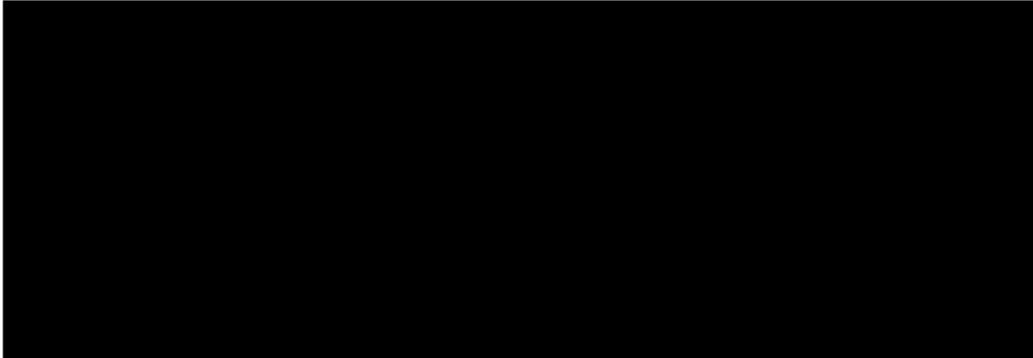
##### 3.1.1.1 Modalité VITI



- CONFIDENTIEL -  
Rapport d'essai • VITI OBS • - Année 2021

Page 7/15

3.1.1.2 Modalité Raisonné



### 3.1.2 Comparaison des IFT

L'objectif initial de réduire de 50 % l'IFT total hors biocontrôle par rapport à l'IFT référence HVE n'est pas respecté. En effet, la réduction est 35 % par rapport à l'IFT total hors biocontrôle HVE et une réduction de 28 % par rapport à l'IFT total hors biocontrôle de la modalité VITI (Figure 3). Cette réduction a été possible par une réduction des fongicides hors produits de biocontrôle contre l'oïdium et à une réduction des doses de produits appliquées grâce à l'OAD DeciTrait®. Le même nombre de passages ont été effectués sur les deux modalités soit 11 passages.

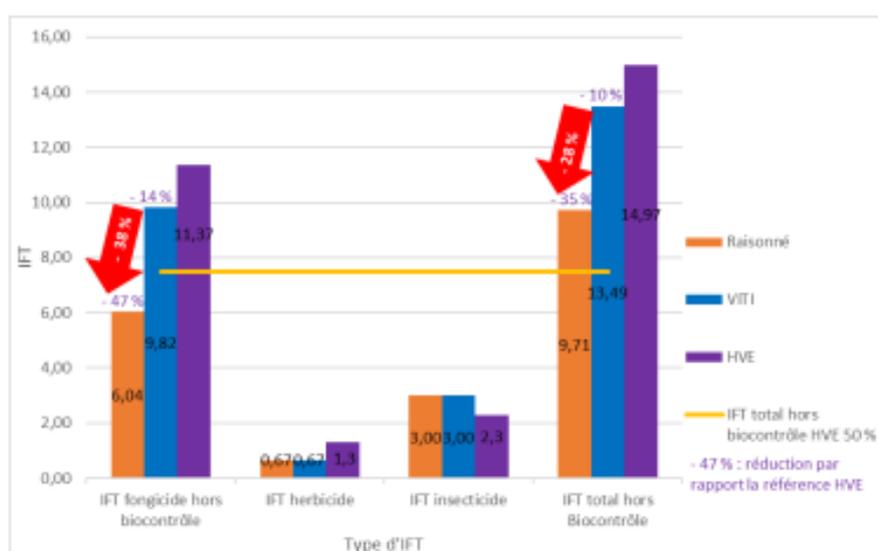


Figure 3 : Comparaison des IFT par modalité et par rapport aux références HVE

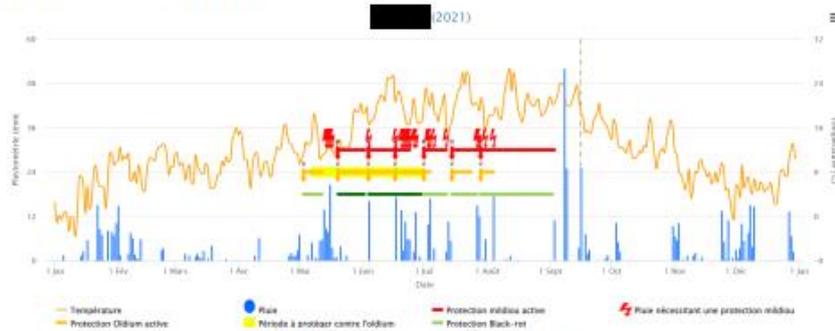
- CONFIDENTIEL -

Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 9/15

### 3.1.3 Taux de couverture des pluies contaminatrices selon DeciTrait®

Selon l'hypothèse 2 (pluviométrie normale) de DeciTrait®, la campagne 2021 comptabilise 21 pluies contaminatrices à couvrir pour le mildiou du 14/05/2021 au 04/08/2021. Le taux de couverture est de 71,43 %. Les pluies non couvertes se trouvent du 14/05/2021 au 17/05/2021 et du 26/06/2021 au 27/06/2021 soit 6 jours non couverts (Figure 4).



- CONFIDENTIEL -  
Rapport d'essai « VITI DBS » - Année 2021

Page 10/15

## 3.2 Performances techniques

### 3.2.1 Maîtrise des bioagresseurs

#### 3.2.1.1 Appréciation de la pression sanitaire du millésime

#### 3.2.1.2 Pression sanitaire sur feuille

##### 3.2.1.2.1 Mildiou

Le mildiou a été observé sur feuille à partir de la troisième notation. La présence sur feuille est assez faible avec des fréquences d'attaque qui ne dépassent 7 % et des intensités d'attaque inférieure à 1,5 %. Sur les deux notations, la modalité Raisonné semble légèrement moins touchée par le mildiou avec une fréquence et une intensité d'attaque inférieures (Figure 5).

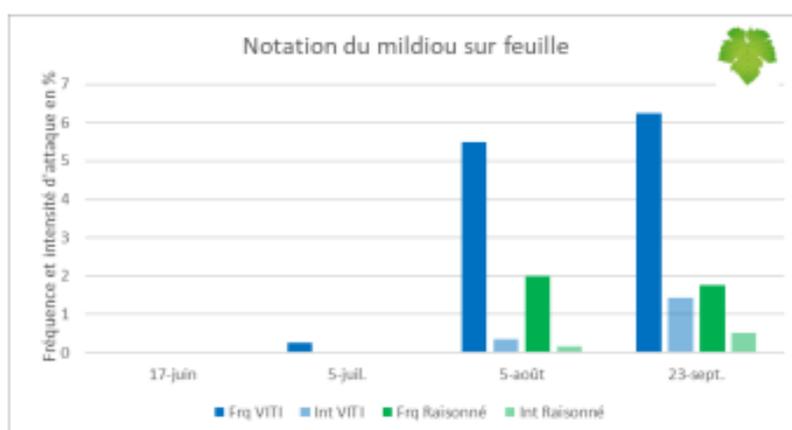


Figure 5 : Comparaison de la fréquence et de l'intensité d'attaque du mildiou sur feuille par modalité

##### 3.2.1.2.2 Oïdium

Aucun symptôme d'oïdium a été observé sur la parcelle.

##### 3.2.1.2.3 Black rot

Le black rot n'a été observé que sur la modalité VITI. La présence sur feuille est faible avec des fréquences d'attaque qui ne dépassent 5 % et des intensités d'attaque inférieure à 0,5 % (Figure 6).

- CONFIDENTIEL -

Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 11/15

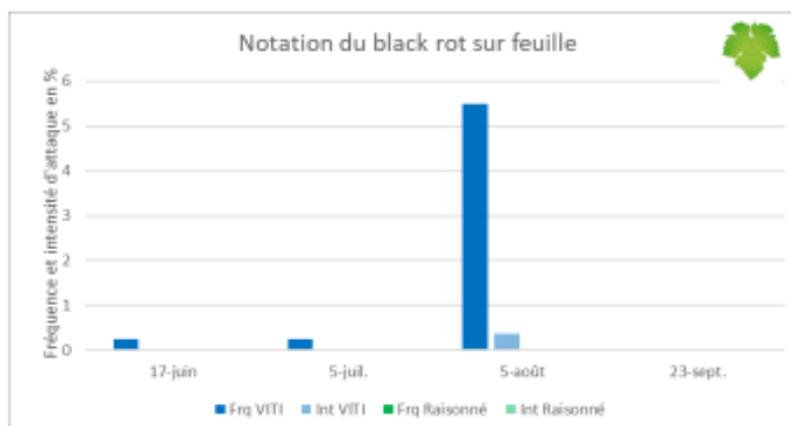


Figure 6 : Comparaison de la fréquence et de l'intensité d'attaque du black rot sur feuille par modalité

### 3.2.1.2.4 Cicadelle des grillures

La cicadelle des grillures a été observé que lors de la dernière notation avant la vendange. Les deux modalités sont autant touchées avec une fréquence et une intensité d'attaque légèrement supérieure pour la modalité VITI (Figure 7). Ce résultat n'est pas étonnant car la même protection a été mis en place sur les deux modalités.

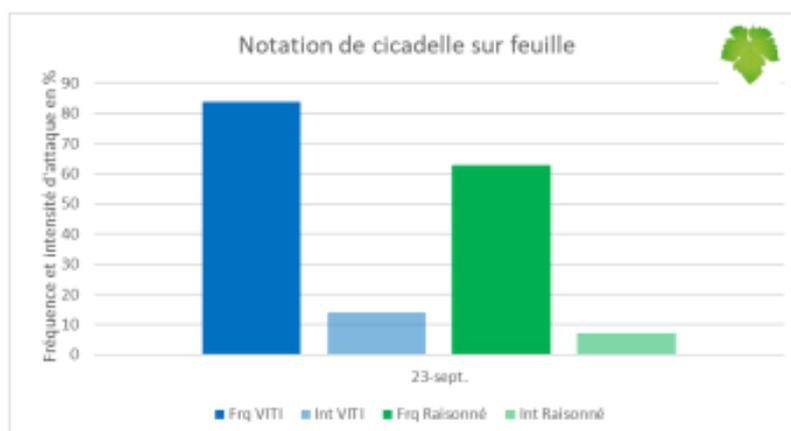


Figure 7 : Comparaison de la fréquence et de l'intensité d'attaque de la cicadelle des grillures sur feuille par modalité

- CONFIDENTIEL -

Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 12/15

### 3.2.1.3 Pression sanitaire sur grappe

#### 3.2.1.3.1 Mildiou

Lors de la troisième notation, de très légers symptômes d'oïdium ont été observés sur les deux modalités. Cette présence est anecdotique.

#### 3.2.1.3.2 Oïdium

Aucun symptôme de mildiou a été observé sur la parcelle.

#### 3.2.1.3.3 Black rot

Aucun symptôme de mildiou a été observé sur la parcelle.

#### 3.2.1.3.4 Botrytis

Le botrytis a été observé que lors de la dernière notation avant la vendange. Les deux modalités sont autant touchées avec une fréquence et une intensité d'attaque légèrement supérieure pour la modalité VITI (Figure 8). Ce résultat n'est pas étonnant car aucune protection contre le botrytis a été mise en place sur les deux modalités.

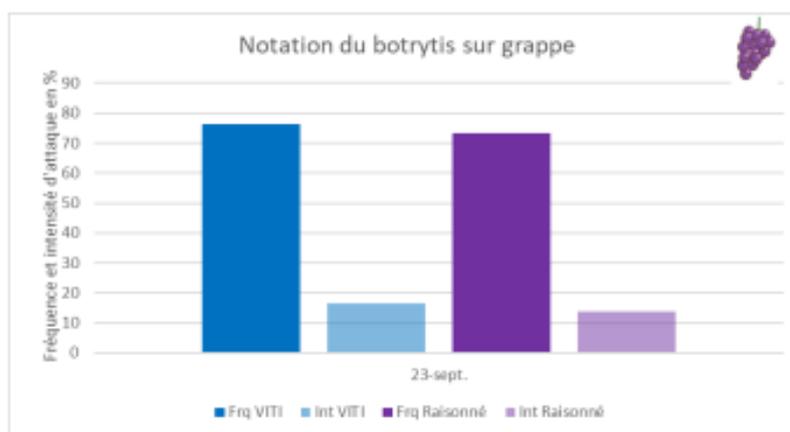


Figure 8 : Comparaison de la fréquence et de l'intensité d'attaque du botrytis sur grappe par modalité

### 3.2.2 Comparaison du rendement

La modalité Raisonné permet d'obtenir un rendement supérieur à 80 hL/ha mais légèrement inférieur à la modalité VITI (Figure 9). Pour rappel, aucune différence sur les symptômes de maladies n'a été observés entre les modalités. De ce fait, les rendements des deux modalités peuvent être considérés comme équivalents.

- CONFIDENTIEL -

Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 13/15

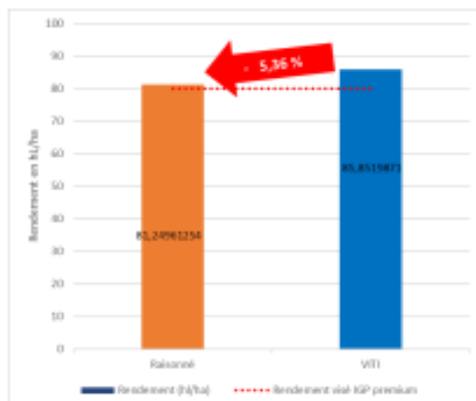
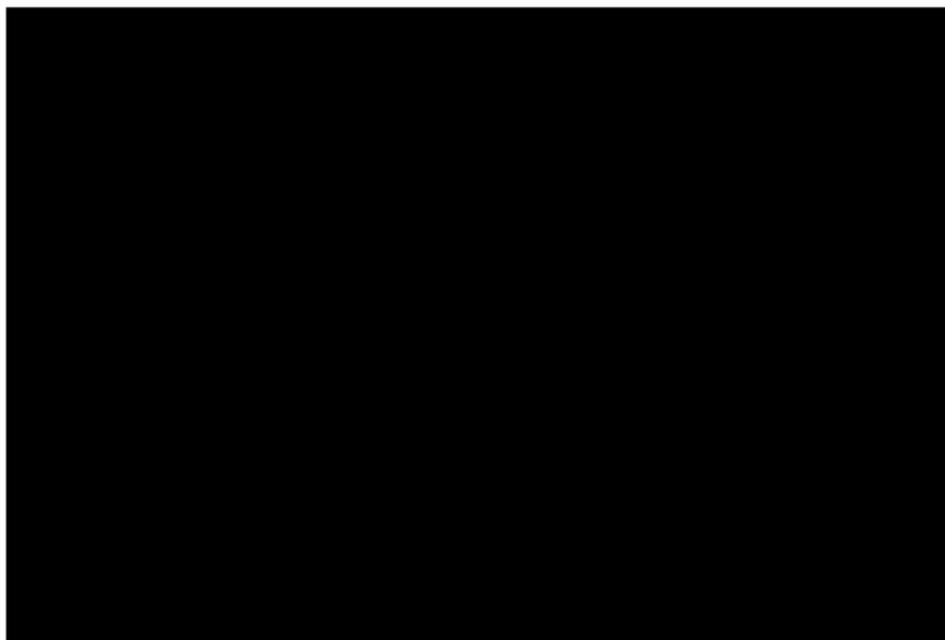


Figure 9 : Comparaison du rendement en hectolitre par hectare par modalité

### 3.2.3 Analyse de résidus



- CONFIDENTIEL -

Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 14/15

### 3.3 Performances économiques

#### 3.3.1 Comparaison du coût de traitement

La différence de coût de traitement fongique entre les deux modalités vient exclusivement de la réduction des doses de produit appliqué. Au total, cette réduction est de 13,4%. Cette réduction représente 75,89 € par hectare (Figure 11).

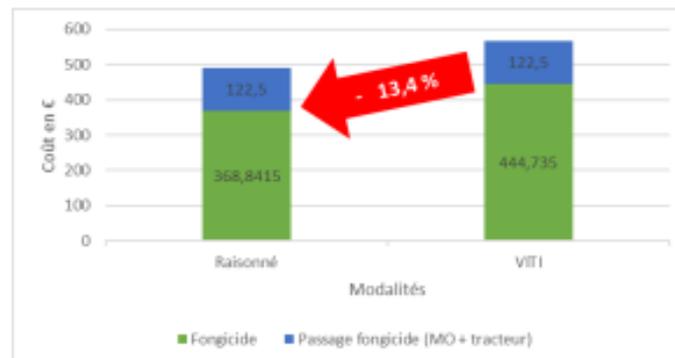


Figure 11 : Comparaison des coûts de traitement fongique par modalité

## 4 CONCLUSION

La pression phytosanitaire du millésime a été forte surtout pour le black rot et le mildiou. Le cahier des charges « Raisonné » permet d'obtenir une protection phytosanitaire équivalente à celle du viticulteur tout réduisant la quantité de produit phytosanitaire utilisée durant la saison. Cependant l'objectif de réduction de 50 % de l'IFT total hors produits de biocontrôle n'est pas atteint. La réduction de la quantité de produit phytosanitaire permet de réduire le coût de la protection phytosanitaire. Le cahier des charges « Raisonné » permet aussi de maintenir un rendement important supérieur à la limite fixée par le cahier des charges IGP premium.

Pour cette première année, le cahier des charges « Raisonné » obtient des résultats très intéressants en maintenant une qualité et une quantité de vendange très bonne.

- CONFIDENTIEL -

Rapport d'essai « VITI OBS » - Année 2021

Page 15/15

# Résumé de la thèse

La filière viticole doit aujourd'hui changer ses pratiques pour réduire durablement les pesticides en raison des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine, pour répondre à la demande sociétale et réglementaire. Dès 2008, le plan Ecophyto I puis Ecophyto II (2015) sont lancés en France pour répondre à l'objectif de réduction de moitié de l'utilisation des pesticides en 2018 puis en 2025 par rapport à 2008. De nombreux leviers techniques pour réduire le recours aux pesticides existent et ont été évalués précédemment au travers des projets DEPHY EXPE (2013-2018), DEPHY EXPE 2 (2018-2024) et DEPHY FERME (2010-2024). La co-conception de systèmes moins dépendants des pesticides combinant plusieurs leviers permet une réduction plus importante du recours aux pesticides mais leur transfert chez les viticulteurs reste encore limité.

Pour accompagner les viticulteurs dans la transition vers ces systèmes viticoles, cette thèse propose : i) une démarche participative originale combinant des ateliers de co-conception, des expérimentations à la ferme et des ateliers de co-évaluation impliquant différentes parties prenantes dont 20 viticulteurs coopérateurs de la coopérative VINOVALIE dans le Sud-Ouest de la France (vignoble de Fronton, Gaillac et Cahors) et ii) le développement et l'évaluation des modèles Injury Profil Simulator (IPSIM) pour trois maladies de la vigne : mildiou, oïdium et black rot.

La thèse a permis la co-conception de quatre stratégies de protection du vignoble visant à réduire l'utilisation des pesticides : trois en viticulture conventionnelle (« Raisonné », « 0 Résidu » et « Biocontrôle ») et une en viticulture biologique (« BIO à 2 kg de cuivre »). Ces stratégies ont été mises en expérimentation sur une parcelle de minimum 0.5 hectare chez les viticulteurs en 2021 et 2022. Pour évaluer la performance de ces stratégies co-conçues, l'Indicateur de Fréquence de Traitement total (IFTt), l'Indicateur de Fréquence de Traitement fongicide (IFTf), la quantité de cuivre, les notations des maladies sur feuilles et sur grappes, le rendement et le coût des fongicides ont été suivis. La stratégie était appliquée sur la moitié de la parcelle soit au minimum 0.25 hectare et en comparaison le reste de la parcelle était conduite avec la stratégie du viticulteur. En moyenne, les stratégies co-conçues « Raisonné », « 0 Résidu » et « Biocontrôle » ont réduit le IFTt de -32,1%, -42,2% et -87,8%, par rapport à la référence HVE et la stratégie « BIO à 2 kg de cuivre » a permis de limiter la quantité maximale de cuivre à 2 kg/an/hectare. Cette réduction a été effectuée exclusivement grâce à la réduction des fongicides. Les stratégies de protection du vignoble sauf la stratégie « Biocontrôle » (n'autorisant que des produits de biocontrôle en fongicide) ont globalement maintenu les rendements et réduit le coût des fongicides par rapport à la stratégie du viticulteur. Le transfert à plus grande échelle de la stratégie « 0 Résidu » a été initié en 2023 avec des résultats plus contrastés en dégâts de mildiou et en perte de rendement à cause d'une pression historiquement forte du mildiou.

La thèse a également permis la construction des trois modèles IPSIM-VIGNE pour prédire la sévérité de dégâts du mildiou, du black rot et de l'oïdium sur les grappes à la véraison en fonction des pratiques du viticulteur, du pédoclimat et de l'environnement de la parcelle. L'évaluation de la qualité prédictive des IPSIM-VIGNE-Mildiou et IPSIM-VIGNE-Black rot a été réalisée grâce une base de données construite durant la thèse. Cette première évaluation de la qualité prédictive est encourageante (respectivement de 65% pour IPSIM-VIGNE-Mildiou et de 48% pour IPSIM-VIGNE-Black rot) mais des améliorations sont nécessaires avant leur utilisation comme outil d'aide à la conception pour concevoir des stratégies de protection du vignoble moins consommatrices de pesticides.

# Abstract

Today, the winegrowing sector needs to change its practices to achieve a sustainable reduction in the use of pesticides, because of their harmful effects on the environment and human health, and to meet societal and regulatory demands. In 2008, the Ecophyto I and then Ecophyto II (2015) plans were launched in France to halve pesticide use by 2018 and 2025 compared to 2008. Numerous technical levers for reducing the use of pesticides exist and were previously evaluated through the DEPHY EXPE (2013-2018), DEPHY EXPE 2 (2018-2024), and DEPHY FERME (2010-2024) projects. The co-design of less pesticide-dependent systems combining several levers enables a greater reduction in pesticide use, but their transfer to winegrowers is still limited.

To help winegrowers make the transition to these systems, this thesis proposes: i) an original participatory approach combining co-design workshops, on-farm experiments, and co-assessment workshops involving various stakeholders, including 21 cooperative winegrowers from the VINOVALIE cooperative in south-western France (Fronton, Gaillac and Cahors vineyards) and ii) the development and assessment of Injury Profil Simulator (IPSIM) models for three grapevine diseases: downy mildew, powdery mildew, and black rot.

The thesis led to the co-design of four management strategies for vineyard protection to reduce pesticide use: three for conventional viticulture (“Integrated Pest Management (IPM)”, “0 Residu” and “Biocontrol”) and one for organic viticulture (“ORG at 2kg of copper”). These strategies have been tested on a minimum 0.5-hectare field at winegrowers' farms in 2021 and 2022. To assess the performance of these co-designed strategies, total treatment frequency indicators (TFIt), fungicide treatment frequency indicators (TFIf), copper quantity, leaf and bunch disease ratings, yield, and fungicide costs were monitored. The strategy was applied to half of the field, i.e. a minimum of 0.25 hectares, and in comparison, the rest of the field was managed according to the winegrower's strategy. On average, the co-designed strategies “IPM”, “0 Residu” and “Biocontrol” reduced TFIt by -32.1%, -42.2%, and -87.8%, compared with the HEV reference, and the “ORG at 2kg of copper” strategy limited the maximum amount of copper to 2 kg/year/hectare. This reduction was achieved exclusively by reducing the use of fungicides. Management strategies other than the “Biocontrol” strategy (authorizing only biocontrol products as fungicides) have generally maintained yields and reduced the fungicide cost compared with the winegrower's strategy. The larger-scale transfer of the “0 Residu” strategy was initiated in 2023, with more contrasting results regarding mildew damage and yield loss due to historically high mildew pressure.

The thesis also enabled the construction of three IPSIM-VIGNE models to predict the severity of mildew, black and powdery mildew damage to grapes at veraison, as a function of the winegrower's practices, pedoclimate, and plot environment. The predictive quality of IPSIM-VIGNE-Mildiou and IPSIM-VIGNE-Black rot was assessed using a database built during the thesis. This initial assessment of predictive quality is encouraging (respectively 65% for IPSIM-VIGNE-Mildiou and 48% for IPSIM-VIGNE-Black rot). Still, improvements are needed before they can be used as a design aid to management strategies that consume fewer pesticides.