



HAL
open science

Les facteurs d'efficacité des produits de biocontrôle contre le mildiou de la vigne : une approche par le projet BIOVIMED

Marion Cerclé

► **To cite this version:**

Marion Cerclé. Les facteurs d'efficacité des produits de biocontrôle contre le mildiou de la vigne : une approche par le projet BIOVIMED. Agronomie. 2024. dumas-04930978

HAL Id: dumas-04930978

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04930978v1>

Submitted on 5 Feb 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.

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Les facteurs d'efficacité des produits de biocontrôle contre le mildiou de la vigne : une approche par le projet BIOVIMED

*Étude des facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle
testés dans le cadre du projet BIOVIMED contre le mildiou de la
vigne et perspectives pour l'amélioration de leur expérimentation*

Marion CERCLÉ
Option CALICE
2023-2024

Maître de stage : CONSTANT Nicolas
Tutrice pédagogique : MARLIAC Gaëlle



« L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

Ce stage a reçu le soutien financier du ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire par l'intermédiaire du compte d'affectation spéciale « développement agricole et rural » (CASDAR) dans le cadre du projet Biovimed : « le BIOcontrôle en Vignoble MEDiterranéen : stratégies innovantes d'intégration en lien avec les particularités du climat méditerranéen ».

Avec
la contribution
financière du compte
d'affectation spéciale
développement
agricole et rural
CASDAR



**MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE L'ALIMENTATION**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

La responsabilité du ministère ne saurait être engagée.



FranceAgriMer

ÉTABLISSEMENT NATIONAL
DES PRODUITS DE L'AGRICULTURE ET DE LA MER

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier [REDACTED] pour m'avoir accueillie au sein de son unité et de son équipe à Rodilhan.

J'aimerais remercier mon maître de stage, Nicolas CONSTANT, pour ces six mois de stage. Je le remercie pour sa disponibilité et son aide dans la rédaction de ce mémoire, ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée et les connaissances qu'il m'a partagées.

Je tiens à remercier [REDACTED] pour ces conseils, sa disponibilité et son aide précieuse concernant l'analyse des données récoltées. Je remercie également [REDACTED] pour sa gentillesse et son aide lors de notre collaboration dans le cadre de nos stages.

J'aimerais remercier mon enseignante tutrice Gaëlle MARLIAC pour son encadrement et ses conseils qui m'ont guidée dans ma rédaction, ainsi que [REDACTED] pour ses recommandations avant le début de mon stage.

Enfin, un grand merci à toute l'équipe de l'IFV de Rodilhan pour leur sympathie. Merci aux membres avec qui j'ai eu le plaisir de travailler, [REDACTED]

RESUMÉ

Le mildiou est l'une des principales menaces pathogènes pour les vignobles et l'efficacité des traitements fongicides est de plus en plus compromise en raison de la résistance accrue des pathogènes et du retrait de certaines substances actives. Cela encourage l'adoption de solutions plus durables telles que les produits de biocontrôle, bien que leur efficacité soit souvent limitée et variable. Les résultats du réseau expérimental BIOVIMED montrent une grande variabilité dans l'efficacité de ces produits sur le mildiou, en grande partie liée aux caractéristiques spécifiques de chaque parcelle et de chaque année. Pour optimiser leur utilisation, il est crucial de connaître les spécificités et les conseils d'utilisation de chaque produit. La création d'une base de données générale est nécessaire pour recueillir et diffuser plus facilement ces informations. À partir des éléments recueillis, la qualité de pulvérisation, le positionnement des traitements et les lessivages ressortent comme les facteurs influençant le plus l'efficacité des produits testés. Les lessivages, la fréquence de renouvellement et le positionnement des traitements peuvent être intégrés dans un indicateur propre à chaque combinaison d'essai et de produit. Cet indicateur a montré qu'avec une protection à base de cuivre, chaque jour sans protection fait augmenter l'intensité d'attaque du mildiou. Pour remédier au manque d'informations sur les produits de biocontrôle et les interactions complexes influençant leur efficacité, il est crucial d'étudier les nombreux facteurs d'efficacité. En l'absence de ces données, les essais sur le terrain aboutissent souvent à des résultats décevants et limités, freinant ainsi la diffusion de ces solutions.

Mots clés : Biocontrôle, Mildiou, Substances naturelles, Facteurs d'efficacité, Réseau expérimental, Alternatives naturelles, Maladies cryptogamiques, Viticulture

ABSTRACT

Downy mildew is one of the primary pathogenic threats to vineyards, and the effectiveness of fungicide treatments is increasingly compromised due to the rising resistance of pathogens and the withdrawal of certain active substances. This situation encourages the adoption of more sustainable solutions, such as biocontrol products, although their efficiency is often limited and variable. The results from the BIOVIMED experimental network show significant variability in the effectiveness of these products against downy mildew, largely due to the specific characteristics of each plot and each year. To optimize their use, it is crucial to understand the specificities and usage guidelines of each product. Creating a general database is necessary to collect and disseminate this information more easily. Based on the data collected, spray quality, treatment positioning, and washing off emerge as the factors most influencing the effectiveness of the tested products. Washing off, renewal frequency, and treatment positioning can be integrated into an indicator specific to each test and product combination. This indicator showed that with copper-based protection, each day without protection increases the severity of downy mildew attacks. To address the lack of information on biocontrol products and the complex interactions influencing their efficiency, it is essential to study the many factors of effectiveness. In the absence of this data, field trials often result in disappointing and limited outcomes, slowing down the adoption of these solutions.

Key-words : Biocontrol - Downy Mildew - Natural Substances - Efficiency Factors - Experimental Network - Natural Alternatives- Cryptogamic Diseases - Viticulture

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

GLOSSAIRE

INTRODUCTION..... 3

PREMIERE PARTIE : CONTEXTE ET ETAT DE L'ART 4

I.	LE MILDIOU : UNE MALADIE CRYPTOGAMIQUE REPANDUE	4
	<i>I.1. Biologie du champignon</i>	<i>4</i>
	<i>I.2 La lutte contre Plasmopara viticola.....</i>	<i>5</i>
II.	LES PRODUITS DE BIOCONTROLE CONTRE LES MALADIES CRYPTOGAMIQUES DE LA VIGNE	8
	<i>II.1 La définition du biocontrôle</i>	<i>8</i>
	<i>II.2 La diversité des modes d'action des produits de biocontrôle.....</i>	<i>8</i>
III.	LES FACTEURS INFLUENÇANT L'EFFICACITE DES PRODUITS DE BIOCONTROLE	9
	<i>III.1 La qualité de pulvérisation : un facteur commun à tous les types de produit</i>	<i>10</i>
	<i>III.2 L'influence des conditions météorologiques et pédoclimatiques</i>	<i>11</i>
	<i>III.3 L'influence des différents cépages sur l'efficacité des SDP.....</i>	<i>12</i>
	<i>III.4 L'impact du mode de conduite et de la vigueur végétative de la vigne.....</i>	<i>13</i>
	<i>III.5 L'association d'agents de biocontrôle avec d'autres produits</i>	<i>13</i>
	<i>III.6 Vision globale des facteurs.....</i>	<i>14</i>
IV.	PROBLEMATIQUE DU STAGE	14

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODE 14

I.	LES ESSAIS MILDIOU DANS LE CADRE DU PROJET BIOVIMED	14
	<i>I.1 Les produits de biocontrôle testés contre le mildiou dans le cadre du projet BIOVIMED</i>	<i>15</i>
	<i>I.2 Localisation et caractéristiques des essais.....</i>	<i>15</i>
	<i>I.3 Présentation du dispositif expérimental.....</i>	<i>16</i>
	<i>I.4 Acquisition des données.....</i>	<i>17</i>
II.	REALISATION D'ENTRETIENS AVEC LES FIRMES QUI PRODUISENT ET COMMERCIALISENT LES PRODUITS TESTES DANS LE PROJET BIOVIMED	17
	<i>II.1 Construction du guide d'entretien</i>	<i>18</i>
	<i>II.2 Analyses des informations collectées</i>	<i>18</i>
III.	ANALYSES DES DONNEES OBTENUES LORS DES ESSAIS	19
	<i>III.1 Analyse statistique de l'efficacité des produits testés pour chaque essai</i>	<i>19</i>
	<i>III.2 Choix des notations pour les analyses entre les essais.....</i>	<i>20</i>
	<i>III.3 La variabilité d'efficacité d'un même produit selon les essais</i>	<i>21</i>
	<i>III.4 Mise en évidence de facteurs d'efficacité sur les résultats des essais étudiés.....</i>	<i>21</i>

TROISIEME PARTIE : RESULTATS 26

I.	LES PRINCIPAUX FACTEURS D'EFFICACITE POUR LES FIRMES PRODUISANT ET COMMERCIALISANT LES PRODUITS TESTES : ANALYSE DES ENTRETIENS	26
	<i>I.1 Cas des Stimulateurs de défenses des Plantes (SDP).....</i>	<i>26</i>
	<i>I.2 Cas du Limocide – produit de biocontrôle éradiquant –</i>	<i>28</i>
	<i>I.3 Lien entre les facteurs d'efficacité des produits et les essais BIOVIMED</i>	<i>29</i>
II.	MISE EN EVIDENCE DE L'EFFICACITE DES PRODUITS ET DE LA VARIABILITE DE CETTE EFFICACITE	30
	<i>II.1 L'efficacité de chaque modalité par comparaison avec le témoin de vraisemblance</i>	<i>30</i>

II.2 Visualisation graphique globale des données et de la variabilité d'efficacité des produits testés	31
III. ÉTUDE DES FACTEURS D'EFFICACITE AVEC LES RESULTATS DES ESSAIS BIOVIMED.....	31
III.1 Étude de l'effet des millésimes, des parcelles et des différentes modalités	32
III.2 Étude de l'impact des facteurs « année » et « parcelle » pour chaque modalité	34
III.3 L'effet du facteur « nombre de jours sans protection »	35
QUATRIEME PARTIE : DISCUSSION.....	36
I. MISE EN PERSPECTIVE DES RESULTATS OBTENUS POUR LES PRODUITS TESTES	36
II. ÉLÉMENTS RETENUS POUR AMELIORER L'EXPERIMENTATION DES PRODUITS DE BIOCONTROLE.....	37
II.1 Facteurs à prendre en compte lors de la réalisation d'essais avec des produits de biocontrôle	37
II.2 Formalisation d'une base de données avec les caractéristiques de chaque produit	39
III. ÉTUDE DES FACTEURS D'EFFICACITE DES PRODUITS DE BIOCONTROLE SUR UN RESEAU EXPERIMENTAL ADAPTE OU PLUS LARGE	40
III.1 Création d'un dispositif expérimental adapté	40
III.2 La mise en réseau de résultats d'essais.....	41
CONCLUSION	42
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	43
TABLE DES ANNEXES	
ANNEXES	

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Table des figures

Figure 1 : Cycle biologique du Mildiou (Source : BASF, 2024b)

Figure 2 : Photographies des symptômes du mildiou sur feuille et sur grappe.

Figure 3 : La pyramide de la protection intégrée dans le cadre de la lutte contre le mildiou

Figure 4 : Les produits de biocontrôle et les substances de base utilisées contre le mildiou

Figure 5 : Schéma des différents modes d'action simplifiés des produits de biocontrôle.

Figure 6 : Carte mentale des facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle

Figure 7 : Facteurs d'efficacité étudiés dans la bibliographie, pour des produits à base de substances d'origine naturelle

Figure 8 : Démarche méthodologique générale

Figure 9 : Plan de l'essai IFV_tes 2023

Figure 10 : Échelles d'évaluation des pourcentages d'attaque du mildiou lors des notations sur grappes ou sur feuilles

Figure 11 : Carte mentale des différentes analyses statistiques

Figure 12 : Visualisation graphique de la pression pour l'intensité d'attaque dans les témoins en fonction des essais et des stades BBCH des notations

Figure 13 : Graphique des conditions météorologiques et du positionnement des traitements lors de l'essai sur la parcelle IFV_tes en 2023

Figure 14 : Représentation graphique de la fréquence d'attaque ou de l'efficacité sur la fréquence d'attaque en fonction des produits et des essais

Figure 15 : Représentation graphique de l'efficacité d'Abbott sur la fréquence d'attaque en fonction des produits et des essais

Figure 16 : Représentation graphique de l'intensité d'attaque en fonction des produits et des essais

Figure 17 : Représentation graphique de l'efficacité d'Abbott sur l'intensité d'attaque en fonction des produits et des essais

Figure 18 : Comparaison entre le modèle mixte et le modèle fixe

Figure 19 : Les variances des effets aléatoires

Figure 20 : Visualisation des effets fixes et aléatoires

Figure 21 : Représentation graphique de l'intensité d'attaque en fonction du nombre de jours sans protection et des modalités

Figure 22 : Représentation graphique de l'intensité d'attaque en fonction du nombre de jours sans protection pour le cuivre

Figure 23 : Carte mentale des résultats des analyses statistiques effectuées

Figure 24 : Liste des éléments à relever lors d'un essai avec un produit de biocontrôle

Figure 25 : Schéma bilan des principaux facteurs d'efficacité repérés dans cette étude

Table des tableaux

Tableau 1 : Temps d'incubation (temps entre la contamination et l'apparition de fructifications) en fonction de la température (Syngenta 2019)

Tableau 2 : Récapitulatif des produits testés contre le mildiou dans le cadre du projet BIOVIMED

Tableau 3 : Essais exploitables

Tableau 4 : Les caractéristiques des sites d'essai susceptibles d'exercer une influence sur l'efficacité

Tableau 5 : Calendrier de traitement prévisionnel des modalités BIOVIMED 2024

Tableau 6 : Récapitulatif et comparaison des principaux facteurs d'efficacité des deux produits SDP étudiés

Tableau 7 : Résumé des données climatiques cumulées ou moyennées sur la période du 01/04 au 30/06

Tableau 8 : Nombre de jours sans protection pour chaque combinaison de produit-essai

Tableau 9 : Bilan des ANOVA réalisées pour chaque essai

Tableau 10 : Résumé de modèle

Tableau 11 : Analyse des moyennes ajustées

Tableau 12 : Comparaisons avec le témoin de vraisemblance

Tableau 13 : Tailles et valeurs des effets aléatoires du modèle linéaire mixte réalisé pour chaque modalité

Tableau 14 : Régressions linéaires pour le Limocide et le cuivre

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Les abréviations utilisées dans le texte sont répertoriées dans cette liste.

ABA PIC : Accélération du Biocontrôle et des Agroéquipements pour la Protection Intégrée des Cultures

AlteRCuivre : Accompagnement pour Réduire le Cuivre en viticulture : de la prophylaxie aux alternatives

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

BIOVIMED : BIOcontrôle en VInoble MEDiterranéen

BSV : Bulletins de Santé du Végétal

CA84 : Chambre d'Agriculture du Vaucluse

CEB : Commission des Essais Biologiques

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

IFT : Indice de Fréquence de Traitements phytosanitaires

IFV : Institut Français de la vigne et du Vin

GRAB : Groupe de Recherche en Agriculture Biologique

PARSADA : Plan d'action stratégique pour l'anticipation du potentiel retrait européen des substances actives et le développement de techniques alternatives pour la protection des cultures

OAD : Outil d'Aide à la Décision

OEPP : Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la Protection des Plantes

SDP : Stimulateurs des Défenses des Plantes

TNT : Témoin Non Traité

GLOSSAIRE

Les définitions des mots suivis d'un astérisque () dans le texte sont répertoriés dans cette liste. L'ensemble des définitions de ce glossaire sont issues de l'« Index ACTA Biocontrôle 2023, 7^{ème} édition ACTA ».*

Antibiose : interaction biologique entre deux ou plusieurs organismes qui porte préjudice à au moins l'un d'entre eux ou bien une association antagoniste entre un organisme et les substances métaboliques produites par un autre.

Biostimulant : substance ou micro-organisme dont la fonction, lorsqu'appliqué aux plantes ou à la rhizosphère, est la stimulation des processus naturels qui favorisent/améliorent l'absorption ou l'utilisation des nutriments, la tolérance aux stress abiotiques, la qualité ou le rendement de la culture.

Bouillie (phytopharmaceutique) : dilution, généralement dans l'eau, d'une préparation phytopharmaceutique destinée à être appliquée par pulvérisation, arrosage ou trempage. Une bouillie peut contenir plusieurs préparations et des adjuvants.

Brumisation : pulvérisation dans l'air de fines particules liquides permettant la formation d'un brouillard, par exemple de très fines gouttelettes d'eau afin de permettre l'humectation d'organes végétaux sans ruissellement.

Compétition : interaction qui s'établit entre deux ou plusieurs organismes pour l'utilisation d'une même ressource (lumière, eau, éléments nutritifs) lorsque la demande dépasse les disponibilités.

Curatif : en phytopathologie, qualifie une substance ou une préparation capable d'arrêter une infection dont la phase parasitaire a été amorcée.

Dose (d'emploi) : quantité de préparation appliquée par unité de matériel traité. Cette unité est généralement une surface (hectare ou mètre carré), mais peut être aussi un volume (litre, mètre cube, ...), une masse (kilogramme, tonne) ou une longueur (mètre linéaire).

Efficacité : niveau de réduction des organismes nuisibles ciblés ou des dégâts occasionnés par ceux-ci sur le végétal, après application d'un traitement, par rapport à un témoin non-traité. Correspond au niveau de contrôle de la maladie par un traitement/produit.

Efficacité d'Abbott : efficacité calculée par la formule d'Abbott pour une modalité testée.

Éradiquant : qualifie une substance ou une préparation qui supprime l'infection en éliminant le parasite après l'apparition des symptômes.

Mode d'action : mécanisme qui permet d'expliquer l'effet d'un produit phytopharmaceutique ou d'un biocide.

Mode de transfert : mécanisme physique ou biologique qui explique l'absorption, le déplacement, la distribution ou l'accumulation d'un produit phytopharmaceutique ou biocide dans organisme vivant, un milieu ou l'un des compartiments de l'environnement (sol, air, eau).

Préventif : Qualifie une substance ou une préparation capable d'agir en empêchant l'installation d'un agent pathogène dans les tissus de l'hôte.

Prophylaxie : ensemble des mesures pouvant être mises en œuvre afin de prévenir ou limiter l'installation et le développement d'un organisme nuisible sur un territoire déterminé.

Protection intégrée : application rationnelle d'une combinaison de mesures biologiques, chimiques, physiques, culturales ou mettant en œuvre l'amélioration des végétaux.

Stimulateur de défense des plantes (SDP) / Éliciteur : molécule spécifique, appartenant à des familles chimiques variées, produite par un micro-organisme phytopathogène ou une plante parasite et déclenchant des réactions de défense de la part des cellules de la plante attaquée.

Substance de base : substance active qui n'est pas préoccupante et dont la destination principale n'est pas d'être utilisée à des fins phytosanitaires, mais qui est néanmoins utile dans la protection sanitaire.

Systemique : qualifie d'une substance capable, après pénétration dans la plante, de migrer à l'intérieur de celle-ci.

Translaminaire / Pénétrant : qualifie une substance capable de pénétrer dans la plante et de diffuser à travers plusieurs couches de cellules d'un même organe.

Introduction

Divers pathogènes menacent la santé et la productivité des vignes (*Vitis Vinifera*). En viticulture les méthodes « traditionnelles » de lutte reposent sur l'utilisation de produits phytopharmaceutiques, qui suscite des préoccupations sur la pollution environnementale et sur la santé. Les maladies cryptogamiques ou fongiques sont les principales menaces pathogènes qui pèsent chaque année sur les récoltes dans les vignobles. Par conséquent, ces maladies, causées par un champignon ou un organisme filamenteux de la classe des oomycètes (Dubos 2002), sont également les principales causes d'utilisation de produits phytosanitaires sur la vigne. En effet, la majorité des traitements phytosanitaires sur vigne sont contre le *Plasmopara viticola* (agent causal du mildiou), l'*Erysiphe necator* (agent causal de l'oïdium) et le *Botrytis cinerea* (agent causal de la pourriture grise) (Pertot et al. 2017).

Entre 2010 et 2016, l'emploi des fongicides en viticulture en France a augmenté (+ 18% en moyenne) principalement à cause de pressions parasitaires plus fortes. Cependant cela est très variable selon les bassins viticoles qui sont plus ou moins touchés par les maladies fongiques (Simonovici 2021).

L'efficacité* des traitements phytosanitaires contre les maladies cryptogamiques est compromise par l'augmentation de la résistance des pathogènes aux fongicides mais également par les potentiels retraits de substances actives. En agriculture conventionnelle, la stratégie actuelle repose sur l'association de molécules de contact et de produits « unisites ». Les produits phytosanitaires peuvent en effet avoir une ou plusieurs cibles, d'où les termes « unisites » ou « multisites » (BASF 2024a). Cependant, des experts alertent sur le retrait des substances actives de contact multisites, combinée à une réduction du nombre d'unisites disponibles, qui pourrait entraîner une augmentation des résistances (Stef 2024). Il est essentiel de prendre en compte ces paramètres dans la lutte contre l'apparition de résistances aux produits phytosanitaires. En agriculture biologique, la lutte contre le mildiou dépend du cuivre, qui figure sur la liste européenne des substances candidates à substitution. Cela exige l'émergence de solutions novatrices (IFV et al. 2024). Par conséquent, il est nécessaire d'adopter des approches plus durables et respectueuses de l'environnement.

L'objectif de diminution des intrants phytosanitaires s'inscrit dans le cadre du plan Ecophyto. Des méthodes alternatives, telles que les produits de biocontrôle, commencent à émerger. Ils permettent de lutter contre les maladies de la vigne en exploitant des ressources naturelles tout en minimisant les impacts écologiques. Les politiques environnementales encouragent l'utilisation de ces produits. Afin de promouvoir leur développement, les produits de biocontrôle bénéficient de procédures accélérées pour l'évaluation et l'instruction des demandes d'Autorisations de Mise sur le Marché (AMM), ainsi que des réductions de taxes associées à ces procédures. « La priorité 3 du plan d'actions sur les produits phytopharmaceutiques et une agriculture moins dépendante aux pesticides prévoit un soutien renforcé à l'innovation et au développement du secteur du biocontrôle. » (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire 2024b).

Cependant, les phases d'expérimentation de ces nouvelles techniques économes en produits phytopharmaceutiques sont encore en cours. Elles sont également prévues à l'avenir avec, par exemple, des projets en cours de constitution dans le cadre du PARSADA (Plan d'action stratégique pour l'anticipation du potentiel retrait européen des substances actives et le développement de techniques alternatives pour la protection des cultures) (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire 2024a).

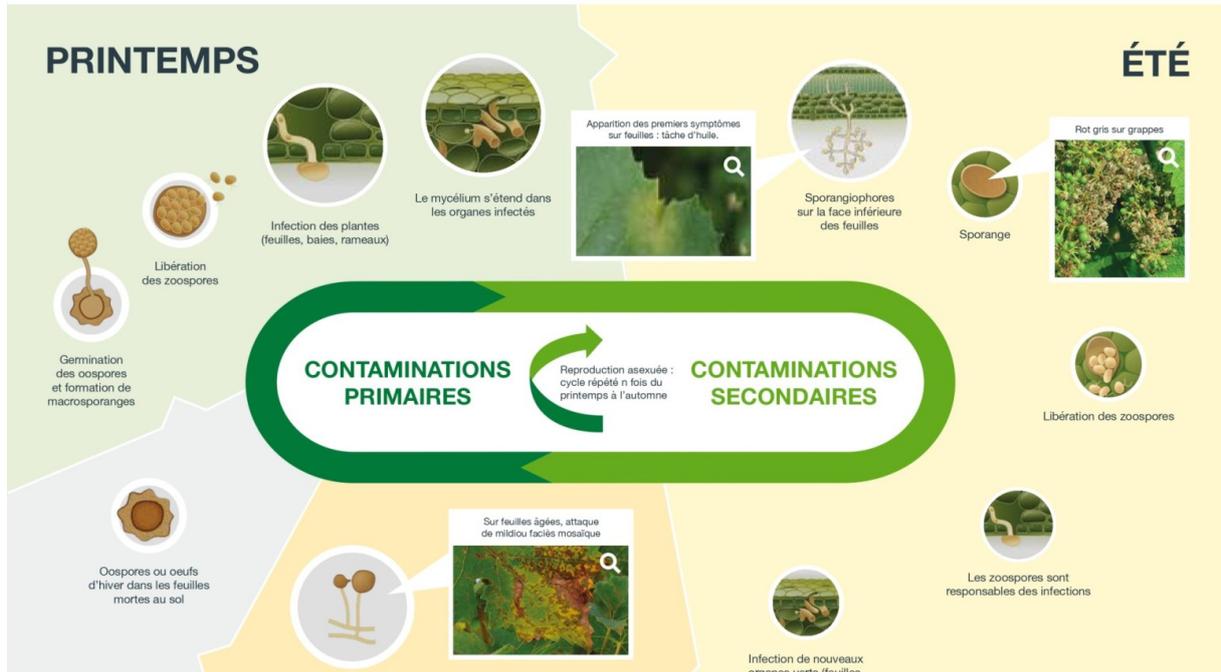


Figure 1 : Cycle biologique du Mildiou (Source : BASF, 2024b)

La recherche de solutions face à ces problématiques constitue l'un des principaux objectifs des travaux de l'Institut Français de la Vigne (IFV). Le projet BIOVIMED (BIOcontrôle en VIGNoble MEDiterranéen), porté par l'IFV, s'inscrit dans ces objectifs de développement de méthodes alternatives à l'utilisation de produits de synthèse et du cuivre qui peut présenter diverses toxicités pour l'environnement (EFSA et al. 2018). Dans les vignobles méditerranéen, le débourrement de la vigne est de plus en plus précoce ces dernières années, il est donc nécessaire de commencer la protection phytosanitaire plus tôt dans la campagne. Ainsi l'étude de l'utilisation de ces produits sur mildiou en début de campagne en contexte méditerranéen est intéressante pour limiter l'utilisation du cuivre. Les essais mis en place dans le projet BIOVIMED contre le mildiou reposent donc sur une utilisation de produits de biocontrôle en début de campagne pour repousser au maximum le premier traitement à base de cuivre.

Première Partie : Contexte et état de l'art

I. Le mildiou : une maladie cryptogamique répandue

Le mildiou (*Plasmopara viticola*) est une maladie fongique observable sur feuilles, grappes et sarments. Ce pathogène est apparu pour la première fois en Gironde en 1879 avant de se propager à travers l'Europe et le monde entier. Cette maladie, découverte en Amérique du Nord en 1834, impacte chaque année la culture de la vigne en affectant son rendement et sa qualité (ADAMA 2023). Actuellement, on le trouve dans presque toutes les régions viticoles, à l'exception de celles où l'absence de pluie au printemps et en été limite son développement, ou des vignobles septentrionaux dont le printemps est trop froid (Dubos 2002). Bien que cette maladie soit connue et a été fortement étudiée, des projets de recherche sur ce pathogène sont encore en cours et prévu à l'avenir notamment avec des projets qui auront lieu lors du PARSADA avec le plan d'actions « filière vigne mildiou et black rot » (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire 2024).

I.1. Biologie du champignon

Le *Plasmopara viticola* appartient au règne des Chromistes et à la famille des Péronosporacées. Ce pathogène réalise un cycle sexué (Figure 1)(BASF 2024b) qui assure sa conservation durant l'hiver et qui est responsable des foyers primaires au printemps. Il se conserve sous la forme d'oospores (œufs d'hiver) dans les feuilles tombées au sol à l'automne. Ces œufs sont très résistants au froid et se conservent bien dans les sols humides.

Au printemps la phase asexuée débute. Elle est à l'origine de la contamination des organes herbacés de la vigne et du développement épidémique de la maladie. Cette phase est caractérisée par la germination des oospores qui forment un ou deux filaments mycéliens de 2 à 3 μm de diamètre qui se terminent par une macroconidie piriforme. Cela est possible après maturation des œufs et si les conditions sont favorables, c'est-à-dire avec une température d'au minimum 11°C et de la présence d'eau libre sur le sol. La macroconidie donne naissance à des zoospores au nombre de 32 à 64. Les pluies printanières générant des éclaboussures peuvent disperser les zoospores sur les organes aériens de la vigne. Ces zoospores sont munies de deux flagelles qui permettent leurs déplacements dans l'eau libre. Pour pénétrer dans la plante par les stomates, les zoospores perdent leurs flagelles et émettent un filament mycélien qui génère

Température en ° C	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Nombre de jours	14	10	8	6	5	4	4	4	6

Tableau 1 : Temps d'incubation (temps entre la contamination et l'apparition de fructifications) en fonction de la température (Source : Syngenta 2019)

un suçoir dans les cellules des tissus plus internes de l'organe végétal contaminé. (Dubos 2002) Ce processus peut durer entre deux jours et plus d'une semaine en fonction des températures, avec un développement optimal autour de 25°C. Les contaminations peuvent apparaître dès les premières feuilles si le climat est propice. Après les contaminations primaires, des contaminations secondaires découlant de la dissémination des conidies avec les pluies et le vent se réalisent. Les nouvelles oospores qui étaient contenues dans les conidies pénètrent à leur tour à l'intérieur de la feuille par les stomates. Ces contaminations secondaires peuvent se produire plusieurs fois au cours de la saison. Les contaminations peuvent se réaliser aussi sur les rameaux, les rafles et les inflorescences ainsi que les grappes tant que la véraison n'a pas eu lieu. (Dubos 2002)

Les conditions optimales pour le développement du champignon sont réunies lorsque le climat est humide et que les températures sont douces (Caubel et al. 2012). Plus précisément, les facteurs favorables pour la maladie sont un temps pluvieux (> 5 mm) avec une atmosphère humide (hygrométrie > 90%) et des températures moyennes douces à chaudes (>11°C).

Les premiers symptômes apparaissent environ dix jours après l'infection (période d'incubation). Une fois les ressources nutritives épuisées, les premières taches d'huile se forment sur les feuilles, ce sont les contaminations primaires isolées. Bien que ces taches ne soient pas graves, l'observation de ces symptômes permet de prévoir les contaminations futures et d'adapter les traitements en conséquence (Blancard 2021). Par la suite, le mildiou fructifie sous la forme d'un duvet blanc sous les feuilles, composé de conidiophores contenant des conidies (spores). La durée entre la contamination et l'apparition de cette fructification varie en fonction de la température. (Tableau 1)(Syngenta 2019).

À partir de ces fructifications, le vent et la pluie peuvent détacher des spores et contaminer d'autres organes, ce sont les contaminations secondaires, appelées repiquages. La sécheresse influe sur les spores qui ont une durée de vie limitée de 4 à 5 jours dans ces conditions. (Dubos 2002)

Le niveau de développement de la maladie est observé par les différents symptômes observables sur feuilles et sur grappes. Sur les feuilles, ils sont visibles sous forme de taches d'huile en face supérieure (Figure 2) et de duvet blanc (constitué de nombreuses fructifications) en face inférieure (Figure 2) et plus tardivement sous forme de tâches d'extension limitée par les nervures appelées « mildiou mosaïque » (Figure 2). Sur les grappes, les symptômes sont sous forme de rot gris (avec fructifications) du stade de bouton floral à jeune baie (Figure 2) puis de la nouaison à la fermeture de la grappe ils sont sous forme de rot brun (Figure 2). (Blancard 2018)

1.2 La lutte contre *Plasmopara viticola*

La lutte contre le *Plasmopara viticola* intègre la logique de la protection intégrée* en mobilisant de nombreux leviers. La protection intégrée peut être représentée sous forme d'une pyramide avec à la base les solutions à mettre en place dans un premier temps jusqu'au sommet avec les solutions les plus radicales (Figure 3) (OFAG 2022, Salaun 2021, BARBIER et al. 2011). Cette partie sera organisée en suivant la logique de la figure 3.

La protection intégrée peut être définie comme un « Système de lutte contre les organismes nuisibles qui utilise un ensemble de méthodes satisfaisant les exigences à la fois économiques, écologiques et toxicologiques, en réservant la priorité à la mise en œuvre



Taches d'huile sur face supérieure



Fructifications sur face inférieure



Mildiou mosaïque sur face supérieure



Rot gris sur grappe



Rot brun sur grappe

*Figure 2 : Photographies des symptômes du mildiou sur feuille et sur grappe.
(Source : Personnelle)*

délibérée des éléments naturels de limitations et en respectant les seuils de tolérance » d'après BARBIER et al. (2011).

Les mesures préventives

La prophylaxie* est essentielle pour combattre le mildiou afin de réduire la durée d'humectation des feuilles et des grappes. Pour cela il est primordial de maximiser la circulation de l'air. La gestion de la vigueur de la vigne et du rognage doit donc être pensée en intégrant cela. Par ailleurs, l'épamprage (détruire les pampres), le palissage (structurer les organes végétatifs de la vigne) et la gestion de la hauteur d'herbe sont des mesures essentielles pour éviter les contaminations provenant du sol. (Salaun 2021)

Un autre moyen de lutte contre le mildiou est la création de variétés résistantes. Les nouvelles variétés sont créées à partir d'espèces sauvages de *Vitis* d'origine américaine ou asiatique, qui possèdent des résistances naturelles à ce pathogène, afin d'intégrer ces caractères de résistance dans le patrimoine génétique des vignes européennes. Cela est réalisé par des croisements successifs et une sélection rigoureuse des descendants. Certaines de ces variétés ont été ajoutées au Catalogue national. Cette solution a cependant des limites, notamment liées aux risques de contournement de résistance qui sont à surveiller, à la vitesse de renouvellement du vignoble qui est lente (environ 2% de la surface renouvelée par an) et à l'intégration de ces variétés dans les cahiers des charges des appellations qui reste limitée. (Olivier Yobregat 2024)

L'aide à la décision

Dans les systèmes prédictifs et les outils d'aide à la décision pour la gestion du mildiou l'utilisation de prévisions météorologiques est un aspect primordial pour établir des prédictions et des conseils précis (Pressecq et al. 2024).

En viticulture conventionnelle ou biologique, tout au long de la croissance de la vigne, divers traitements doivent être appliqués en fonction de la vitesse de croissance des rameaux et des feuilles, de la fréquence des pluies, de la température et de la pression parasitaire. La stratégie de lutte peut être optimisée grâce au suivi de la maturation des œufs d'hiver, à la consultation des Bulletins de Santé du Végétal (BSV) et à l'utilisation d'outils d'aide à la décision tels que les outils Optidose ou DeciTrait sur la plateforme EPIcure (EPIcure IFV 2024).

La lutte contre le mildiou doit être réfléchi de manière préventive. Pour anticiper les premières pluies contaminatrices, il est impératif d'appliquer un produit préventif avant les pluies. Les traitements doivent ensuite être renouvelés en fonction des conditions météorologiques, toujours dans une optique préventive. Tout au long de la campagne de protection, le choix d'une solution anti-mildiou devra être adapté à chaque situation. La floraison est une période sensible, la protection en encadrement de floraison est donc importante. (CAB Pays de la Loire 2016)

Lutte non-chimique

En viticulture biologique la stratégie de lutte contre le mildiou est basée sur l'utilisation du cuivre sous différentes formes : hydroxyde de cuivre, sulfate de cuivre, oxyde cuivreux ou cuivre tribasique. Le cuivre est une matière active dont l'utilisation est de plus en plus limitée en Europe. « De par sa persistance dans les sols et sa toxicité pour les organismes aquatiques

La lutte contre le mildiou

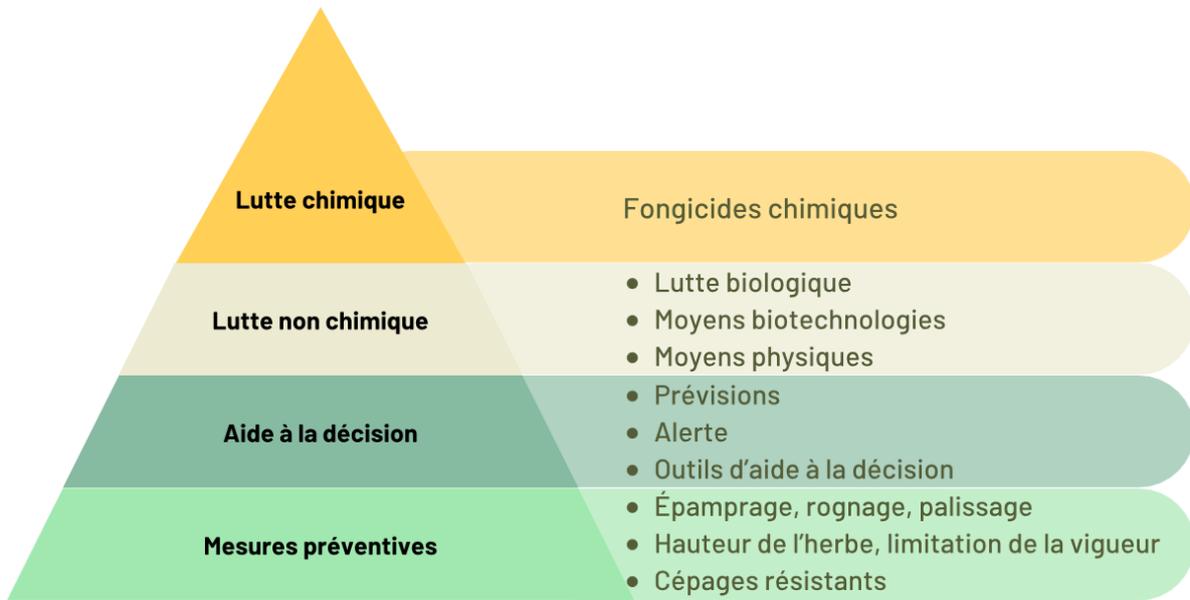


Figure 3 : La pyramide de la protection intégrée dans le cadre de la lutte contre le mildiou (Réalisation personnelle d'après Salaun (2021), OFAG (2022) et Barbier et al. (2011))

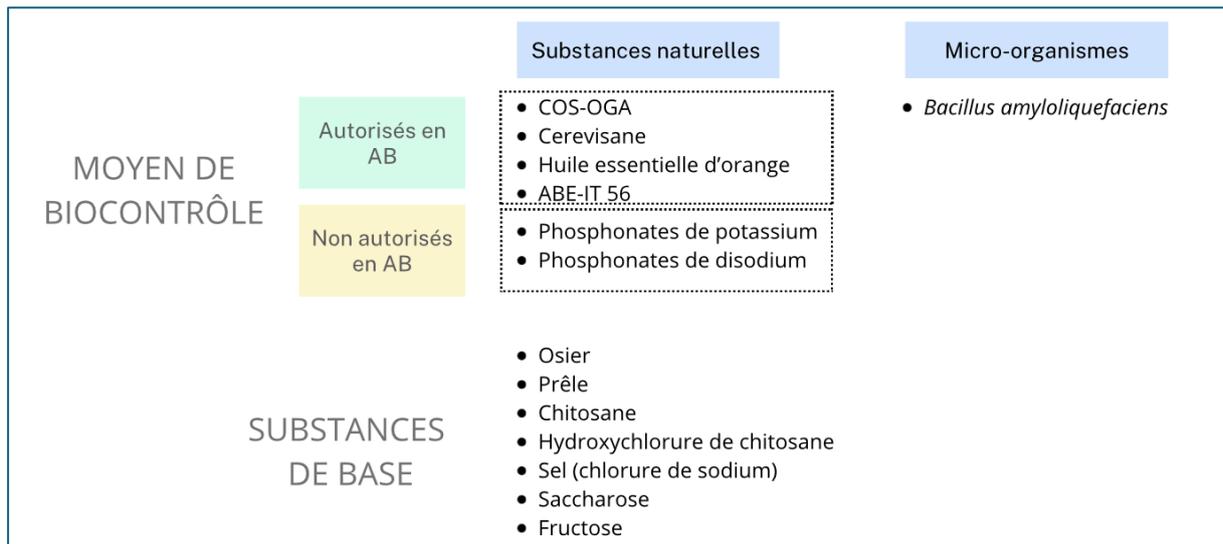


Figure 4 : Les produits de biocontrôle et les substances de base utilisées contre le mildiou (Sources : Vinopole 2023, 2024 a et b)

décrites dans le rapport de l'EFSA (EFSA et al. 2018), le cuivre a été approuvé pour uniquement 7 ans à compter du 1er janvier 2019, soit jusqu'au 31 décembre 2025 contre les 15 ans prévus pour les autres substances réapprouvées. Actuellement les nouvelles dispositions réglementaires européennes limitent l'emploi du cuivre à 28 kg par hectare sur toute sa période d'approbation, correspondant à une quantité moyenne de 4 kg de cuivre métal par hectare et par an, ce qui permet de « lisser » cette quantité de 28 kg sur 7 ans, en appliquant des quantités variables d'une année à l'autre. » (ECOPHYTO PIC 2019) Ce métal lourd pose problème sur les sols agricoles, notamment dans les vignobles, en raison de son accumulation élevée due à une utilisation répétée et à son incapacité à se dégrader dans le sol. De plus, cette substance active à sites multiples peut affecter la faune terrestre et contaminer le milieu aquatique. Pour la santé humaine, des expositions répétées et prolongées peuvent entraîner divers troubles métaboliques, comme des maux de tête ou des problèmes de reproduction (Angelova et al. 2011).

Afin de réduire la quantité de cuivre utilisée, il peut être utilisé en association avec des produits de biocontrôle ou des substances de base* (Figure 4). Dans le cadre de la lutte contre le mildiou, l'oïdium et la pourriture grise, les produits de biocontrôle sont soit à base de micro-organismes soit à base de substances naturelles (Vinopole 2024a; 2024b; 2023). Parmi ces produits deux catégories ressortent : les produits dits « historiques » et les produits émergents. Les produits « historiques » se démarquent par leur utilisation optimisée, leurs limites d'efficacité établies et leurs effets bien connus, comme le soufre contre l'oïdium ou les phosphites contre le mildiou (IFV et al. 2024). En revanche, les produits émergents ont souvent des modes d'action* plus complexes et indirects, comme c'est le cas pour les produits stimulateurs des défenses des plantes (SDP)* ou pour ceux à base de micro-organismes vivants. Leur application est donc plus difficile à gérer et intègre de nombreux facteurs de variabilité de l'efficacité. Les résultats d'essais peuvent être très variables d'une année sur l'autre en termes d'efficacité de protection. Il n'est pas possible de généraliser des conclusions pour l'ensemble des produits de biocontrôle (IFV et al. 2024; Pressecq 2023; Laurent 2020).

Par ailleurs, de nouvelles pratiques émergent pour lutter contre cette maladie. Par exemple, le Viti-tunnel permet de protéger les vignes des pluies pour éviter les contaminations (*Viti-Tunnel* 2024). L'utilisation des UV-C contre le mildiou est aussi en cours de développement et d'étude (Chambre d'agriculture de la Gironde, IFV 2021a).

Lutte chimique

En viticulture conventionnelle, en plus des produits à base de cuivre, de nombreux produits chimiques de synthèse existent pour lutter contre le mildiou. Ils possèdent différents modes d'action. Une lutte préventive*, curative* ou éradiquante* est possible avec ces produits. De plus, certains sont systémiques* ils sont donc moins sensibles aux conditions météorologiques à la suite de leur application, ils permettent donc une lutte plus longue contre le mildiou après leur application.

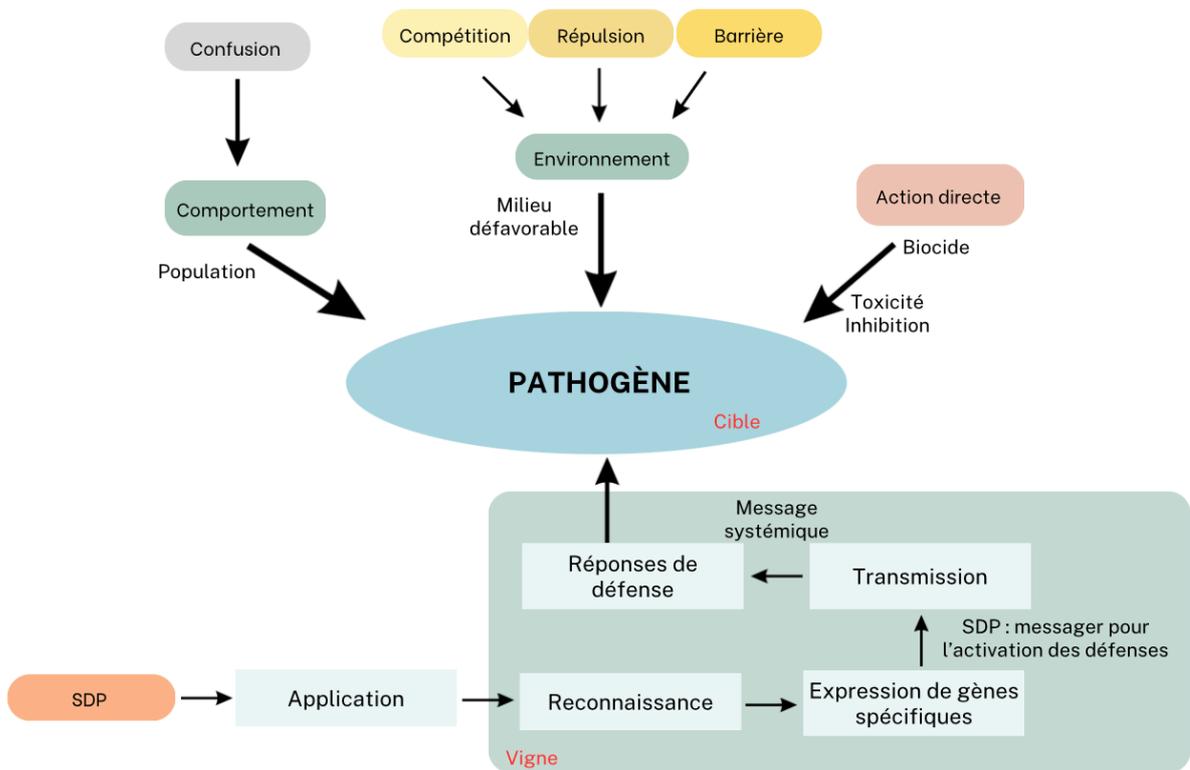


Figure 5 : Schéma des différents modes d'action simplifiés des produits de biocontrôle (Réalisation personnelle d'après Aveline et al. (2022) et Trouvelot et al. (2021))

II. Les produits de biocontrôle contre les maladies cryptogamiques de la vigne

La bioprotection est un terme générique qui peut être définie comme la protection fournie soit par des agents vivants, soit par des substances non vivantes d'origine biologique sous la forme de produits de biocontrôle (Stenberg 2021).

II.1 La définition du biocontrôle

La définition et le terme « biocontrôle » ainsi que le statut des produits de biocontrôle sont spécifiquement français. Ils sont proches de définitions internationales telles que biofongicides, produits « low risk » ou lutte biologique. Les produits de biocontrôle sont définis dans la loi d'Avenir Agricole (2014) dans l'article L253-6 du code rural (Legifrance 2021) comme « des agents et produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Ils comprennent en particulier :

- Macro-organismes : cela englobe les organismes considérés de grande taille tels que les nématodes, les insectes, les invertébrés et les vertébrés.
- Micro-organismes : cela concerne les organismes vivants microscopiques tels que les bactéries, les levures, les champignons et les virus.
- Médiateurs chimiques : cette catégorie regroupe les molécules de communication ainsi que les phéromones, qui influencent le comportement sexuel des organismes.
- Substances d'origine naturelle (végétale, animale, minérale) : cette catégorie vaste englobe diverses origines et mécanismes d'action. » (Legifrance 2021)

Les produits de biocontrôle sont des produits phytopharmaceutiques, soumis à Autorisation de Mise sur le Marché (AMM), sauf pour ceux de la catégorie Macro-organismes. L'IFV publie régulièrement la liste des produits de biocontrôle homologués en viticulture (IFV 2023).

II.2 La diversité des modes d'action des produits de biocontrôle

Les produits de biocontrôle ont des modes d'action variés et parfois très différents de ceux des produits phytopharmaceutiques traditionnels, généralement biocides. Les produits de biocontrôle actuellement homologués pour les maladies cryptogamiques de la vigne présentent une diversité de mode d'action vis à vis de la cible (Figure 5) : fongicide, stimulateur des défenses (SDP), antibiose*, choc osmotique et variation de pH, compétition* spatiale et nutritive, élongation et aération des grappes (IFV 2023).

Néanmoins, il existe une confusion autour de la définition du terme « mode d'action » pour les solutions de biocontrôle (Pasquier et Perriot 2024). Pour certains le mode d'action est lié à l'application ou dépend de la cible, pour d'autres les modes d'action sont reliés au positionnement du produit (préventif ou curatif) ou à l'effet biologique que la substance entraîne (destruction des cellules, arrêt du cycle de respiration, ...). Une harmonisation de la



Figure 6 : Carte mentale des facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle (Sources : l'ensemble des références bibliographiques du tableau de l'annexe 1)

définition du « mode d'action » serait nécessaire pour que les conseils liés à l'utilisation des produits de biocontrôle soient plus clairs (Pasquier, Perriot 2024). Tant que cela n'est pas établi, les modes d'actions des produits peuvent être définis par :

- Leur « mode de transfert » * : contact (action à la surface de la plante), racinaire (action dans la rhizosphère), translaminaire* et systémique* (action par pénétration et par déplacement dans la plante).
- Leur comportement par rapport à la cible :
 - Par action directe ils peuvent agir par parasitisme, antibiose ou effet asséchant par exemple.
 - Par action indirecte, dans le cas des produits stimulateurs de défenses des plantes (SDP) ou des produits modifiant l'environnement ou le comportement des pathogènes (barrières physiques, confusion sexuelle, compétition).

Les effets des produits ayant une action indirecte sont plus difficilement caractérisables. Par exemple, les SDP agissent par activation/élicitation des défenses du végétal qui induit la résistance de la plante hôte (Trouvelot et al. 2021). Cette résistance peut être soit structurale (renforcement des parois végétales) soit biochimique (production de métabolites secondaires aux propriétés antioxydantes ou anti microbiennes ou production de protéines de défenses (PR protéines). Dans le cadre du projet ABA PIC (Accélération du Biocontrôle et des Agroéquipements pour la Protection Intégrée des Cultures), Klervi Crenn et al. (2024) ont précisé que les SDP ont souvent de bons résultats en conditions contrôlées (en laboratoire) mais des efficacités aléatoires lors d'une utilisation au champ. De plus, les SDP ont deux effets : soit effet direct (activation de la défense sans la présence du bioagresseur), soit potentialisateur (pas de réaction de défense de la part de la plante en l'absence de bioagresseur). Leurs effets, difficiles à caractériser, compliquent l'intégration de ces produits dans une stratégie de protection.

III. Les facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle

De nombreux paramètres peuvent influencer l'efficacité des produits de biocontrôle. Une synthèse des facteurs sous la forme d'un tableau (Annexe 1) reprend la description et l'effet de tous les facteurs identifiés comme influençant l'efficacité des produits de biocontrôle, en associant chaque facteur à une ou plusieurs références bibliographiques. Chaque référence évoquée dans ce tableau est décrite succinctement en annexe 2. En se basant sur les références bibliographiques du tableau de l'annexe 1, nous pouvons avoir une vision globale des facteurs avec la carte mentale de la figure 6. Cette représentation permet de mettre en avant la quantité de paramètres qui peuvent être source de variabilité sur l'efficacité des produits. Néanmoins comme le souligne Pressecq (2023) dans sa thèse, les facteurs ne sont pas bien caractérisés, il existe peu de références bibliographiques et d'études caractérisant les effets de ces paramètres. Les études sont partielles et lacunaires par rapport à la quantité de facteurs d'efficacité qui existent, surtout si on considère la variabilité liée à ces facteurs avec chaque culture et chaque produit.

Compte tenu de la diversité des produits de biocontrôle, par leur nature (substance naturelle, micro-organisme...), leur mode d'action vis à vis de la cible (action directe, SDP...), il n'est pas possible de généraliser les conclusions obtenues à propos des facteurs d'efficacité

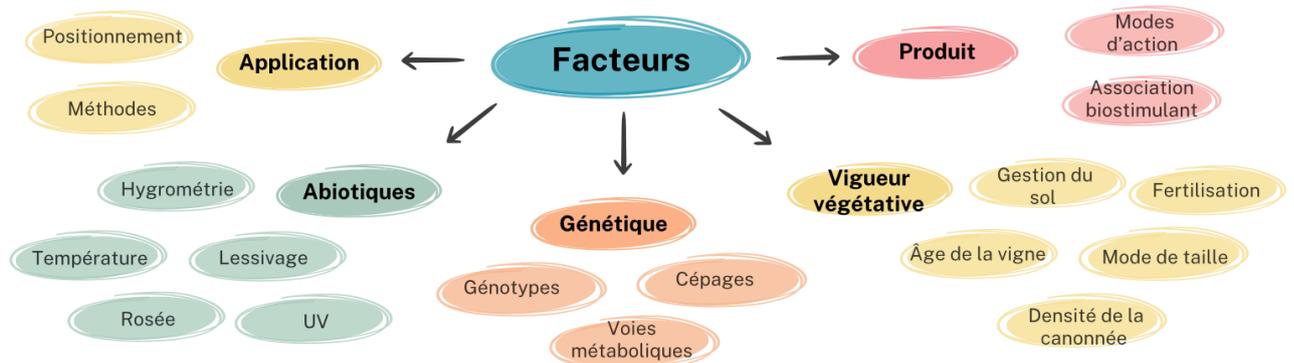


Figure 7 : Facteurs d'efficacité étudiés dans la bibliographie, pour des produits à base de substances d'origine naturelle

pour une famille de produit à une autre famille. Les produits de biocontrôle testés dans le cadre du projet BIOVIMED sont à base de substances d'origine naturelle. Le résumé bibliographique, qui suit, se base donc sur les facteurs d'efficacité qui ont été étudiés sur des produits de biocontrôle à base de substances d'origine naturelle. Ces facteurs sont résumés dans la figure 7.

III.1 La qualité de pulvérisation : un facteur commun à tous les types de produit

L'importance du moment d'application

Dans le cadre du projet ABA-PIC coordonné par l'Acta dans le cadre du Plan de Relance et achevé fin 2022, une étude sur le développement de méthodologies pour l'application des traitements de biocontrôle a montré que le bon timing d'application doit se baser sur l'association bioagresseur / plante (phénologie, âge, santé, réceptivité) / produit. Cela veut dire que le choix du positionnement d'un traitement phytosanitaire doit prendre en compte le risque de contamination par le bioagresseur, les caractéristiques de la vigne et son développement mais également les caractéristiques propres au produit utilisé. Pour l'instant le conseil pour la pulvérisation des produits de biocontrôle est basé uniquement sur des conseils généraux, l'idéal serait d'aboutir à des conseils spécifiques pour chaque produit (Pasquier, Perriot 2024). Les méthodes d'application doivent être pensées et optimisées en fonction de chaque produit, en prenant principalement en compte la fréquence des applications et les différentes techniques d'application. La fréquence doit être telle que spécifiée pour l'utilisation prévue. Par exemple pour les produits SDP, il est recommandé de tenir compte du retard possible de la réponse de la plante, de l'état physiologique de la culture et de la persistance de l'action du produit et de son effet cumulatif potentiel (Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la Protection des Plantes 2020).

L'importance du choix du moment d'application a également été montré dans une étude de Piermann et al. (2023) sur la culture de *Bégonia elatior*. Son étude a évalué les effets du carbonate de potassium et de sodium, du bicarbonate de potassium et de sodium, de *Bacillus subtilis*, de *Bacillus pumilus*, et d'huiles de café brute et torréfiée sur l'inhibition de la croissance mycéliale et de la germination de *Botrytis cinerea*. Les effets des produits testés ont également été regardés sur la colonisation des feuilles de *Bégonia elatior* par *B. cinerea* inoculé avant, simultanément et après traitement avec les produits de biocontrôle. Les résultats ont indiqué que les produits de biocontrôle testés dans cette étude peuvent induire une résistance chez l'hôte et ils doivent être utilisés de manière préventive pour être efficaces. Le positionnement des traitements avec ces produits est donc primordial pour assurer l'efficacité.

L'influence de la dose* utilisée

Dans l'étude précédente, l'inhibition de la croissance mycélienne de *B. cinerea* et de la germination des conidies était proportionnelle à l'augmentation de la concentration de la bouillie pour tous les produits. La dose utilisée a donc également une importance dans l'efficacité de ces produits alternatifs.

En effet, les doses sont testées et déterminées lors d'essais pour l'évaluation de l'efficacité du produit afin de maximiser l'efficacité des produits en prenant en compte les

risques de phytotoxicité (Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la Protection des Plantes 2020).

L'impact des différentes méthodes d'application

En ce qui concerne les méthodes d'application des produits de biocontrôle, peu d'expérimentations ont été effectuées (Pasquier, Perriot 2024). Les choix d'application liés à ces paramètres pourraient exercer une influence sur l'efficacité car les produits de biocontrôle sont des produits de contact possédant une efficacité qui dépend de la localisation du dépôt du produit sur la plante (Pasquier, Perriot 2024).

Il est également indiqué qu'il y a des optimisations à trouver entre le type de buses utilisé, le volume et la pression de pulvérisation (Pasquier, Perriot 2024). En effet, pour Pasquier et Perriot (2024), de nombreux facteurs entrent en jeu dans l'efficacité des produits de biocontrôle lors de l'application. Tout d'abord, il y a la formulation du produit et la bouillie* (volume, qualité de l'eau, température, compatibilité des produits et leur ordre d'incorporation). Ces éléments correspondent à la capacité à épandre le produit c'est-à-dire à l'étalement et la pénétration du produit qui sont à la base d'une bonne qualité de pulvérisation. Il en ressort qu'il est nécessaire d'établir un lien entre la qualité de l'eau et l'efficacité des produits, de définir la température de bouillie adaptée en fonction des produits (difficile à mettre en œuvre) et de définir des critères de compatibilité des produits.

Il y a peu d'information sur les recommandations d'application. Il manque des expérimentations au niveau de l'application des produits et des essais spécifiques selon le mode d'action et le pathogène cible.

III.2 L'influence des conditions météorologiques et pédoclimatiques

Comme le soulignent Fedele, Brischetto et Rossi (2020) peu d'études fournissent des informations sur les effets de la température et l'hygrométrie sur l'efficacité des produits de biocontrôle.

Sur vigne, le projet ABA PIC, s'est intéressé à l'étude de l'influence de l'hygrométrie et d'un lessivage modéré (10 mm) sur l'efficacité et la rémanence d'un SDP. Pour cela l'induction de sept gènes de défenses a été observée. Des produits de différents types ont été testés, un SDP à base de COS-OGA (chitosan et pectine) et un produit avec trois modes d'action qui agit par compétition, par action directe (biocide) et par stimulation des défenses des plantes (Syngenta 2023) à base de *Bacillus amyloliquefasciens* (micro-organismes vivants). Lors et à la suite de l'application de ces produits, soit différentes hygrométries ont été mises en place soit un lessivage de 10mm a été effectué. Il en ressort qu'une forte hygrométrie diminue la réceptivité des cépages aux SDP et que le lessivage a annulé l'effet des SDP. L'impact des facteurs abiotiques, liés aux conditions du milieu d'application, est donc important dans la réussite des SDP.

Afin de mieux étudier les effets des produits inducteurs de défense des végétaux, l'Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la Protection des Plantes (OEPP) a établi des principes généraux pour l'évaluation de l'efficacité des produits phytopharmaceutiques avec un mode d'action SDP ont été établis. Un de ces principes concerne les facteurs environnementaux et agronomiques : « Les conditions environnementales et agronomiques peuvent influencer la performance des produits à faible risque, et leur effet doit être évalué pour déterminer les conditions optimales d'utilisation. » (Organisation Européenne et

Méditerranéenne pour la Protection des Plantes 2020). Dans ces principes généraux, plusieurs points importants sont mis en avant pour les facteurs influençant les produits phytosanitaires dont les « données météorologiques : Les données météorologiques avant et après l'application doivent être enregistrées, y compris la précipitation, la température, la vitesse et la direction du vent, etc. Les données édaphiques : Certaines caractéristiques du sol doivent être enregistrées, telles que le pH, la teneur en matière organique, et le régime d'engrais. » (Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la Protection des Plantes 2020).

Plus largement, l'efficacité des produits de biocontrôle peut être impactée si la virulence du pathogène ou si les voies de défense des plantes hôtes sont affectées négativement ou positivement. Dans une synthèse des études sur l'effet de la température sur les interactions plante-pathogène, Desaint et al. (2021) montrent que la température peut affecter négativement ou positivement la multiplication des agents pathogènes. De plus, la thermosensibilité de l'immunité végétale a été étudiée chez *Arabidopsis thaliana*. Il a été montré que certaines voies de réponses immunitaires peuvent être plus ou moins impactées par l'élévation de la température. Les produits de biocontrôle peuvent donc avoir une efficacité variable face à cette variabilité d'immunité végétale (dans le cas des SDP) et de virulence des pathogènes.

Par ailleurs, le pH du sol influencerait également l'efficacité des produits de biocontrôle d'après Pressecq (2023) et l'Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la Protection des Plantes (2020). Cependant aucune publication étudie l'influence de ce paramètre sur l'utilisation des produits de biocontrôle.

Ainsi certains facteurs abiotiques ont un impact sur l'efficacité des produits de biocontrôle. La prise en compte de l'influence de ces facteurs sur chaque produit permettrait d'établir de meilleurs conseils techniques spécifiques à chaque produit.

III.3 L'influence des différents cépages sur l'efficacité des SDP

Au sein du projet ABA PIC sur vigne, une partie se concentre sur l'étude des différences d'induction des gènes de défenses des plantes face à une maladie en réaction à l'application d'un Stimulateur de Défenses des Plantes (SDP). L'étude menée en conditions contrôlées avait pour but de voir quelles différences d'induction existaient selon les cépages et les SDP utilisés. Les résultats montrent que les réactions étaient différentes selon les cépages. Lors des tests avec deux produits, la Laminarine et le COS-OGA, des réactions différentes ont été observées selon les cépages étudiés. Pour le Sauvignon, l'induction défensive était faible après deux applications pour les deux produits, mais devient plus visible et notable après trois applications. En revanche, pour le Floréal, aucune induction défensive n'a été constatée après deux applications. Certains gènes étaient même réprimés. Cependant, après trois applications, une induction est observée, bien que restant faible comparée au Sauvignon. Pour la Syrah, deux applications n'ont montré aucun effet, tandis que trois applications ont fortement induit tous les gènes défensifs, avec une induction plus marquée avec la Laminarine qu'avec le COS-OGA, contrairement au Sauvignon. Quant au Grenache, dès la deuxième application, une importante induction (notamment avec le COS-OGA) a été constatée, mais à la troisième, aucun effet cumulatif n'a été observé. En réponse à l'application des produits de biocontrôle, les voies de défense sont donc activées différemment selon les génotypes. (Coen 2023) Ces tests fournissent également des informations sur le mode d'action des produits, bien qu'un lien reste à explorer entre l'induction des défenses par un SDP et son efficacité biologique.

III.4 L'impact du mode de conduite et de la vigueur végétative de la vigne

La notion de vigueur végétative peut être définie comme la croissance et le développement de la canopée. Les indicateurs pouvant la décrire sont l'évaluation du taux d'apparence des feuilles et de l'augmentation de la biomasse qui représente la croissance des pousses Valdés-Gómez et al. (2008). Le mode de conduite peut faire varier la vigueur, donc influencer la sensibilité de la culture vis à vis des maladies cryptogamiques, qui elle-même modifie le niveau d'efficacité des produits de biocontrôle.

Fernandes de Oliveira et al. (2021) ont mené une étude avec pour objectif l'évaluation des effets de différentes stratégies de gestion des sols sur le développement de deux maladies, l'oïdium et le mildiou, sur trois saisons. Ils se sont concentrés sur les comparaisons des effets d'un travail du sol conventionnel, d'un couvert d'herbe et d'un couvert de légumineuses. Les pourcentages d'infection plus élevés sont observés dans les parcelles soumises au travail du sol par rapport à ceux des parcelles avec les deux couverts. Les couverts végétaux contribuent à obtenir un meilleur équilibre de croissance de la surface foliaire et un microclimat moins favorable aux maladies fongiques. La lumière de la canopée et l'hygrométrie sont les facteurs influençant le plus la maladie quand il y a des couverts végétaux. Le constat général qui ressort est que toutes les pratiques agronomiques qui influencent la croissance végétative de la vigne affectent la progression épidémique. Cela est donc à mettre en lien avec une possible variation de l'efficacité des produits de biocontrôle selon différentes gestions du sol.

III.5 L'association d'agents de biocontrôle avec d'autres produits

Des projets de recherche émergent pour trouver des associations de produits qui mèneraient à l'amélioration de l'efficacité des produits de biocontrôle. À l'IFV le projet MISTIC a pour objectif d'étudier la relation entre l'emploi de biostimulants* et des biocontrôles pour obtenir une meilleure protection de la vigne. Dans le but d'améliorer l'état nutritionnel de la vigne et de renforcer leur capacité à faire face aux bioagresseurs, ainsi qu'à stimuler leurs défenses par l'application de SDP. Les essais en cours pourraient permettre d'établir des combinaisons entre des agents de biocontrôle et des biostimulants qui améliore la protection de la vigne (Aveline, Dupin, et al. 2022). Une étude de Jacquens et al. (2022) avait pour objectif de déterminer si un biostimulant peut augmenter l'effet d'un SDP sur le mildiou via des effets sur la physiologie de la vigne. Dans le cadre de cette étude une nouvelle méthode a été développée pour étudier l'efficacité des biostimulants dans des conditions contrôlées en utilisant des plantes in vitro. Des extraits de plantes ont été utilisés comme biostimulant et SDP. L'ajout du biostimulant au milieu de culture a accéléré la croissance des plantes et influencé le développement des pousses et des racines, tout en modifiant les métabolites et les phytohormones dans les feuilles, les tiges et les racines. L'application du SDP sur les feuilles a également modifié les métabolites et les phytohormones, mais les effets ont varié en fonction de l'association avec le biostimulant ou sans association. Seules les plantes préalablement traitées avec le biostimulant ont montré des réponses de défense et une protection contre le *Plasmopara viticola*. Ainsi, le biostimulant semble amorcer l'action du SDP. Ces résultats suggèrent que l'utilisation de biostimulants pourrait renforcer l'action des SDP, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour des études futures dans des conditions plus complexes. (Jacquens et al. 2022)

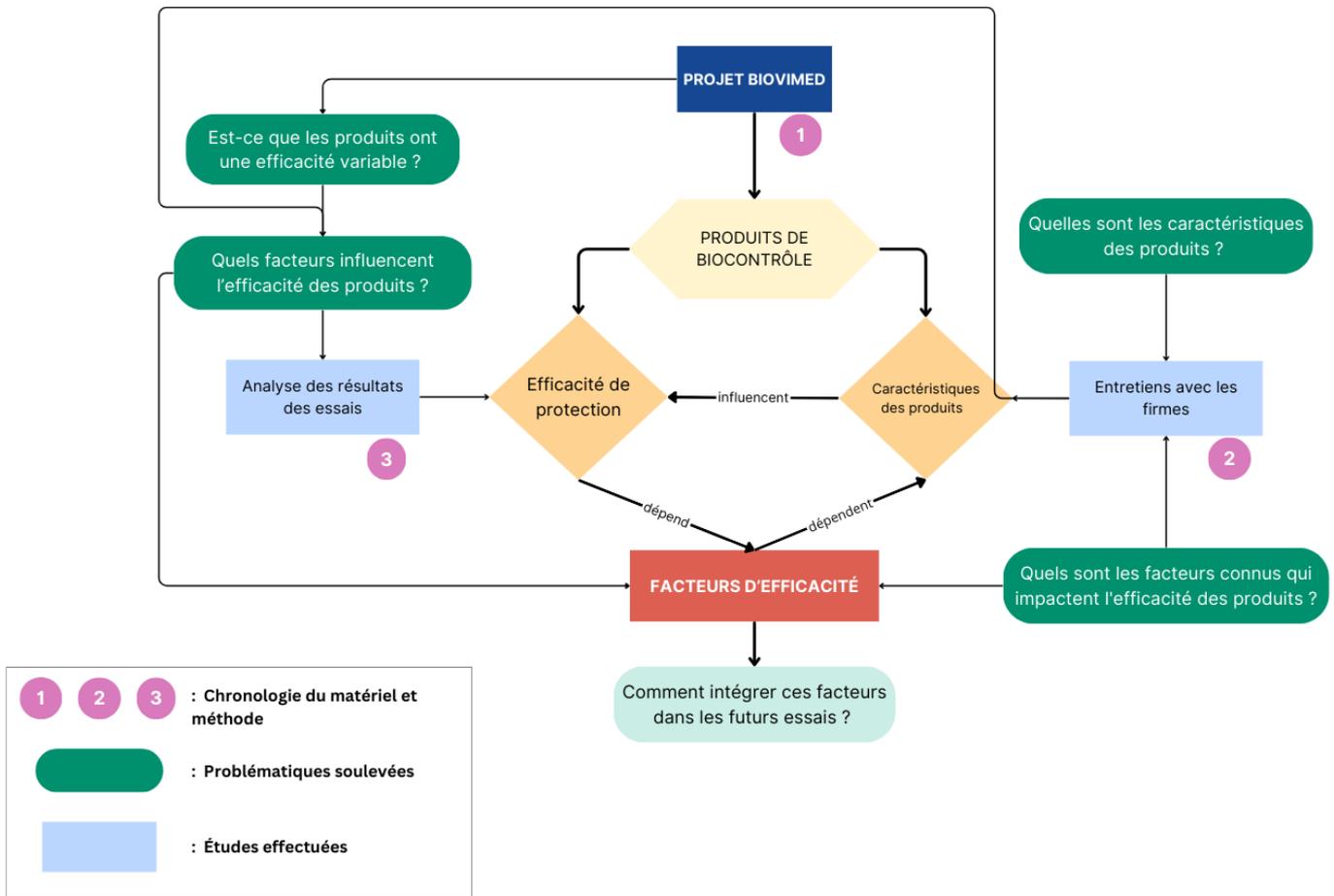


Figure 8 : Démarche méthodologique générale

Nom commercial	Substance(s) active(s)	Société	Années testées
Limocide	Huile essentielle d'orange douce	Vivagro	2022-2023-2024
Roméo	Cerevisiane	BASF	2022-2023-2024
Belvine	ABE-IT 56 (lysate de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	Cérence	2024
Limocide + Roméo	Huile essentielle d'orange douce + Cerevisiane	Vivagro + BASF	2022-2023
Equisetum/Salix en alternance	Extrait de Prêle ou Saule	BIOVITIS	2022-2023-2024

Tableau 2 : Récapitulatif des produits testés contre le mildiou dans le cadre du projet **BIOVIMED**

III.6 Vision globale des facteurs

La caractérisation des ces facteurs et de leur impact sur l'efficacité des produits permettrait une optimisation de l'utilisation et de l'efficacité des produits. En effet, les produits pourraient avoir une meilleure description et caractérisation de leurs effets, cela permettrait aux viticulteurs de choisir plus simplement et plus efficacement un produit lors d'un besoin. Néanmoins, une étude détaillée de chaque produit en lien avec les facteurs d'efficacité serait difficile à envisager lors des essais des produits. L'idéal serait que les firmes produisant et commercialisant les produits réussissent à fournir un mode d'emploi précis des conditions d'utilisation des produits. Pour arriver à cela, il serait intéressant de définir une liste minimale d'indicateurs à relever lors des essais des produits, dans le but de pouvoir mutualiser les résultats de différents essais et d'en interpréter les résultats. Une méthodologie plus complète avec des bases de données communes et plus détaillées pour les résultats les essais des produits pourrait améliorer la description de chaque produit dans diverses situations d'usage.

IV. Problématique du stage

Quels facteurs influencent la variabilité de l'efficacité des produits de biocontrôle testés contre le mildiou de la vigne dans le cadre du projet BIOVIMED ? Comment intégrer ces facteurs lors des expérimentations pour une utilisation optimale des produits ?

Deuxième partie : Matériel et méthode

La démarche méthodologique globale est illustrée dans la figure 8. La démarche est structurée en plusieurs étapes afin d'étudier les facteurs d'efficacité et de répondre aux questions soulevées par cette étude. Premièrement, une présentation des produits testés et du contexte de leur évaluation est réalisée par la présentation des essais menés sur le mildiou dans le cadre du projet BIOVIMED. Ensuite, les caractéristiques et les facteurs d'efficacité connus pour chaque produit ont été recueillies par le biais d'entretiens avec les entreprises commercialisant ces produits. À l'issue de l'analyse de ces entretiens, les facteurs d'efficacité principaux pourront être ciblés afin d'être étudiés dans l'analyse des essais, dans le cas où cela est possible. Pour finir, les résultats obtenus à partir du réseau de parcelles BIOVIMED ont été analysés afin de mettre en évidence la variabilité de l'efficacité des produits ainsi que les facteurs influençant cette efficacité lorsque cela est possible.

I. Les essais mildiou dans le cadre du projet BIOVIMED

L'objectif du projet BIOVIMED pour la lutte contre le mildiou est de limiter les risques de contamination précoce, tout en repoussant la date de la première utilisation du cuivre, en utilisant des produits de biocontrôle (Tableau 2), dans le but de limiter la quantité annuelle de cuivre apportée. Ces essais n'ont pas été mis en place dans le but d'étudier les facteurs qui impacteraient l'efficacité des produits de biocontrôle. Cependant les résultats obtenus peuvent

Site	Année
IFV_lycee	2022
IFV_lycee	2023
IFV_lycee	2024
IFV_tes	2023
IFV_tes	2024
ctifl	2023
ctifl	2024
grab	2023
grab	2024
ca84	2022
ca84b	2024

Tableau 3 : Essais exploitables

Organisme	Nom de parcelle	Cépage	Brumisation	Année plantation	Volume bouillie L/ha	Mode de taille	Commune
IFV	IFV_lycee	Cabernet sauvignon	Oui	2005	100	Cordon bilatéral	Rodilhan
IFV	IFV_tes	Grenache blanc	Non	2015	100	Cordon bilatéral	Bellegarde
GRAB	grab	Muscat petit grain	Non	2002	150	Cordon bilatéral	Espenel
CTIFL	ctifl	Muscat de Hambourg	Non	2004	200	Lyre	Carpentras
CA 84	CA84b	Grenache noir	Non	2021	200	Cordon de Royat	Piolenc
CA 84	CA84	Grenache noir	Non	1997	200	Cordon de Royat	Piolenc

Tableau 4 : Les caractéristiques des sites d'essai susceptibles d'exercer une influence sur l'efficacité

être utilisés pour obtenir des éléments sur la variabilité de l'efficacité de ces produits. Ces essais suivent les méthodes de la Commission des Essais Biologiques (CEB).

I.1 Les produits de biocontrôle testés contre le mildiou dans le cadre du projet BIOVIMED

Les produits de biocontrôle testés dans le cadre du projet BIOVIMED (Tableau 2) sont autorisés en viticulture biologique et sont tous des substances d'origine naturelle. Dans le cadre de la lutte contre le mildiou leur utilisation n'est pas recommandée seule mais en association avec des doses réduites de cuivre.

Le Limocide est un produit de contact à base d'huile essentielle d'orange douce. Son utilisation n'est pas recommandée seul mais en association avec des doses réduites de cuivre. (Chambre d'agriculture de la Gironde, IFV 2021b)

Le Roméo est un Stimulateur des Défenses des plantes (SDP) à base de Cerevisane c'est-à-dire de parois cellulaires de levure *Saccharomyces cerevisiae*. (Chambre d'agriculture de la Gironde, IFV 2022)

Le Belvine est un Stimulateur des Défenses des plantes (SDP) à base de ABE-IT 56 qui est composé de lysate de *Saccharomyces cerevisiae*. (Arena et al. 2018)

L'alternance de l'extrait de saule « Salix » et de prêle « Equisetum » a également été testé. Ces produits ne sont pas considérés comme des produits de biocontrôle, ce sont des substances de base. Ces produits seront peu abordés dans cette étude.

I.2 Localisation et caractéristiques des essais

Plusieurs partenaires ont réalisé les essais mildiou de ce projet sur les campagnes 2022, 2023, 2024 :

- L'IFV avec deux sites d'essai : deux parcelles appelées « IFV_lycee » et « IFV_tes » à Rodilhan et à Bellegarde dans le Gard.
- La Chambre d'agriculture du Vaucluse (CA84) avec un site d'essai à Piolenc sur la même parcelle « CA84 » en 2022 et 2023 et sur une autre en 2024 « CA84b ».
- Le GRAB avec un site à Espenel dans la Drôme, parcelle appelée « grab ».
- Le CTIFL à l'unité de LA TAPY avec un site d'essai à Carpentras dans le Vaucluse, parcelle appelée « ctifl ».

Cependant, les essais n'ont pas toujours été concluants, la pression maladie naturelle du mildiou n'étant pas assez présente à chaque essai, il n'y a que deux essais qui ont pu être évalués en 2022, quatre en 2023 et quatre en 2024 (Tableau 3).

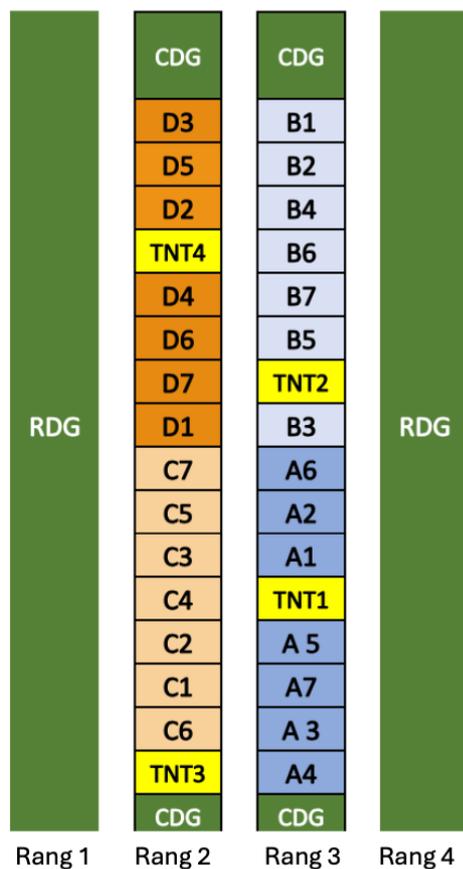
L'essai sur la parcelle « IFV_lycee » a été réalisé avec une brumisation* pour augmenter la pression du mildiou qui peut être naturellement très faible selon les conditions météorologiques des millésimes.

Ces différents sites d'essais possèdent des caractéristiques spécifiques qui pourraient exercer une influence sur l'efficacité des produits de biocontrôle qui sont testés (Tableau 4).

Ces informations ont été collectées auprès des partenaires du projet afin de voir leur influence sur l'efficacité des produits. En effet, les caractéristiques/spécificités des différents sites sont des paramètres repérés comme étant potentiellement des facteurs d'efficacité dans les

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
TNT									
Cuivre tardif						BB RSR Disperss dose modulée			
Cuivre foyer I				BB RSR Disperss dose modulée					
Cuivre précoce	BB RSR Disperss dose modulée								
Roméo	Romeo 250g/ha	BB RSR Disperss dose modulée							
Limocide	Limocide 0,8%	BB RSR Disperss dose modulée							
Belvine	Belvine 3L/ha	BB RSR Disperss dose modulée							
Equisetum/Salix	Equisetum 5L/ha	Salix 5L/ha	Equisetum 5L/ha	Salix 5L/ha	Equisetum 5L/ha	BB RSR Disperss dose modulée			

Tableau 5 : Calendrier de traitement prévisionnel des modalités BIOVIMED 2024



Modalités :

1	Cuivre tardif
2	Cuivre foyers I
3	Cuivre précoce
4	Roméo
5	Limocide
6	Roméo + Limocide
7	Equisetum / salix

A,B,C,D = 4 blocs = 4 répétitions

RDG = Rang de garde

CDG = Ceps de garde

Figure 9 : Plan de l'essai IFV_tes 2023

recherches bibliographiques. L'étude des résultats obtenus avec le dispositif expérimental qui suit sur ces différents sites permettrait donc de voir s'il y a une influence de ces caractéristiques sur l'efficacité.

I.3 Présentation du dispositif expérimental

Dans le cadre du projet BIOVIMED, les stratégies d'application des biocontrôles ne tiennent pas compte des conseils de déclenchement de la protection qui sont disponibles par exemple dans les bulletins des Chambres d'Agriculture. Les premiers traitements sont réalisés avec les produits de biocontrôle très précocement sur le stade végétatif de 2-3 feuilles étalées (stade BBCH 12-13). La protection au cuivre est généralisée deux semaines après l'apparition des premiers symptômes sur la parcelle (Tableau 5).

Ces essais ont donc pour objectif de valider l'intérêt des produits de biocontrôle en début de saison, avant l'apparition des contaminations primaires. Les traitements sont renouvelés avec une cadence de 10 jours, cette cadence peut être resserrée si un lessivage a lieu après un traitement. Un lessivage est caractérisé par un cumul de pluie supérieur à 20mm, ce qui correspond aux règles de décision pour les renouvellements des traitements avec du cuivre (Aveline, Becquet, et al. 2022).

Au total, le dispositif possède huit modalités. Quatre modalités avec des produits de biocontrôle sont testés : Roméo, Limocide, Equisetum en alternance avec Salix et Belvine en 2024 ou Limocide en association avec Roméo en 2022 et 2023. Le témoin non traité (TNT) permet de montrer le niveau la pression de la maladie pour chaque essai. La modalité « cuivre tardif » est déclenchée deux semaines après l'apparition des premiers foyers. C'est « le témoin de vraisemblance » pour l'efficacité des produits de biocontrôle, c'est au moment du premier traitement de cette modalité que le cuivre est généralisé à toutes les modalités. À partir de ce traitement, les produits de biocontrôle sont remplacés par du cuivre. Cela veut dire que les produits de biocontrôle ont été utilisés jusqu'à ce que les traitements débutent sur la modalité « cuivre tardif ». La comparaison des différentes modalités au « cuivre tardif » permet d'évaluer l'intérêt des traitements précoces. Un témoin positif est également mis en place sous la modalité « cuivre précoce », pour laquelle les traitements sont tous à base de cuivre et débutent en même temps que les traitements des modalités à base de produit de biocontrôle. Ce témoin positif permet de mettre en évidence si les traitements avant le déclenchement de la modalité « cuivre tardif » ont un intérêt. Si dans un essai les modalités « cuivre tardif » et « cuivre précoce » ont des résultats équivalents, cela montre que les traitements précoces ont été inutiles, l'efficacité des produits de biocontrôle n'est pas analysable. De plus, une modalité « cuivre conseil » est déclenchée à partir des premiers risques de contamination, elle correspond à un calendrier de traitement qui pourrait être conseillé aux viticulteurs.

Pour chaque traitement à base de cuivre, la dose de cuivre utilisée est celle recommandée par l'OAD DeciTrait.

Chaque parcelle d'essai est divisée en plusieurs blocs (selon les sites 3, 4 ou 6 blocs) qui représentent les 3, 4 ou 6 répétitions de chacune des huit modalités. Ces blocs sont composés de parcelles élémentaires réparties selon la méthode des blocs de Fisher et constituées de 7 à 10 ceps selon les parcelles. Par exemple pour l'essai IFV_Tes 2023 (Figure 9), il y a quatre répétitions (A, B, C, D) pour les huit modalités, ici une répétition d'une modalité est constituée de sept ceps consécutifs. Ce dispositif en blocs, où les modalités sont randomisées, permet de neutraliser l'impact potentiel de l'hétérogénéité due au gradient de pression du mildiou sur la parcelle sur les résultats des différentes modalités.

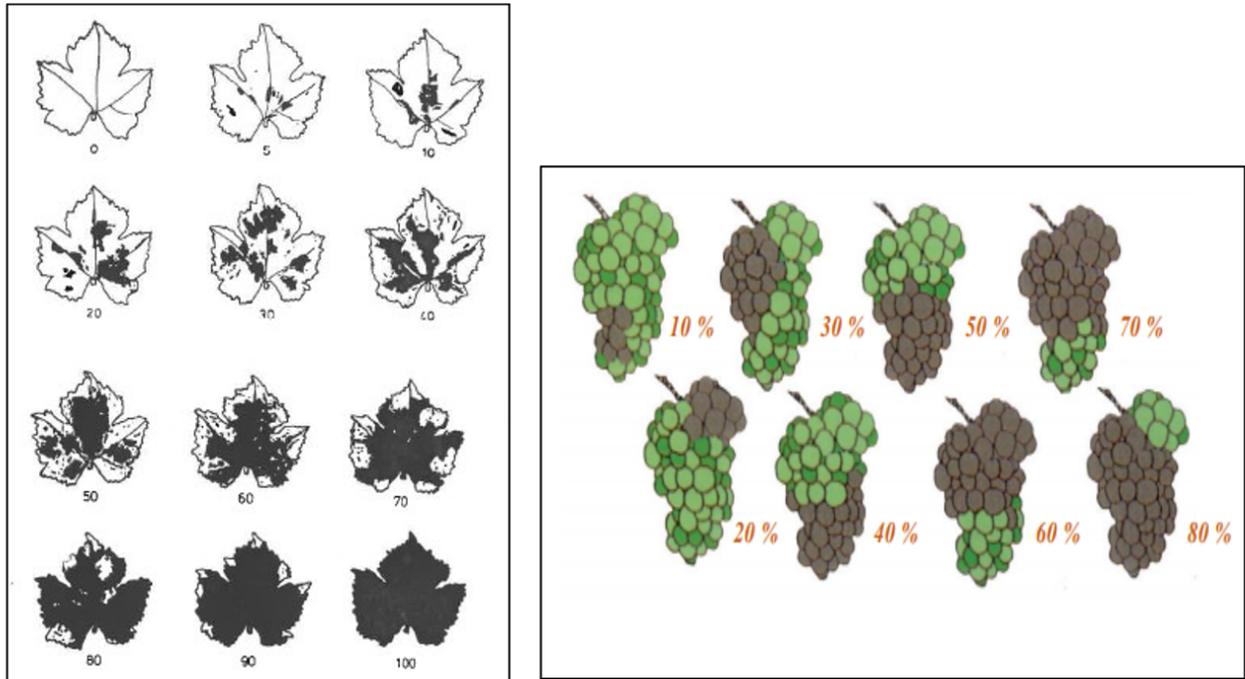


Figure 10 : Échelles d'évaluation des pourcentages d'attaque du mildiou lors des notations sur grappes ou sur feuilles

I.4 Acquisition des données

Pour chaque essai, des notations de la fréquence et de l'intensité d'attaque du mildiou sont réalisées sur feuilles et sur grappes. Pour chaque essai il y a une à trois notations chaque année à différents stades sur les deux organes. Ces notations suivent les recommandations des méthodes de la CEB pour les essais sur mildiou. La première notation d'un essai a lieu sur feuilles au moment où il y a des symptômes réguliers et facilement visibles sur feuilles dans la modalité TNT, de même pour la première notation grappe. Les notations suivantes sont réalisées à environ 15 jours d'intervalle pour suivre l'évolution de la maladie jusqu'à l'arrêt des traitements. Lors d'une notation sur feuilles, 100 feuilles sont choisies aléatoirement dans toutes les parties du feuillage des ceps qui composent une parcelle élémentaire (c'est-à-dire une répétition d'une modalité). Le pourcentage d'attaque (Figure 10) sur chaque feuille est notée en fonction de la surface de la feuille couverte par la maladie observée en prenant en compte le mildiou sous toutes ses formes (tache d'huile, rot gris, rot brun, mosaïque). Le premier et le dernier cep de la parcelle élémentaire ne sont jamais pris en compte, il est considéré que la proximité avec les modalités adjacentes peut fausser les évaluations. La même méthode est utilisée pour les notations sur grappe mais seulement 50 grappes sont notées en prenant en compte le pourcentage d'attaque (Figure 10) du mildiou sous toutes ses formes sur grappes (rot gris, rot brun).

Pour l'analyse des résultats en lien avec la climatologie des différents essais, les données climatiques ont été récupérées sur la plateforme en ligne EPICure (EPICure IFV 2024) avec les outils d'aide à la décision « POM » et « DeciTrait » qui regroupent de nombreux points d'observation météorologique dont ceux à proximité des sites d'essai. Pour chaque site les données climatiques collectées sont la température minimale, maximale et moyenne pour chaque jour, le cumul de précipitation journalier et le pourcentage d'hygrométrie moyen journalier.

Ces essais n'ont pas été conçus avec l'objectif d'étudier les facteurs pouvant influencer l'efficacité des produits. Cependant l'ensemble des données récoltées peut permettre une étude partielle des facteurs d'efficacité. Cette étude doit prendre en compte le maximum d'informations déjà disponible sur les produits testés pour ensuite pouvoir lier ces informations aux essais et aboutir à une étude pertinente.

II. Réalisation d'entretiens avec les firmes qui produisent et commercialisent les produits testés dans le projet BIOVIMED

Dans la bibliographie il existe peu de références et d'études montrant l'impact des facteurs pouvant affecter l'efficacité du Roméo, du Belvine et du Limocide. Les études sont partielles et lacunaires par rapport à la quantité de facteurs d'efficacité qui pourraient exercer une influence. Cependant, les firmes qui commercialisent ces produits ont réalisé des études et des essais d'efficacité et ont également de nombreux retours d'expérience des utilisateurs sur leurs produits. Ce sont donc ces acteurs qui ont potentiellement le plus d'informations sur leurs produits. Afin d'avoir le maximum de renseignements sur les facteurs d'efficacité de chaque produit, trois entretiens ont été menés. Chaque entretien a été réalisé en visioconférence avec

une personne du pôle de recherche et développement ou de marketing de l'entreprise fabriquant et commercialisant le Roméo (BASF), le Belvine (Cérieence) et le Limocide (Vivagro).

II.1 Construction du guide d'entretien

Un guide d'entretien semi-directif a été construit pour chaque entretien. Les trois guides étaient établis sur la même base mais ils étaient adaptés à chaque produit (Annexe 3). La base du guide d'entretien a été rédigée à partir de recherches bibliographiques effectuées au préalable sur les facteurs pouvant influencer l'efficacité des produits de biocontrôle à base de substances d'origine naturelle. En effet, chaque question de relance avait pour but de voir si un facteur d'efficacité, repéré dans la bibliographie, avait été étudié avec ce produit et quelle était son influence.

Les guides étaient séparés en deux parties (Annexe 3), tout d'abord une partie « Caractéristiques des produits » permettait d'aborder des questions sur le produit en lui-même si les réponses n'avaient pas été abordées avant. La deuxième partie « Les facteurs d'efficacité » était divisée en cinq temps pour aborder les facteurs présents avant, pendant et après l'application du produit et les facteurs biotiques et abiotiques. De même que pour la première partie, les questions de la deuxième partie étaient posées uniquement pour relancer si la réponse n'avait pas été abordée précédemment. La rédaction des questions et des relances donnait l'opportunité à chaque personne interviewée de s'exprimer de manière libre et objective.

Pour débiter, la première question posée sur les facteurs d'efficacité était ouverte pour obtenir une réponse spontanée et avoir une vision générale de la part de la personne interrogée : « Quels facteurs sont les plus importants à prendre en compte lors de l'utilisation du produit ou qui influencent le plus son efficacité ? ». Cette question permettait de voir quels étaient les principaux facteurs d'efficacité du produit pour la personne interrogée sans exercer une influence sur sa réponse. De plus, cette question permettait d'éliminer de nombreuses questions présentes dans la suite du questionnaire.

II.2 Analyses des informations collectées

À la suite de chaque entretien, les notes prises étaient remises en forme et un compte rendu était rédigé.

Pour synthétiser les informations recueillies, une grille d'analyse a été construite sous forme d'un tableau en reprenant chaque information voulue sur le produit (Annexe 4), ce qui correspondait à chacune des questions de relance dans le guide d'entretien. Après chaque entretien, le tableau était rempli avec les informations obtenues, ce qui permet de comparer plus facilement les produits entre eux par rapport à un même facteur. Cela permet également de retrouver les informations de chaque produit plus rapidement dans les grandes catégories : les caractéristiques générales du produit, les conditions d'usage réglementaires.

La carte mentale des facteurs pouvant influencer l'efficacité des produits de biocontrôle réalisée lors des recherches bibliographie sur les facteurs d'efficacité (Première partie, III), a été utilisée afin de faire apparaître les facteurs clés (identifiés avec des étoiles) abordés pour chaque produit par l'acteur interrogé et sur lesquelles il avait insisté (Annexe 2).

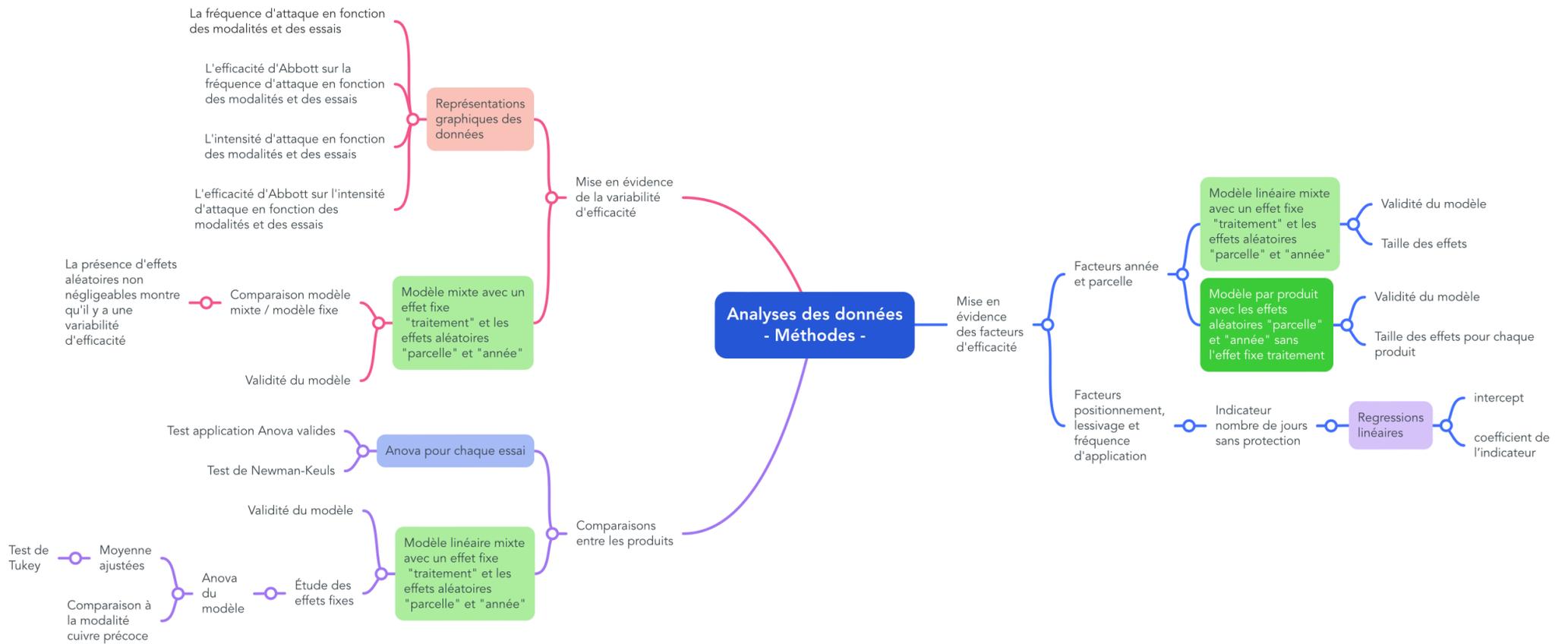


Figure 11 : Carte mentale des différentes analyses des données

Le discours des deux personnes interrogées pour le Belvine et le Roméo était souvent porté sur les SDP en général car c'est principalement leur mode d'action SDP qui fait leur spécificité. Les informations obtenues pour ces deux produits ont donc été recroisées et analysées ensembles.

Les trois entretiens ont fourni des informations détaillées sur les trois produits étudiés et surtout sur les facteurs pouvant influencer leur efficacité. Ces entretiens ont permis d'identifier les paramètres pertinents à examiner pour déterminer s'ils exercent une influence sur les produits testés dans BIOVIMED.

III. Analyses des données obtenues lors des essais

Les données obtenues pour chaque essai sont les données des notations. Les analyses qui suivent se basent sur les données des notations grappes de la base de données créée précédemment. Une cartographie des analyses statistiques, qui seront réalisées et de leurs objectifs, est représentée sous forme de carte mentale en figure 11.

III.1 Analyse statistique de l'efficacité des produits testés pour chaque essai

Dans l'optique de repérer les facteurs qui seraient susceptibles de jouer sur le niveau de contrôle de la maladie exercé par les produits. Toutes les notations effectuées ont été analysées avec la démarche qui suit.

Tout d'abord, à partir des valeurs notées, la fréquence et l'intensité d'attaque sont évaluées pour chaque parcelle élémentaire (qui correspond à une répétition pour une modalité). La fréquence d'attaque est le pourcentage de feuilles/grappes touchées. L'intensité est le pourcentage de la surface de la feuille/grappe touchée. Ensuite, la moyenne de la fréquence et de l'intensité est effectuée pour chaque modalité (moyenne des répétitions).

Une analyse de variance (ANOVA) est effectuée avec le logiciel R Studio (Annexe 5) afin de comparer et de valider le fait que les modalités ont une efficacité identique ou différente. En expérimentation, les conditions sont rarement remplies pour réaliser une ANOVA, une transformation angulaire de BLISS est donc effectuée. Il faut prendre la racine carrée de la fréquence ou de l'intensité de la modalité et la diviser par 100, puis prendre l'Arcsin de ce résultat. Cela permet de remplir les conditions de l'application de l'ANOVA (normalité, homoscedasticité).

Pour chaque ANOVA, la normalité des résidus est vérifiée avec un intervalle de confiance à 95% ($\alpha=0,05$). Il faut que la p-value soit supérieure au niveau de signification α fixé pour que les différences soient significatives. Cependant, les conditions d'application de l'ANOVA doivent être vérifiées. La normalité des résidus a été testée avec un test de Shapiro, l'homogénéité des variances a été vérifiée avec un test de Levene et l'indépendance des résidus a été vérifiée par visualisation graphique (Annexe 5).

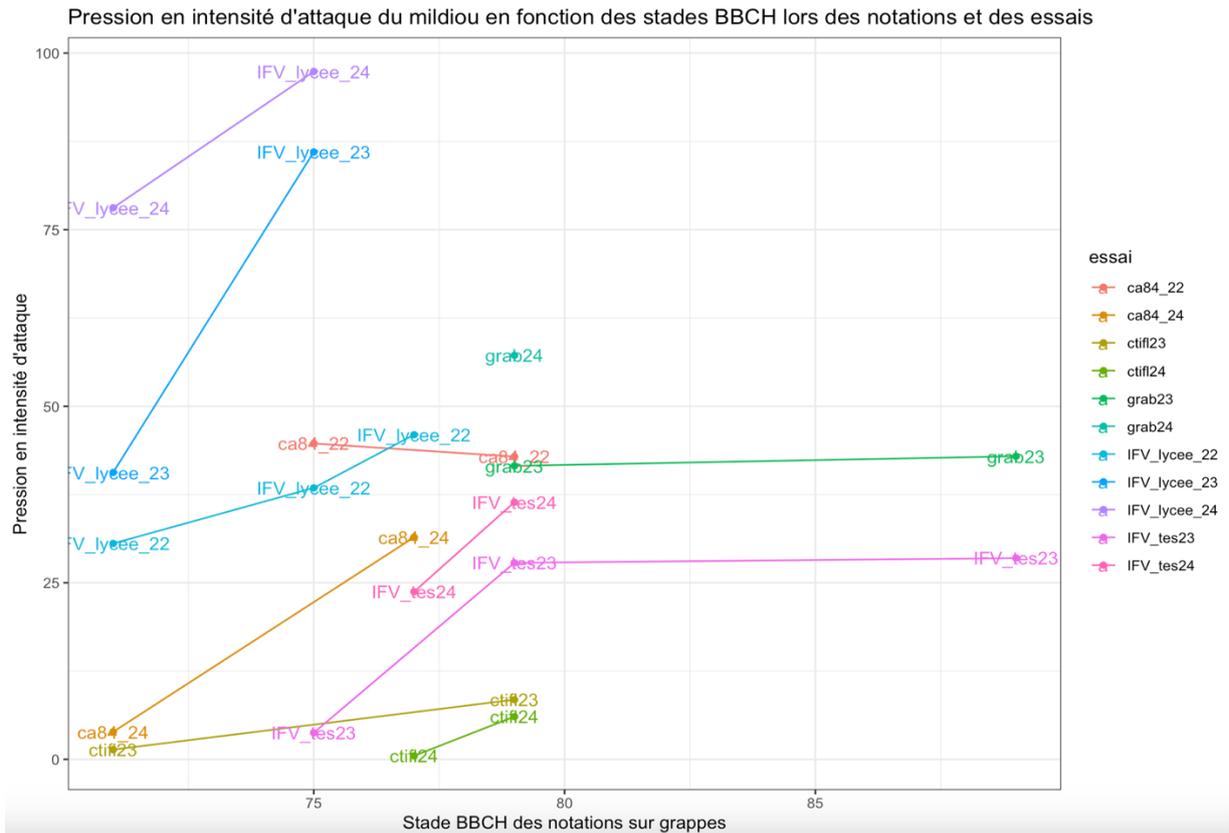


Figure 12 : Visualisation graphique de la pression pour l'intensité d'attaque dans les témoins en fonction des essais et des stades BBCH des notations

Le modèle d'ANOVA à un facteur associé au dispositif est : $y_{ij} = \beta_0 + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$

Avec : β_0 = moyenne générale, y = la valeur de la variable mesurée sur l'unité expérimentale, α_i = l'effet du facteur étudié i (ici la modalité), β_j = l'effet du facteur contrôlé j (ici le bloc), ε_{ij} = le terme résiduel.

Après l'ANOVA, le test de Newman-Keuls est réalisé (Annexe 5). Il permet de déterminer les différences significatives entre les moyennes des groupes dans une analyse de variance. Le résultat de ce test associe chaque modalité à un groupe statistique. Si deux modalités appartiennent à deux groupes différents alors elles sont significativement différentes. En comparant les groupes des différentes modalités des produits de biocontrôle à la modalité « cuivre tardif », il est possible de conclure sur l'efficacité ou inefficacité des produits. De plus en comparant également les groupes statistiques des produits entre eux il est possible de voir si un produit est significativement plus efficace qu'un autre.

En appliquant cette méthode, l'efficacité de chaque produit est évaluée pour chaque essai, il est alors possible d'évaluer l'effet d'un produit par rapport au témoin de vraisemblance et de comparer l'efficacité des produits entre eux. La variabilité de l'efficacité peut ainsi être évaluée en comparant les résultats d'efficacité des différents essais.

III.2 Choix des notations pour les analyses entre les essais

Pour comparer les résultats de chaque essai, une seule notation sur les grappes par essai a été choisie. Les résultats des analyses précédentes pour chaque notation (III.1) permettent de voir quelle notation est la plus pertinente pour chaque essai. Les notations les plus pertinentes correspondent à celle pour lesquelles la modalité « cuivre précoce » est significativement différente (par le test de Newman-Keuls) de la modalité « cuivre tardif ». En effet cette comparaison permet de valider l'essai en confrontant le « témoin positif = cuivre précoce » au « témoin de vraisemblance = cuivre tardif ». De plus, bien que plusieurs notations par essai puissent être considérées comme « pertinentes », une seule doit finalement être retenue pour les analyses plus générales. Ce choix final a été réalisé à l'aide d'une visualisation graphique de la pression en intensité d'attaque dans les témoins en fonction des notations de chaque essai (Figure 12), afin de sélectionner les notations qui se trouvent le plus possible au même niveau de pression.

Cependant, pour trois essais (IFV_tes24, ctifl23 et ctifl24), aucune différence significative n'a été observée quelles que soient les modalités. L'utilisation du cuivre en début de campagne (cuivre précoce) n'a pas apporté de protection supplémentaire par rapport à une utilisation du cuivre plus tardive (cuivre tardif). Par conséquent, ces trois essais ne seront pas inclus dans la suite des analyses, car la protection en début de campagne n'était pas nécessaire. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le début des traitements « cuivre tardif » (signifiant le début de la généralisation du cuivre sur toutes les modalités) s'est produit trop tôt dans la campagne rendant impossible l'observation de différence entre les modalités.

III.3 La variabilité d'efficacité d'un même produit selon les essais

Les variabilités d'efficacité des produits entre les différents essais peuvent être mises en évidence par une visualisation globale des données des notations sélectionnées. La variabilité des résultats peut être visualisée graphiquement en représentant l'intensité d'attaque, la fréquence d'attaque, l'efficacité d'Abbott* sur fréquence d'attaque ou l'efficacité d'Abbott sur l'intensité d'attaque en fonction de chaque produit et de chaque essai. Ces quatre représentations graphiques ont été réalisées dans R studio par le script de l'annexe 6 permettant une visualisation globale des données.

Le calcul de l'efficacité d'Abbott permet la prise en compte de la pression dans les témoins qui est différente d'un essai à l'autre. L'efficacité d'Abbott de chaque modalité sur la fréquence d'attaque est calculée dans la base de données utiliser dans R à l'aide de la formule d'Abbott :

$$E = 100 - ((F_{\text{Modalité}} * 100) / F_{\text{TNT}})$$

Avec E = efficacité d'Abbott de la modalité par rapport au témoin non traité (%)

F = fréquence d'attaque moyenne sur la modalité observée ; F_{TNT} = fréquence d'attaque moyenne sur le TNT

L'efficacité d'Abbott est également calculée de la même manière pour l'intensité d'attaque.

Les variabilités d'efficacité des produits seront mises en évidence statistiquement grâce au modèle linéaire mixte utilisé dans la partie suivante. Une réflexion peut donc être menée dans le but de déterminer le ou les paramètres qui seraient les causes de ces variabilités.

III.4 Mise en évidence de facteurs d'efficacité sur les résultats des essais étudiés

Le projet BIOVIMED n'ayant pas initialement pour objectif d'étudier les facteurs d'efficacité des produits, les données obtenues ne sont donc pas idéales pour une analyse statistique approfondie sur les effets des potentiels facteurs. Cependant, des facteurs et des tendances peuvent être examinés pour mieux comprendre la variabilité des résultats.

L'intensité d'attaque et la fréquence d'attaque sont liées. En effet, une régression linéaire entre ces deux variables mesurées donne un R² de 0,71 avec la base de données des notations sélectionnées précédemment. Ces deux variables sont donc dépendantes, nous pouvons supposer que l'influence des facteurs d'efficacité est similaire sur la fréquence et sur l'intensité. L'analyse des facteurs se basera uniquement sur les résultats de l'intensité d'attaque.

III.4.1 Les effets des facteurs « traitement », « parcelle » et « année »

Le réseau d'essai « BIOVIMED mildiou » est un réseau multisite exécuté sur plusieurs années. Dans un réseau d'essais qui ont lieu sur plusieurs années, les expériences effectuées au cours de la même année ont une caractéristique commune qui est l'effet de l'année. De même,

dans les réseaux multisites, toutes les expériences effectuées sur le même site ont une caractéristique commune qui est l'effet de la parcelle.

L'analyse des résultats d'intensité d'attaque du mildiou de ce réseau est donc possible à l'aide d'un modèle tenant compte des effets du site et de l'année. De plus, ce modèle est apparu comme le plus pertinent avec nos données à l'issue de tests réalisés avec des modèles intégrant d'autres facteurs (comme la pression dans les TNT). La quantité limitée de données issue du projet BIOVIMED permet seulement d'étudier les facteurs très intégrateurs « année » et « parcelle ».

Les facteurs "année" et "parcelle" sont des facteurs croisés, deux facteurs sont croisés lorsque chaque niveau d'un facteur se produit en combinaison avec chaque niveau de l'autre facteur (Minitab 2024). La variabilité entre les essais peut être décrite comme la somme des effets de l'année, de la parcelle et de l'interaction entre l'année et la parcelle. Cela veut dire qu'il est possible de décomposer l'effet de l'interaction essai x traitement en la somme de l'interaction d'année x traitement, de l'interaction de parcelle x traitement et d'une interaction de parcelle x année x traitement. Dans ce cas, l'interaction de la parcelle x l'année x traitement est confondue avec l'erreur expérimentale. Cela s'explique par le fait que la variabilité entre les essais est prise en compte dans « année » et « parcelle » et que les résidus prennent en compte les effets qui ne sont pas liés aux essais, il reste donc seulement l'erreur expérimentale dans l'interaction parcelle x l'année x traitement. Un modèle peut donc être utilisé pour décrire une partie de la variabilité entre les essais et l'interaction de l'essai x traitement, en utilisant les facteurs "année" et "parcelle". (Makowski, Piraux, Brun 2019)

Le modèle utilisé :

$$y_{irs} = \mu + t_i + A_r + L_s + AL_{rs} + tA_{ir} + tL_{is} + \epsilon_{irs}$$

y_{irs} est la valeur moyenne de l'intensité pour le traitement i ($i = 1, \dots, I$), dans l'année r ($r = 1, \dots, R$) pour la parcelle s ($s = 1, \dots, S$) et μ , t_i , A_r , L_s , AL_{rs} , tA_{ir} , tL_{is} , et ϵ_{irs} sont respectivement la moyenne générale, l'effet du traitement i , l'effet de l'année r , l'effet de la parcelle s , l'effet de l'interaction de l'année r et de la parcelle s , l'effet de l'interaction entre le traitement i et l'année r , l'effet de l'interaction entre le traitement i et la parcelle s et le résidu associé à y_{irs} . Ce résidu comprend à la fois l'erreur expérimentale et un effet d'interaction de la parcelle x année x traitement. (Makowski, Piraux, Brun 2019)

Les années sont supposées comme étant un échantillon aléatoire de la population d'années possibles, bien que les années soient successives et, par conséquent, pas vraiment choisies au hasard. Néanmoins, il est généralement supposé que l'effet de l'année soit aléatoire. Si nous considérons que les effets de « l'année » et de « la parcelle » sont aléatoires, cela implique que toutes les interactions impliquant ces facteurs sont également aléatoires. Le modèle utilisé est donc un modèle linéaire mixte avec l'effet fixe « traitement » et les effets aléatoires « année » et « parcelle ».

L'analyse des résultats d'intensité d'attaque du mildiou a été réalisée avec ce modèle dans le logiciel R Studio à partir des moyennes des répétitions par traitement (modalité) des valeurs d'intensité d'attaque des résultats des notations sur grappes sélectionnées (Partie III.2). Lors de l'exécution du modèle, la validité du modèle est vérifiée en regardant graphiquement : l'homoscédasticité, la normalité des résidus, la normalité des variables aléatoires (Stefaniak 2018) et la visualisation de la distribution des résidus pour chaque effet pour voir s'ils ne s'éloignent pas trop de la normalité. La valeur la plus aberrante est également déterminée.

L'analyse du modèle est ensuite réalisée en suivant plusieurs étapes (Script R complet de cette analyse en annexe 7) :

- Première étape : Mettre en évidence la pertinence de l'utilisation du modèle mixte et la variabilité d'efficacité des modalités par la comparaison du modèle mixte à un modèle fixe :

La pertinence de l'utilisation du modèle mixte par rapport à un modèle fixe avec seulement l'effet fixe « traitement » peut être vérifiée par la représentation graphique de la comparaison des effets fixes des deux modèles. S'il y a une différence entre les valeurs des effets fixes du modèle fixe et du modèle mixte, cela veut dire que la prise en compte des effets aléatoires dans le modèle mixte a un impact sur l'estimation des effets fixes, ainsi l'utilisation du modèle mixte est justifiée car le modèle fixe ne prendrait pas en compte des effets importants. De plus, si les effets aléatoires sont significatifs, cela indique une réelle variabilité de l'efficacité des produits entre les essais.

- Deuxième étape : Voir l'impact des facteurs « année » et « parcelle » par l'étude des effets aléatoires :

Les variances des effets aléatoires sont extraites et les valeurs des effets aléatoires sont estimées. Ces valeurs montrent les écarts par rapport à l'effet moyen prévu par le modèle pour chaque année, parcelle ou combinaison d'année et de parcelle. Une visualisation graphique des effets fixes et aléatoires (Graphique bilan des effets) permet de montrer la variabilité présente dans les données, ainsi que la contribution relative de chaque source de variabilité (parcelle, année, interaction année-parcelle) au modèle global. Les parcelles et les années peuvent être classées de celle ayant l'effet le plus négatif à celle ayant l'effet le plus positif sur l'intensité d'attaque.

- Troisième étape : Montrer les différences entre les modalités par l'étude de l'effet fixe « traitement » :

Dans l'optique d'étudier l'effet fixe « traitement », un test ANOVA est réalisé sur le modèle, la p-value associée à ce test permet de voir si le facteur traitement a un effet significatif sur l'intensité d'attaque observée. Si le test ANOVA montre une différence significative entre les traitements, il est approprié d'effectuer des tests post-hoc comme l'analyse des moyennes ajustées ou des comparaisons multiples pour déterminer quels traitements se distinguent les uns des autres.

L'analyse des moyennes ajustées (ne prenant pas en compte l'effet des autres facteurs, afin de se concentrer sur l'effet spécifique des traitements) permet de classer les modalités de la plus efficace à la moins efficace. De plus, le test de Tukey pour les comparaisons multiples est réalisé sur les moyennes ajustées de chaque modalité afin de déterminer les groupes statistiques de significativité. Les traitements qui partagent la même lettre ne sont pas significativement différents les uns des autres au niveau de significativité de 0,05.

Afin de montrer si des produits ressortent avec une efficacité significative et si des modalités se distinguent des autres, la comparaison des modalités avec le témoin de vraisemblance (cuivre_tardif) est réalisée.

III.4.2 Possibilité de l'intégration des autres facteurs identifiés à partir des caractéristiques des sites d'essai

L'influence de la pression sanitaire dans les TNT serait un facteur à étudier cependant avec nos données ce facteur est difficilement analysable. En effet, dans le modèle statistique précédent les facteurs « année » et « parcelle » intègrent l'effet du TNT. Pour voir l'effet du TNT, un modèle avec seulement l'effet aléatoire « intensité dans le TNT » et l'effet fixe « traitement » serait envisageable mais avec nos données cela serait équivalent à faire un modèle avec le seul facteur aléatoire « essai ». Ce qui serait confondu avec les facteurs parcelle, année et donc moins précis.

Il n'y a pas assez de données pour voir l'effet des facteurs « cépages », « volume », « mode de conduite » et « âge de la vigne » car ces effets sont confondus avec le facteur « parcelle ». En effet, le réseau expérimental possède trop peu d'essais différents. Chaque parcelle est plantée avec un cépage différent donc l'effet « cépage » est à l'intérieur de l'effet « parcelle », de même pour le facteur « âge de la vigne », chaque parcelle a un âge différent. De plus, il y a trois volumes de bouillie différents et trois modes de conduites différents sur cinq parcelles (Tableau 4), certaines variables sont donc représentées par un seul essai. L'étude de ces facteurs n'est donc pas possible avec la base de données du projet BIOVIMED.

III.4.3 Étude de l'impact des facteurs pour chaque modalité

Dans l'optique d'étudier plus précisément chaque produit, le modèle statistique utilisé précédemment a été adapté et simplifié en supprimant l'effet fixe « traitement » et l'effet aléatoire de l'interaction « parcelle x année ». Ce modèle peut être utilisé pour chaque modalité en utilisant les données qui correspondent à chaque modalité.

Lors de l'exécution du modèle, la validité du modèle est vérifiée comme pour l'utilisation des modèles précédents. L'analyse du modèle est ensuite réalisée :

- L'exécution du modèle mixte avec les effets aléatoires « parcelle » et « année » permet de montrer l'ampleur de la variabilité due à chaque source d'effet aléatoire sur l'efficacité d'une modalité.
- Ensuite, les variances des effets aléatoires sont extraites et les valeurs des effets aléatoires sont estimées. Ces valeurs montrent les écarts par rapport à l'effet moyen prévu pour chaque année ou parcelle pour chaque produit.

L'analyse de chaque modalité a été réalisée sur R par le même type de code que dans le script de l'annexe 7.

III.4.4 Étude du facteur positionnement par la création d'un indicateur appelé « Nombre de jours sans protection »

Une étude plus détaillée du facteur année, en utilisant les données météorologiques des années étudiées pour chaque essai, serait pertinente afin de mieux caractériser l'influence des conditions météorologiques sur l'efficacité des produits. Cependant, il y a une seule parcelle pour laquelle les essais ont été réalisés sur les 3 ans, il y a des résultats seulement sur une ou deux années pour les autres parcelles. Il y a donc peu de données pour mettre en place une

analyse statistique robuste sur l'influence de la température, des précipitations ou de l'hygrométrie. Avec cette base de données, une étude sur le positionnement des traitements par rapport aux épisodes contaminants, en prenant en compte les épisodes pluvieux, semble plus adaptée.

L'indicateur « Nombre de jours à risque sans protection » peut être formulé pour répondre à cette étude sur le positionnement.

Cet indicateur correspond au nombre de jours pour lesquels la protection n'est plus active (produit lessivé ou non-respect de la cadence) à partir du premier traitement et jusqu'au dernier épisode pluvieux avec un risque de contamination ou de la date de la notation sélectionnée. Il est déterminé pour chaque modalité. L'objectif est d'utiliser cet indicateur comme un facteur potentiel d'efficacité, c'est-à-dire-regarder comment ce nombre de jours fait varier l'efficacité d'un produit entre les différents essais. Cela permettra de montrer l'importance du respect des préconisations liées au positionnement (cadence de renouvellement des traitement, sensibilité au lessivage, temps de protection) de chaque produit sur l'efficacité des produits.

Afin d'obtenir un nombre de jour pour chaque produit dans chaque essai, il est nécessaire d'utiliser les données climatiques de chaque année de la date du premier traitement à la date du dernier épisode pluvieux avec un risque de contamination s'il intervient après le dernier traitement. De plus, la détermination de ce nombre se base aussi sur les informations collectées lors des entretiens avec les firmes afin de déterminer la rémanence de chaque produit et à quel moment un renouvellement de traitement serait nécessaire. Cela permet de trouver le nombre de jour où la protection n'est plus active.

L'analyse statistique de l'impact de cet indicateur sur l'intensité d'attaque du mildiou doit être réalisé produit par produit car les caractéristiques propres à chaque produit influencent fortement les valeurs de l'indicateur. Ce facteur ne peut donc pas être intégré au modèle mixte avec l'effet fixe « traitement » (III.4.1). De plus, le faible nombre d'essais dans lesquels les produits sont testés ne permet pas d'intégrer ce facteur au modèle utilisé pour chaque produit (III.4.3).

Pour ce facteur, l'analyse est réalisée (Script R de l'annexe 8) pour chaque produit et se base sur un test de linéarité avec un modèle linéaire ajusté « lm » dans R Studio. Les modalités à base de cuivre sont regroupées car les valeurs de l'indicateur sont déterminées pour le même produit. Le résultat de chaque modèle fait ressortir pour chaque produit :

- Un « intercept » : son estimation représente la valeur prédite de l'intensité lorsque le nombre de jours à risque non protégés est de 0. Cette estimation est significative si sa p-value est inférieure à 0.05, ce qui indique une forte probabilité que cet intercept ne soit pas dû au hasard.
- Un « coefficient de l'indicateur » : si ce coefficient est positif, cela indique que pour chaque jour supplémentaire à risque non protégé, l'intensité augmente de la valeur du coefficient. Ce résultat est statistiquement significatif si sa p-value est inférieure à 0.05.

Pour finir l'analyse, la construction d'un graphique avec les points de données et les lignes de régression pour chaque modalité permet de visualiser les données. Cette approche permet d'analyser et de visualiser l'effet de l'indicateur sur la fréquence pour chaque traitement séparément.

PRODUITS SDP		Roméo	Belvine
PRINCIPAUX FACTEURS D'EFFICACITÉ	Facteurs communs	Positionnement	
		Fréquence d'application	
		Qualité de pulvérisation	
		Température	
		Mode d'utilisation	
	Autre facteur pour le Roméo	Nutrition hydrominérale de la vigne	
	Autres facteurs pour le Belvine		Cépage
			Volume de boullie à l'hectare

Tableau 6 : Récapitulatif et comparaison des principaux facteurs d'efficacité des deux produits SDP étudiés

Troisième partie : Résultats

I. Les principaux facteurs d'efficacité pour les firmes produisant et commercialisant les produits testés : analyse des entretiens

Les principaux facteurs d'efficacité mentionnés lors des entretiens sont présentés dans cette partie pour chaque produit. Ils sont évoqués en commençant par ceux identifiés comme les plus importants.

I.1 Cas des Stimulateurs de défenses des Plantes (SDP)

Deux produits SDP ont été étudiés : le Roméo et le Belvine. Les principaux facteurs d'efficacité de ces produits sont résumés dans le tableau 6.

Cas du Roméo

Les principaux facteurs qui ressortent de l'entretien réalisé sont :

- Le positionnement : L'application en préventif est primordiale, le produit peut être utilisé du stade deux feuilles étalées jusqu'aux vendanges mais il est plus efficace s'il est utilisé en début de campagne avant les premiers symptômes. Une application en début de campagne vaut mieux que deux plus tard.
- La fréquence d'application : La cadence de traitement recommandée est de 7 à 10 jours. Le produit entraîne un message qui circule dans la plante, il faut donc renouveler le signal dans la plante. La cadence ne doit pas être supérieure à dix jours. Le produit est à l'abri du lessivage dès qu'il est sec. Cependant la cadence peut être réduite s'il y a beaucoup de pluies et un risque fort de contamination.
- La qualité de pulvérisation : Il n'y a pas eu de tests pour déterminer des réglages spécifiques pour pulvérisation mais la pulvérisation doit toucher le plus d'organes possibles pour que le produit soit efficace.
- La température : Les fortes variations de températures peuvent influencer l'efficacité du produit. Par exemple une période plus froide en début de campagne de traitement risque d'entraîner le « blocage » du développement végétatif de la plante. L'activation des gènes de défense de la plante sera donc plus difficile pour les SDP. Les variations brusques de la température peuvent donc diminuer l'efficacité des SDP.
- La nutrition hydrominérale de la vigne : Il est nécessaire de trouver un bon équilibre nutritif pour la plante. Les carences en azote peuvent entraîner un blocage des défenses qui pourrait bloquer l'effet du produit et les excès pourraient entraîner une plus grande sensibilité aux maladies.

Par ailleurs, l'entretien a mis en avant des conseils sur l'utilisation du produit. Il est conseillé d'utiliser le Roméo en association avec des phosphonates de potassium ou avec du cuivre. Il n'est pas conseillé seul mais plutôt en intégration dans un programme de protection pour améliorer son efficacité. De plus, le niveau de contrôle du produit sur le mildiou est plus ou moins visible selon la pression du mildiou. Son utilisation est conseillée en cas de faible et

moyenne pression. L'influence des facteurs biotiques (cépages, stade phénologique, âges des feuilles, âge de la vigne, densité de la canopée) sur l'efficacité du produit n'ont pas été étudiés. Cependant, il a été montré que les organes les plus jeunes étaient plus réceptifs.

Cas du Belvine

Pour le Belvine, les principaux facteurs qui ressortent de l'entretien réalisé sont :

- Le volume de bouillie à l'hectare serait le facteur le plus important, l'idéal serait d'utiliser 300l/ha de bouillie à chaque traitement. Des essais à 800 ou 1000 l/ha ont montrés des résultats plus homogènes.
- La qualité de pulvérisation : Le volume final reçu sur la plante est l'élément le plus important. Des réglages précis n'ont pas été regardés.
- Le positionnement : Les produits SDP ont seulement une action préventive. Il ne faut pas appliquer des produits SDP au moment de la floraison. La stratégie de pulvérisation n'est pas influencée par la pluie, c'est la cadence qui est importante à respecter. Le Belvine n'est pas sensible au lessivage, il agit en trente minutes par pénétration.
- La fréquence d'application : Pour le mildiou, la cadence de traitement recommandée est de 8 jours. Il est conseillé de l'appliquer au moins 4 fois avant floraison. À partir de 4 applications un effet peut être visible. Pour tous les produits SDP, si le nombre d'application est inférieur à 3 il est difficile de voir un effet sur la plante.
- La température : La température peut influencer l'efficacité du produit. Les applications du Belvine sont conseillées aux moments les moins chauds de la journée (matin ou soir) afin d'éviter les moments où la plante ferme ses stomates.
- Le cépage : Les produits SDP apportent une protection quel que soit le cépage mais les différents cépages sont plus ou moins réceptifs. Les gènes sont plus ou moins stimulés mais l'efficacité du produit n'est pas forcément très influencée. Les cépages les plus résistants sont les moins réceptifs.

Dans la plupart des cas il est utilisé en association avec un ou plusieurs fongicides. Il y a des résultats intéressants pour le Belvine associé à une dose réduite de cuivre (exemple : 60% d'une dose de cuivre + Belvine)

Des études ont été réalisées sur l'application de SDP sur des vignes d'âge différent. Ce qui en ressort est que les vignes plus âgées absorbent plus l'eau dans le sol (stress hydrique plus faible) par rapport aux jeunes qui vont moins chercher l'eau en profondeur. Les jeunes vignes ferment donc leurs stomates plus rapidement (stress hydrique plus présent par rapport aux vieilles vignes) ce qui peut avoir un impact sur l'efficacité des SDP car le produit pourra plus difficilement rentrer dans la plante. Un stress abiotique peut entraîner une moindre réceptivité des produits SDP.

Facteurs communs à ces deux SDP

À l'issue de ces deux entretiens, l'efficacité des produits SDP semble être principalement influencée par cinq facteurs (Tableau 6) : la fréquence d'application, le positionnement, la

température, la qualité de pulvérisation et le mode d'utilisation (produit seul ou en association). La fréquence d'application et le positionnement sont essentiels pour ce type de produit qui agit en préventif. La température joue un rôle dans la réaction du produit avec l'environnement et la qualité de pulvérisation doit permettre une distribution uniforme et efficace.

I.2 Cas du Limocide – produit de biocontrôle éradiquant –

Le Limocide est un produit de biocontrôle de contact qui a un mode d'action principalement de type éradiquant sur le mildiou. Son utilisation est toujours conseillée avec soit un cuivre, soit un soufre ou un autre produit en conventionnel. L'utilisation en association de ce produit assure une meilleure rémanence. Le Limocide permet d'assécher le mildiou à la surface des feuilles au moment de son application (il n'agit pas sur les formes en incubation) et ensuite c'est le produit associé qui assure la protection. Les principaux facteurs qui ressortent de l'entretien réalisé sont :

- La qualité de pulvérisation : Des méthodes ou des réglages n'ont pas été étudiés précisément, mais comme c'est un produit de contact il est important d'avoir une bonne qualité de pulvérisation pour recouvrir le maximum d'organes. L'idéal serait de l'appliquer sur les deux faces des rangs de vigne.
- La dégradation du produit : Le principal facteur qui influence la vitesse de dégradation du produit est le lessivage. S'il est utilisé seul, le renouvellement des traitements est nécessaire dès qu'il y a une pluie. Le Limocide est à base de composés organiques volatils. La libération de ces composés entraîne sa dégradation, il ne reste pas sur la feuille. Des tests de dégradation du produit ont montré qu'au bout de 24/48 h l'efficacité diminuait.
- La température : L'application du Limocide ne doit pas avoir lieu si la température est supérieure à 30°C lors de l'application et dans les 6 heures suivantes.
- La présence de rosée : Il faut éviter d'appliquer sur un feuillage mouillé, puisque ce produit est travaillé en concentration. La présence d'eau sur le feuillage risque de diluer le produit.
- Le positionnement : Le produit doit être positionné au plus proche d'une potentielle contamination. Si la contamination a lieu 5 jours après un traitement, le Limocide n'est plus sur la feuille donc il ne peut plus avoir d'effet. La cadence de traitement recommandée est de 7 à 10 jours. Le renouvellement de la protection est nécessaire après une pluie et la protection doit être présente lors d'une pluie. De plus l'application doit avoir lieu quand il fait moins chaud, plutôt fin de journée puisqu'il faut qu'il fasse moins de 30°C dans les 6 h après l'application.

I.3 Lien entre les facteurs d'efficacité des produits et les essais BIOVIMED

Plusieurs facteurs, potentiellement influents sur l'efficacité des produits, peuvent être identifiés dans les essais BIOVIMED, cependant la plupart d'entre eux ne sont pas étudiables avec les données des essais :

- Positionnement, lessivage et fréquence d'application :

Les informations concernant le positionnement des traitements, les lessivages potentiels, ainsi que la fréquence d'application sont facilement accessibles dans le cadre du projet BIOVIMED en utilisant les calendriers de traitement et les données météorologiques. Ces facteurs sont des paramètres essentiels pour optimiser l'efficacité des produits testés. Ils seront étudiés par leur intégration dans l'indicateur « nombre de jours sans protection ». Ce dernier permet de prendre en compte le lessivage et le positionnement des traitements.

- Cépage et âge de la vigne :

Le cépage et l'âge des vignes sont des facteurs qui peuvent influencer la réponse aux traitements, principalement pour les SDP. Cependant, ces facteurs n'ont pas été pris en compte dans le protocole des essais BIOVIMED, il n'y a donc pas de parcelles avec le même cépage ou qui sont de la même tranche d'âge. Ces facteurs ne sont donc pas étudiables avec la base de données BIOVIMED.

- Volume de bouillie :

Le volume de bouillie appliqué est un autre facteur identifiable dans les essais. Cependant, peu de volumes différents sont testés et peu de répétitions ont eu lieu pour chaque volume testé. Ce facteur est donc difficilement étudiable avec ces essais.

- Facteurs environnementaux :

D'autres facteurs environnementaux qu'il serait intéressant d'étudier, tels que la température lors des traitements, la présence de rosée, les heures d'application et la fertilisation, n'ont pas été pris en compte dans les essais. Ils ne peuvent donc pas être étudiés par l'intermédiaire des essais BIOVIMED.

Bilan :

À l'issu des recherches bibliographiques et des entretiens réalisés, les seuls facteurs qui semblent être étudiables avec les résultats BIOVIMED sont :

- Les caractéristiques de la parcelle avec les caractéristiques pédoclimatiques, le cépage, l'âge de la vigne, le mode de conduite, l'inoculum de mildiou présent et sa sensibilité au mildiou, ce qui correspond au facteur global « **parcelle** ». (Tableau 4)

Résumé des données climatiques cumulées ou moyennées sur la période du 01/04 au 30/06

Essai	Année	Parcelle	Cumul de pluie (mm)	Durée de pluie (h)	Hygrométrie moyenne (%)	Température moyenne (°C)
IFV_lycee_22	2022	IFV_lycee	80,1	1,7	59,4	19,7
ca84_22	2022	ca84	82,0	2,3	59,3	19,2
IFV_lycee_24	2024	IFV_lycee	111,6	4,5	65,2	17,6
IFV_tes24	2024	IFV_tes	113,2	4,4	65,6	17,5
IFV_tes23	2023	IFV_tes	127,0	3,5	62,6	18,6
ca84_24	2024	ca84	155,6	5,9	69,5	16,9
IFV_lycee_23	2023	IFV_lycee	166,9	3,2	61,6	18,7
grab23	2023	grab	206,0	6,1	69,9	16,1
grab24	2024	grab	313,8	9,5	70,7	15,8

Ordre croissant du cumul de pluie ↓

: valeurs les plus élevées
 : valeurs les plus faibles

Tableau 7 : Résumé des données climatiques cumulées ou moyennées sur la période du 01/04 au 30/06

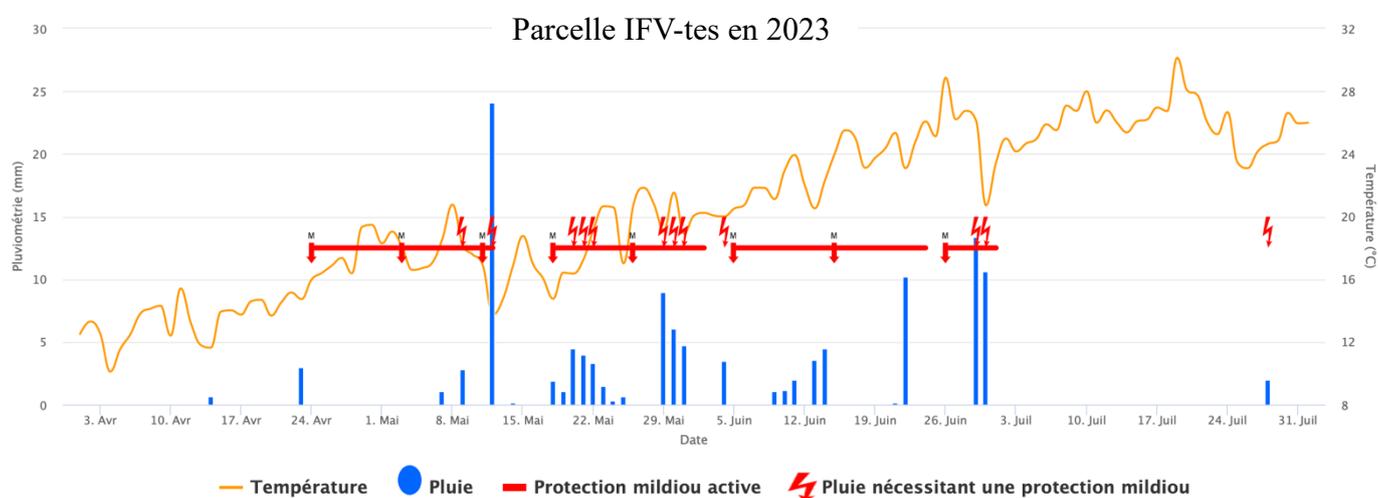


Figure 13 : Graphique des conditions météorologiques et du positionnement des traitements lors de l'essai sur la parcelle IFV_tes en 2023

Modalités	Essais											
	IFV_lycee_22	IFV_lycee_23	IFV_lycee_24	IFV_tes23	IFV_tes24	ctif23	ctif24	grab23	grab24	ca84_24	ca84_22	
Cuivre tardif	41	36	29	68	37	43	44	43	54	36	43	
Cuivre conseil	16	24	17	42	21			34	48	18	27	
Cuivre précoce	5	1	0	1	0	4	2	3	2	0	4	
Limocide	7	9	8	16	14	11	4	26	12	1	4	
Roméo	0	0	0	1	0	0	3	1	0	0	4	
Roméo+limocide		0		1				1	0		4	
Belvine			0		0					0		

Tableau 8 : Nombre de jours sans protection pour chaque combinaison de produit-essai

- Les conditions météorologiques de chaque année avec le facteur global « **année** » (Tableau 7).
 - L'année 2022 a été celle avec le printemps le plus sec lors des trois dernières années, la durée de pluie, l'hygrométrie moyenne et le cumul de pluie étant les plus faibles des trois ans. De plus, l'année 2022 est également l'année pour laquelle la température était la plus élevée. Le printemps 2022 était donc le plus chaud et sec des trois années de l'étude. Les contaminations du mildiou sont principalement causées par les pluies. L'année 2022 serait donc l'année avec le moins de risque de contamination et de propagation du pathogène.
 - Les conditions météorologiques des années 2023 et 2024 sont proches et variables selon les sites. La parcelle « grab » semble se différencier des autres parcelles par une forte pluviométrie. Cela s'explique par la situation géographique de la parcelle. Sans prendre en compte cette parcelle, le printemps 2023 semble plus pluvieux (environ 15 à 50mm de pluie en moins entre 2023 et 2024).
- Le positionnement, le lessivage et la fréquence d'application avec le facteur « **nombre de jours sans protection** ». L'analyse des conditions météorologiques de chaque essai permet de repérer le lessivage et les épisodes contaminants. À l'aide du graphique de la figure 13 (exemple pour l'essai IFV_tes23), le « nombre de jours sans protection » peut être déterminé pour chaque essai en prenant en compte le positionnement, le lessivage et la fréquence d'application. Les résultats de la détermination du nombre de jours pour chaque produit dans chaque essai sont dans le tableau 8.

II. Mise en évidence de l'efficacité des produits et de la variabilité de cette efficacité

II.1 L'efficacité de chaque modalité par comparaison avec le témoin de vraisemblance

Pour les notations retenues, les modalités utilisant des produits de biocontrôle se montrent significativement plus efficaces que le « cuivre tardif » dans un nombre limité d'essais lors du test de Newman-Keuls après les ANOVA par essai (Tableau 9) :

- Le Roméo est plus efficace que le cuivre tardif sur l'intensité d'attaque du mildiou dans un essai.
- Le Limocide est plus efficace que le cuivre tardif sur l'intensité d'attaque du mildiou dans trois essais et dans un essai sur la fréquence d'attaque du mildiou.
- L'association Roméo + Limocide se révèle plus efficace que le cuivre tardif sur l'intensité d'attaque du mildiou dans un essai et sur la fréquence d'attaque dans un autre.
- En revanche, les modalités avec le Belvine et l'alternance Prêle/Saule ne présentent aucune différence significative par rapport au cuivre tardif dans l'ensemble des essais effectués.

Essai		IFV_lycee_22	IFV_lycee_23	IFV_lycee_24	IFV_tes23	grab23	grab24	ca84_24	ca84_22
Notation		G1	G1	G1	G3	G2	G3	G2	G1
Tests application anova valides	Fréquence	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
	Intensité	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Romeo	Fréquence	ab	abc	a	a	a	ab	a	b
	Intensité	a	a	a	b	a	ab	a	b
Limocide	Fréquence	a	abc	a	a	a	b	c	b
	Intensité	a	ab	a	b	a	b	b	b
Romeo+Limocide	Fréquence	ab	bc		a	a			b
	Intensité	a	abc		b	a			b
Belvine	Fréquence			a			a	bc	
	Intensité			a			ab	ab	
Cuivre_tardif	Fréquence	a	a	a	a	a	ab	ab	b
	Intensité	a	a	a	a	a	a	a	b
Cuivre_precoce	Fréquence	b	c	b	b	b	d	c	c
	Intensité	b	c	b	c	b	d	b	c
Prêle/saule	Fréquence		ab	a	a	a	ab	ab	b
	Intensité		a	a	a	a	ab	ab	b

	: Pas de données
	: Significativement plus efficace que le cuivre_tardif (témoin de vraisemblance)
	: Effet intermédiaire entre le cuivre_précoce (témoin positif) et le cuivre_tardif (mais pas significativement différent de l'un ou de l'autre)

Tableau 9 : Bilan des ANOVA réalisées pour chaque essai

Pour la moitié des essais, toutes les modalités se révèlent équivalentes, elles sont uniquement significativement moins efficaces que la modalité « cuivre précoce ». Pour ces essais, ce résultat laisse penser que l'utilisation de produits de biocontrôle en début de campagne n'a apporté aucun contrôle sur le développement de la maladie. Pour expliquer cela, on peut penser que la généralisation de l'utilisation du cuivre sur l'ensemble des modalités ait été réalisée trop tôt pour permettre de montrer des différences significatives. En effet, l'essai IFV_tes23 est le seul essai dans lequel les modalités avec les produits de biocontrôle se distinguent toutes du cuivre tardif et c'est également le seul où le début des traitements de la modalité « cuivre tardif » a été très tardif (premier traitement le 07/07/23 alors que pour les autres essais les premiers traitements étaient entre le 13/05 et le 23/06).

Dans les essais IFV_lycee_22 et IFV_lycee_23, certaines modalités ont un effet intermédiaire, c'est-à-dire un effet compris entre le témoin positif (cuivre précoce) et le témoin de vraisemblance (cuivre tardif). Ces modalités sont donc légèrement plus efficaces que le témoin de vraisemblance mais ne sont pas significativement différentes de ce témoin (légende vert clair dans le tableau 9).

De manière générale, les résultats montrent que les produits de biocontrôle ont une efficacité très faible lors qu'ils sont utilisés seuls en début de campagne.

II.2 Visualisation graphique globale des données et de la variabilité d'efficacité des produits testés

Pour toutes les modalités, la figure 14 montre qu'il y a des différences entre les fréquences d'attaque du mildiou sur les grappes de chaque essai. Il y a donc une variabilité de l'efficacité des produits. Cependant, cette figure met également en évidence que certains essais ont tendance à avoir une fréquence plus élevée ou plus faible quel que soit la modalité considérée. Cela pourrait être dû à la pression sanitaire qui est différente pour chaque essai. La pression sanitaire peut être assimilée à la pression dans les TNT. Le calcul de l'efficacité d'Abbott sur la fréquence d'attaque permet alors d'intégrer la pression sanitaire des essais. En utilisant les résultats de l'efficacité d'Abbott sur la fréquence, les mêmes résultats que pour la fréquence sont mis en évidence (Figure 15). L'intégration de la pression dans les TNT ne change donc pas la variabilité observée dans les résultats de chaque produit.

Les figures 16 et 17 mettent en évidence les mêmes résultats pour l'intensité d'attaque que ceux obtenus pour la fréquence d'attaque.

III. Étude des facteurs d'efficacité avec les résultats des essais BIOVIMED

Les résultats présentés dans cette partie se basent sur les valeurs d'intensité d'attaque de mildiou observées dans les essais BIOVIMED.

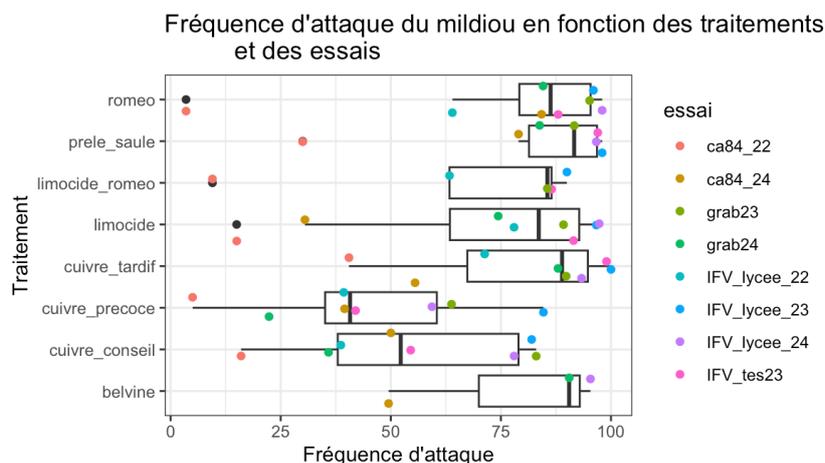


Figure 14 : Représentation graphique de la fréquence d'attaque ou de l'efficacité sur la fréquence d'attaque en fonction des produits et des essais

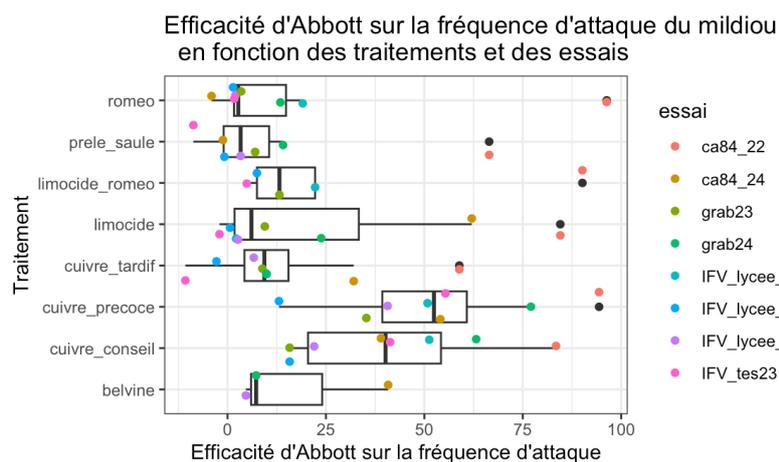


Figure 15 : Représentation graphique de l'efficacité d'Abbott sur la fréquence d'attaque en fonction des produits et des essais

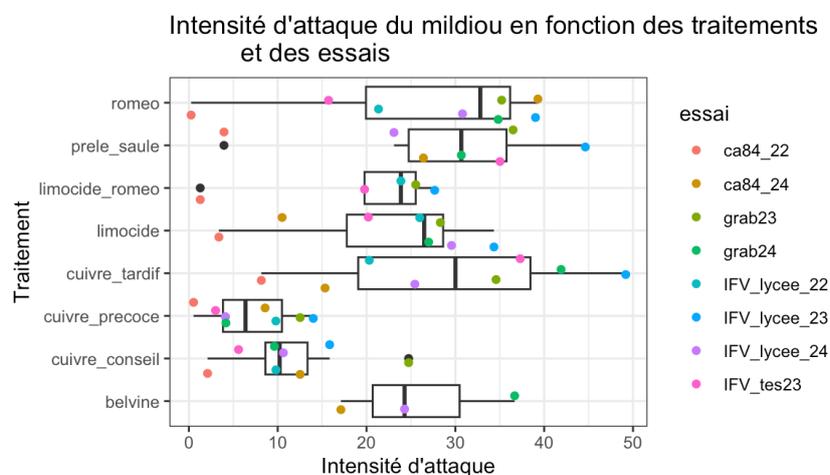


Figure 16 : Représentation graphique de l'intensité d'attaque en fonction des produits et des essais

III.1 Étude de l'effet des millésimes, des parcelles et des différentes modalités

L'étude de ces effets est permise par l'utilisation du modèle mixte avec l'effet « fixe » et les effets aléatoires « année » et « parcelle ». Tout d'abord, la variabilité de l'efficacité dans les résultats est montrée statistiquement. Ensuite, la taille des effets des facteurs « année » et « parcelle » est analysée. Enfin, les différences entre les modalités sont étudiées à l'échelle de l'ensemble des résultats des essais.

Mise en évidence de la variabilité des résultats indépendamment de l'effet fixe « traitement » par l'étude de la pertinence de l'utilisation du modèle mixte (Figure 18)

La pertinence de l'utilisation du modèle mixte par rapport à un modèle fixe avec seulement l'effet fixe « traitement » est vérifiée par l'analyse graphique de la comparaison des deux modèles. Il y a une différence entre les valeurs des effets fixes du modèle fixe et du modèle mixte, ce qui signifie que l'inclusion des effets aléatoires dans le modèle mixte influence l'estimation des effets fixes. Cela indique également que les effets aléatoires sont significatifs, révélant une réelle variabilité de l'efficacité des modalités entre les essais.

L'impact des facteurs « année » et « parcelle » par l'étude des effets aléatoires

L'ampleur de la variabilité due à chaque source d'effet aléatoire est quantifiée (Tableau 10). Ici, la parcelle semble être la source de variation la plus importante parmi les effets aléatoires, suivie de l'année. Les variances des effets aléatoires peuvent être visualisées (Figure 19). Le facteur parcelle semble entraîner plus de variabilité que le facteur année et que la combinaison des facteurs année et parcelle.

La visualisation des effets fixes et aléatoires (Figure 20) met en évidence les valeurs des effets aléatoires. Il y a des écarts spécifiques par rapport à l'effet moyen prévu pour chaque année, parcelle, ou combinaison d'année et de parcelle. Par exemple, pour la parcelle ca84, l'effet aléatoire est plus faible par rapport aux autres (-8,53), ce qui indique que cette parcelle a un effet négatif important (intensité plus faible) par rapport à la prévision. De plus, ces estimations mettent en évidence que l'interaction « année x parcelle » n'a pas une grande influence sur les résultats (tailles des effets faibles), cette interaction correspond aux erreurs expérimentales, elles sont donc très faibles. De plus cette visualisation permet de conclure que l'année 2022 a eu un effet négatif (-4,2) sur les résultats, la fréquence de mildiou était donc plus faible cette année-là. Contrairement à l'année 2023 qui a eu un positif (4,8) sur les résultats, la fréquence de mildiou était donc plus élevée en 2023. De même, les parcelles et les modalités peuvent être classées de celle ayant l'effet le plus négatif à celle ayant l'effet le plus positif sur l'intensité d'attaque du mildiou :

- Pour les parcelles : ca84 < IFV_tes < ca84b < IFV_lycee < grab
- Pour les modalités : cuivre_tardif < prele_saule < romeo < belvine < limocide < limocide_romeo < cuivre_conseil < cuivre_precoce

Les sites des essais et les millésimes semblent avoir un impact important sur l'efficacité des produits. L'interprétation de ces résultats n'est pas simple, ces deux facteurs intègrent de nombreux autres facteurs.

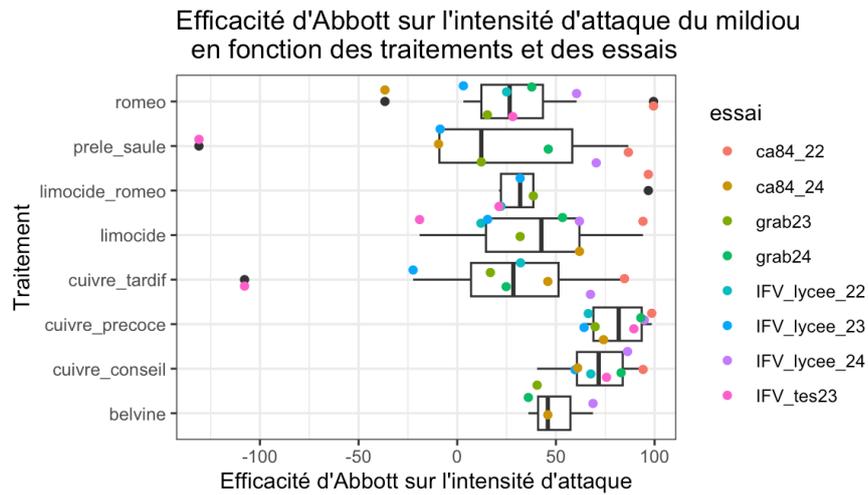


Figure 17 : Représentation graphique de l'efficacité d'Abbott sur l'intensité d'attaque en fonction des produits et des essais

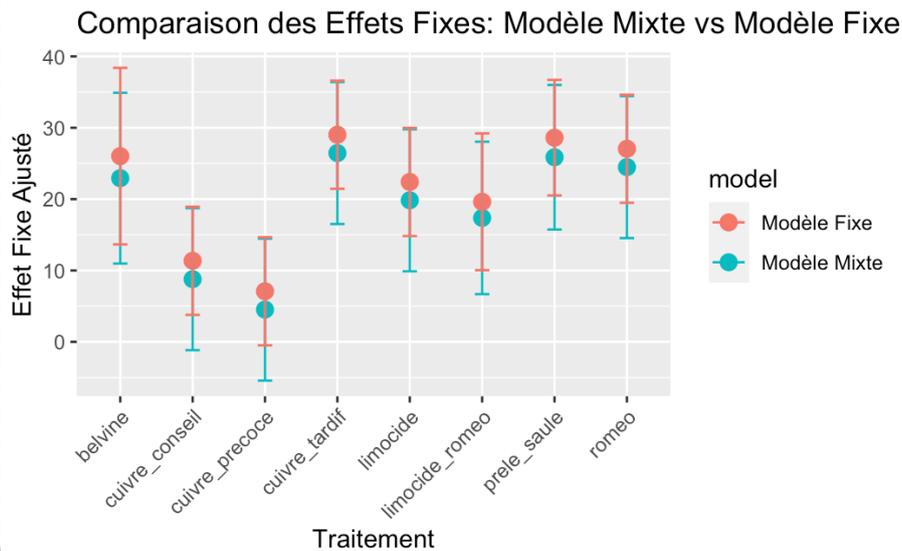


Figure 18 : Comparaison entre le modèle mixte et le modèle fixe

Nombre d'observation		Effets aléatoires		Effets fixes	
Total	55	parcelle	6,79	(Intercept)	22,94
annee:parcelle	8	annee	5,21	cuivre_tardif	3,52
parcelle	5	annee:parcelle	2,81	prele_saule	2,93
annee	3	Résidus	6,76	romeo	1,55
				limocide	-3,10
				limocide_romeo	-5,57
				cuivre_conseil	-14,15
				cuivre_precoce	-18,42

: L'effet aléatoire le plus important
 : L'effet aléatoire le plus faible
 : Dégradé de l'effet fixe (= traitement) ayant l'effet le plus positif sur l'intensité d'attaque du mildiou à celui avec l'effet le plus négatif

Tableau 10 : Résumé de modèle

Dans le facteur « parcelle », il y a l'influence des caractéristiques de la parcelle avec les caractéristiques pédoclimatiques, le cépage, l'âge de la vigne, le mode de conduite, l'inoculum de mildiou présent et sa sensibilité au mildiou mais également l'influence de l'expérimentateur. En effet, l'application des produits a été réalisée par des opérateurs différents selon les parcelles (sauf pour les deux parcelles réalisées par l'IFV), ce qui peut être une source de variabilité. Ce facteur est donc difficilement explicable. Par ailleurs, les conditions météorologiques interviennent aussi dans ce facteur « parcelle » pour le cas particulier de la parcelle « grab ». Cette parcelle n'a pas les mêmes conditions météorologiques par rapport aux autres parcelles sur une même année du fait de sa situation géographique. La forte pluviométrie observée sur cette parcelle sur les deux printemps d'essai explique le fait que cette parcelle soit déterminée comme la plus à risque dans le modèle statistique (c'est-à-dire celle qui a l'effet le plus positif).

Dans le facteur année, il y a l'influence des conditions météorologiques de chaque année. Les résultats semblent cohérents avec les conditions météorologiques observées. Le printemps le plus sec était en 2022 ce qui laisse penser que le risque de contamination et de développement du mildiou était plus faible cette année-là. Cette hypothèse est vérifiée avec les résultats obtenus par le modèle, 2022 est l'année avec l'effet le plus négatif sur l'intensité d'attaque, ce qui veut dire que c'est l'année qui entraîne les plus faibles intensités d'attaque du mildiou. Par ailleurs, l'année 2023 a l'effet le plus positif dans le modèle, ce qui est en accord avec les données météorologiques si on ne prend pas en compte la parcelle « grab ».

Le faible poids de l'interaction parcelle x année dans le modèle indique qu'il y a une faible erreur expérimentale.

Analyse des différences entre les modalités par l'étude de l'effet fixe « traitement »

La p-value associée à test ANOVA du modèle est en dessous du seuil de significativité de 0,05 (p-value = 1,021e-07). Cela signifie que le facteur « traitement » a un effet significatif sur l'intensité observée, c'est un facteur clé dans la variation de l'intensité observée.

- Analyse des moyennes ajustées (Tableau 11)

La modalité cuivre_tardif a la moyenne ajustée la plus élevée (26,45), suivi par la modalité prele_saule (25,87) et le romeo (24,49). Ces résultats suggèrent que ces traitements sont les moins efficaces. La modalité cuivre_precoce montre la plus faible moyenne ajustée (4,52), indiquant qu'elle est la modalité la plus efficace dans ce contexte.

Les traitements qui partagent la même lettre ne sont pas significativement différents les uns des autres au niveau de significativité de 0,05 (méthode de Tukey pour les comparaisons multiples). Les modalités cuivre_precoce (A) et cuivre_conseil (AB) forment un groupe qui se distingue des autres traitements par une efficacité significativement meilleure. Le « cuivre conseil » est donc équivalent au « cuivre précoce ». Les recommandations faites aux viticulteurs pour initier les traitements au cuivre permettent donc de trouver un bon équilibre entre une protection efficace et une réduction de l'utilisation du cuivre en début de saison.

Les modalités limocide, romeo, prele_saule, et cuivre_tardif appartiennent toutes au groupe C, ce qui signifie qu'elles ont des efficacités similaires entre elles et inférieures aux autres traitements.

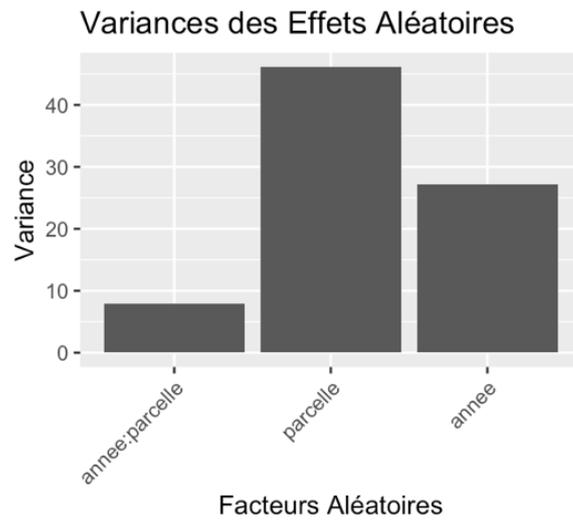


Figure 19 : Les variances des effets aléatoires

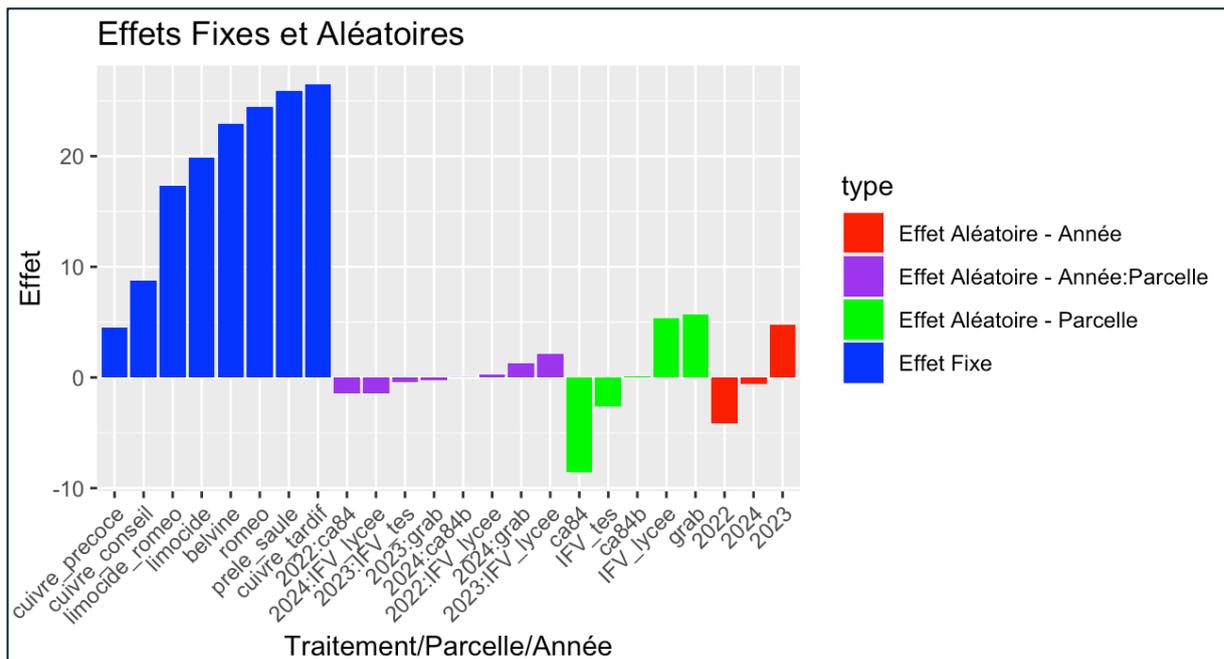


Figure 20 : Visualisation des effets fixes et aléatoires

Traitement	Moyenne des moindres carrés	Groupe statistique
cuivre_precoce	4,52	A
cuivre_conseil	8,79	AB
limocide_romeo	17,36	BC
limocide	19,84	C
belvine	22,94	BC
romeo	24,49	C
prele_saule	25,87	C
cuivre_tardif	26,45	C

Tableau 11 : Analyse des moyennes ajustées

Les modalités limocide_romeo et belvine n'ont pas été testées dans tous les essais, les moyennes ajustées sont donc établies sur un jeu de données partiel par rapport à celles des autres modalités. Le jeu de données étant trop restreint, l'interprétation des groupes statistiques de ces modalités n'est pas pertinente.

- Comparaison avec le témoin de vraisemblance (cuivre_tardif) (Tableau 12)

Ce test montre que les traitements significativement différents du cuivre_tardif sont le cuivre_conseil (effet estimé à -17.666 et une p-value <0,001) et le cuivre_precoce (effet estimé à -21.935 et une p-value <0,001). Les modalités belvine, limocide, limocide_romeo, prele_saule, et romeo n'ont pas montré de différence significative par rapport au cuivre_tardif, avec des p-values toutes > 0,05. Cela signifie qu'elles sont comparables au cuivre_tardif en termes d'efficacité.

Conclusion

Les facteurs « année » et « parcelle » ont donc une influence sur l'efficacité des produits de biocontrôle testés. L'effet lié à la parcelle est le plus important, il regroupe de nombreux paramètres. L'effet de l'année est facilement associable aux conditions météorologiques de chaque année. Par ailleurs, ce modèle montre aussi la très faible efficacité des produits de biocontrôle testés dans les conditions du dispositif BIOVIMED.

III.2 Étude de l'impact des facteurs « année » et « parcelle » pour chaque modalité

Le modèle statistique précédent, avec uniquement les effets aléatoire « année » et « parcelle », a été effectué sur toutes les modalités. Cependant, le Belvine n'a pas été testé dans suffisamment d'essai pour que le modèle statistique précédent soit applicable pour ce produit. Pour les autres produits, l'utilisation du modèle est valide, les parcelles ont des effets comparables quelle que soit le produit de biocontrôle utilisé. Néanmoins, le facteur « parcelle » ne semble pas avoir d'effet sur l'efficacité des modalités utilisant uniquement du cuivre (Tableau 13). De plus, la modalité cuivre_precoce ne semble pas être influencée par les deux facteurs observés (année ou parcelle).

L'année 2022 semble avoir un effet négatif sur l'intensité d'attaque, c'est-à-dire que cette année-là l'intensité d'attaque du mildiou était plus faible que lors des années 2023 et 2024. Inversement l'année 2023 semble avoir un effet positif sur l'intensité d'attaque, c'est-à-dire que cette année-là l'intensité d'attaque du mildiou était plus forte que lors des années 2022 et 2024. L'année 2024 semble être une année moyenne par rapport aux deux autres années étudiées. Ce qui est en accord avec l'analyse des conditions météorologiques des différents millésimes. La pluviométrie printanière influence donc l'efficacité des produits. Les printemps humides sont plus difficiles à protéger avec les solutions de biocontrôle.

Ces résultats sont donc en accord avec ceux obtenus avec le modèle mixte de la partie précédente et ils permettent de mettre en évidence que les effets aléatoires « année » et « parcelle » influencent principalement les modalités avec les produits de biocontrôle.

Comparaison du cuivre_tardif avec	Différence estimée	p.value
cuivre_precoce	-21,9	<0,0001
cuivre_conseil	-17,7	<0,0001
limocide_romeo	-9,1	>0,05
limocide	-6,6	>0,05
belvine	-3,5	>0,05
romeo	-2	>0,05
prele_saule	-0,6	>0,05

Tableau 12 : Comparaisons avec le témoin de vraisemblance

		Romeo	Limocide	Romeo+Limocide	Belvine	Cuivre_tardif	Cuivre_precoce	Prêle/saule
Std.Dev	parcelle	12,7	9,9	10,2		0	0	0
	annee	7,8	3,5	2,7		11	0	17,1
	Residual	3,7	1,6	0,1		10,6	4,84	4,6
Intercept parcelle	ca84	-13,83	-10,95	-14,43		0	0	0
	ca84b	12,16	-7,65			0	0	0
	grab	7,16	7,77	6,02		0	0	0
	IFV_lycee	6,74	11,8	8,16		0	0	0
	IFV_tes	-12,23	-0,97	0,26		0	0	0
Intercept annee	2022	-8,18	-3,44	-1,9		-9,33	0	-18,18
	2023	5,55	3,14	1,9		9,56	0	14,95
	2024	2,62	0,3			-0,23	0	3,23

	: Effet négatif sur l'intensité d'attaque
	: Effet positif sur l'intensité d'attaque
	: Effet aléatoire le plus influent
	: Pas de données

Tableau 13 : Tailles et valeurs des effets aléatoires du modèle linéaire mixte réalisé pour chaque modalité

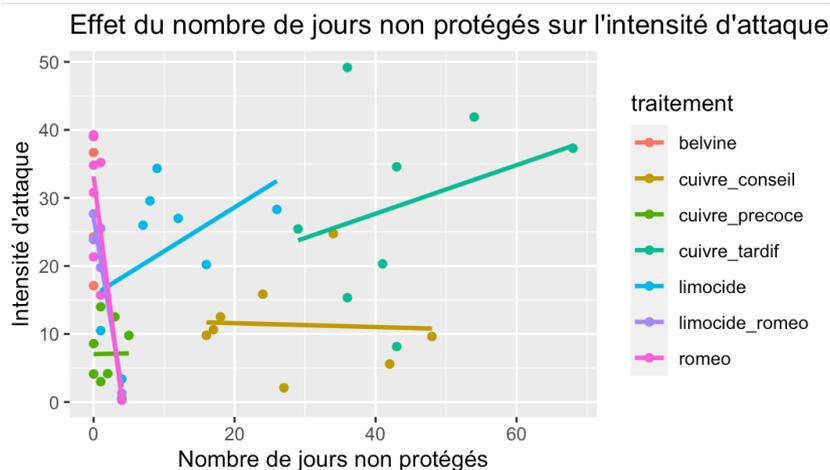


Figure 21 : Représentation graphique de l'intensité d'attaque en fonction du nombre de jours sans protection et des modalités

III.3 L'effet du facteur « nombre de jours sans protection »

Le facteur d'efficacité lié au positionnement des produits peut être étudié par l'indicateur « Nombre de jours sans protection ». Cet indicateur présente une limite pour les SDP. En effet, seulement une fréquence de renouvellement non respectée peut impacter la valeur de cet indicateur pour les SDP. Cependant, la cadence a été globalement bien respectée lors des essais, le nombre déterminé est donc, dans la grande majorité des cas, nul ou très faible. Une régression linéaire n'est donc pas possible pour ces produits (Figure 21). Par exemple, pour le Belvine, les valeurs déterminées sont toutes nulles. Pour l'analyse de cet indicateur, les produits SDP ne peuvent donc pas être pris en compte.

Régression linéaire sur le jeu de données du Limocide (Tableau 14) :

L'intercept représente la valeur prédite de l'intensité lorsque le nombre de jours non protégés est de 0. Ici, l'intensité est estimée à environ 15,71. Cette estimation est significative (p -value < 0.05). Ce qui indique que l'intensité d'attaque serait faible et comparable à celle observée pour une protection avec des traitements à base de cuivre, si la protection avec le Limocide était toujours présente. En effet, l'intensité d'attaque mesurée pour une protection au cuivre est en moyenne (sur l'ensemble des essais) de 7 % pour le cuivre_précoce, de 11,5 % pour le cuivre_conseil, et de 29 % pour le cuivre_tardif.

Le coefficient pour le « Nombre de jours sans protection » a une p -value supérieure à 0,05, l'estimation de cette valeur n'est donc pas significative. Cela indique que l'effet du nombre de jours de traitement sur l'intensité n'est pas statistiquement significatif.

Un R^2 de 0.2298 signifie que seulement 22,98% de la variabilité de l'intensité est expliquée par le modèle, ce qui est relativement faible. L'ensemble du modèle n'est pas statistiquement significatif, comme l'indique la p -value élevée associée à l' F -statistic. Cela peut s'expliquer par le nombre limité de données utilisées.

Régression linéaire sur le jeu de données du cuivre (Tableau 14) :

Le coefficient pour le « Nombre de jours sans protection » a une p -value inférieure à 0,05, l'estimation de cette valeur est donc significative. Ce qui suggère un effet significatif du nombre de jours de traitement sur l'intensité.

Un R^2 de 0.3915 signifie que 39,15% de la variabilité de l'intensité est expliquée par le modèle, ce modèle semble meilleur que celui pour le Limocide. La figure 22 montre cette régression.

La p -value de la F -statistic est inférieure à 0,01, l'ensemble du modèle est donc statistiquement significatif. Cela indique que le modèle est globalement bien adapté pour expliquer la relation entre le nombre de jours de traitement et l'intensité.

		Estimation	p-value
Limocide	Intercept	15,71	0,0424
	Nombre de jours sans protection	0,65	0,22293
	R ²	0,2298	
	F-statistic	1,791	0,2293
Cuivre	Intercept	5,6014	0,12063
	Nombre de jours sans protection	0,4144	0,00108
	R ²	0,3915	
	F-statistic	14,15	0,001075

 : p-value < 0,05
 : p-value > 0,05

Tableau 14 : Régressions linéaires pour le Limocide et le cuivre

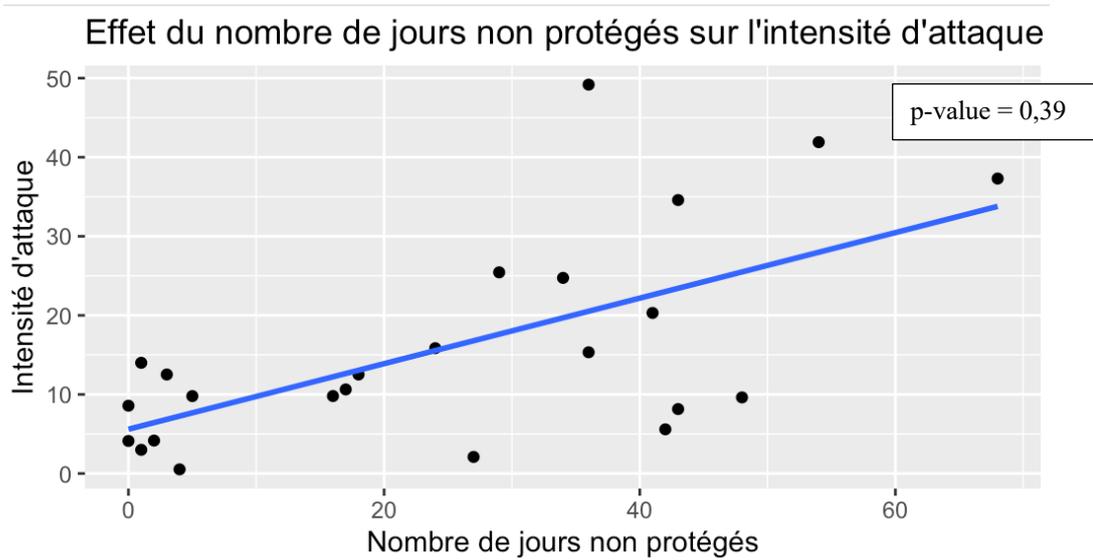


Figure 22 : Représentation graphique de l'intensité d'attaque en fonction du nombre de jours sans protection pour le cuivre

Ainsi, le modèle avec le cuivre semble avoir un effet plus clair et statistiquement significatif sur l'intensité comparé au modèle avec le Limocide qui ne montre pas de relation statistiquement significative entre le nombre de jours de traitement et l'intensité. Ceci peut être dû à un jeu de données plus important pour le cuivre par rapport à celui du Limocide.

Les traitements à base de cuivre doivent être appliqués de manière à éviter toute période sans protection. Il est donc essentiel de respecter rigoureusement les cadences et de surveiller les risques de lessivage afin de prévoir au mieux les renouvellements. Le positionnement semble donc être un facteur important pour le cuivre. Une base de données plus importante sur les autres produits permettrait de réaliser la même analyse, ce qui n'est pas possible ici.

Bilan de la « troisième partie : résultats »

L'ensemble des résultats des analyses statistiques effectuées sont précisés dans la carte mentale de la figure 23. Les principaux éléments qui ressortent de l'étude des données obtenues par les essais BIOVIMED sont que les produits de biocontrôle testés dans ces conditions ont une efficacité très faible et variable. Les principaux facteurs qui influent le plus sur cette efficacité sont les caractéristiques des parcelles, les conditions météorologiques notamment la pluviométrie printanière et le positionnement des traitements.

Quatrième partie : Discussion

I. Mise en perspective des résultats obtenus pour les produits testés

Dans les résultats précédents, les efficacités des produits de biocontrôle testés sont très faibles. Ce qui peut être expliqué par le fait que ces produits ont été utilisés seuls et pas en association comme cela est recommandé. D'autres projets ont mis en évidence une efficacité qui semble meilleure.

Le projet AlteRCuivre (Accompagnement pour Réduire le Cuivre en viticulture : de la prophylaxie aux alternatives) a permis de regrouper les résultats de nombreux essais sur de nombreuses alternatives au cuivre. Dans ce projet, l'huile essentielle d'orange douce était présente dans 15 essais. Pour 60 % d'entre eux elle a montré une protection proche ou égale à celle d'un produit de référence. Les résultats sont plus mitigés pour les stimulateurs de défenses des plantes (SDP) Par exemple pour la Cerevisane testée sur 13 essais, environ 60 % des essais ne montraient que peu ou pas de plus-value par rapport à un témoin de vraisemblance. « En effet, les SDP ont un mode d'action indirect sur le pathogène et, de fait, leur prise en main peut se révéler délicate du fait des interactions agent de biocontrôle/plante/pathogène accrue avec ce type de produit. » (Errecart et al. 2022) Ces résultats sont intéressants mais ils ne sont pas assez décrits pour pouvoir être comparés. Il n'est pas indiqué si ces produits ont été testés seuls ou en association avec des doses réduites de cuivre.

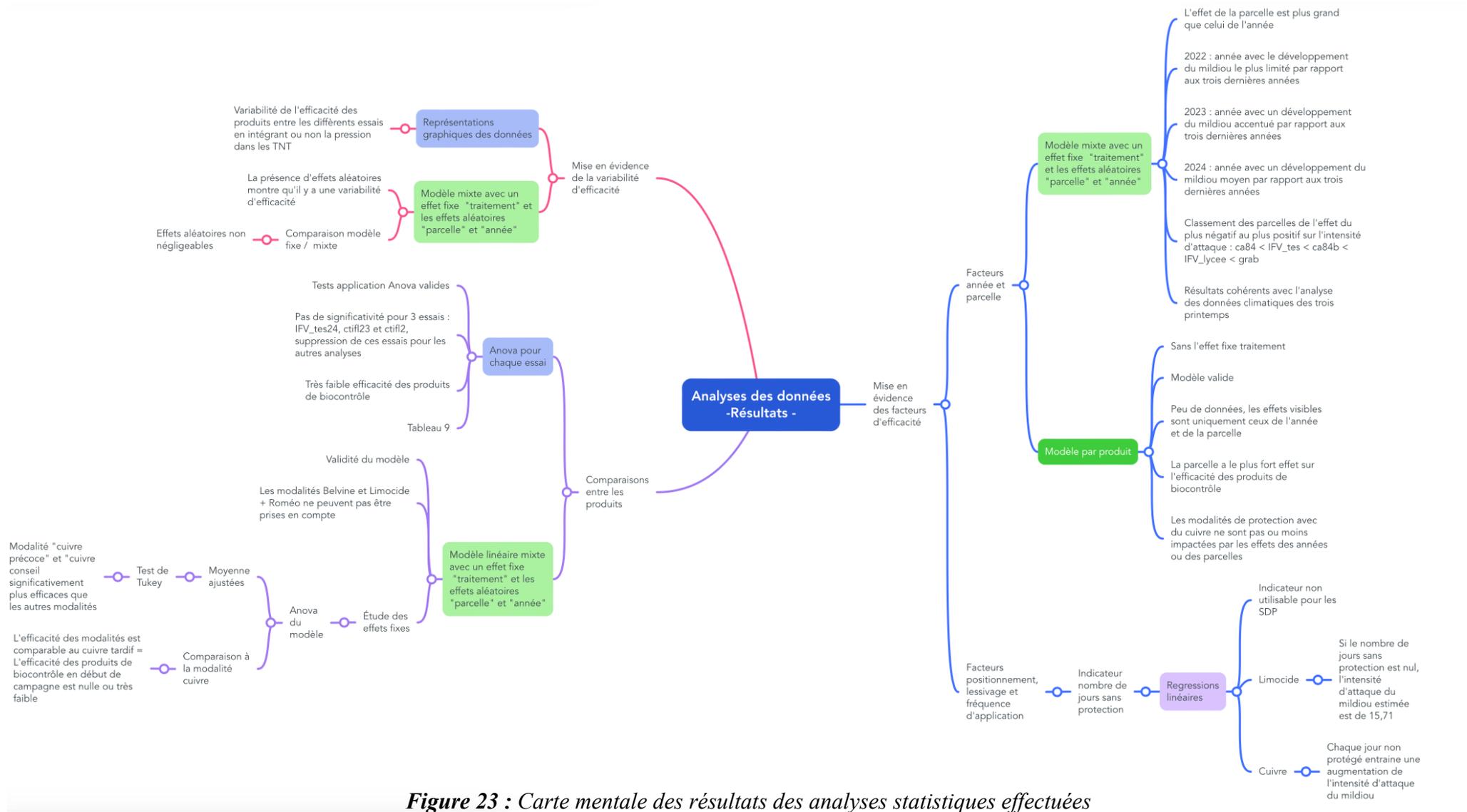


Figure 23 : Carte mentale des résultats des analyses statistiques effectuées

D'autres projets et essais montrent que l'huile essentielle d'orange douce est équivalente au TNT lorsqu'elle est utilisée seule. Alors que dans des essais en association avec des doses réduites de cuivre elle peut entraîner jusqu'à 70% d'efficacité sur les dégâts sur grappes par rapport à cuivre seul équivalent à la référence (Chambre d'agriculture de la Gironde, IFV 2021b). De même, la Cerevisane offre une amélioration de l'efficacité pouvant atteindre 35 % par rapport à l'utilisation de petites doses de cuivre seules, même sous forte pression de mildiou. Cependant, l'état sanitaire, en particulier celui des grappes, n'est pas satisfaisant. La Cerevisane peut être envisagée comme une alternative au cuivre, uniquement lorsqu'elle est associée avec ce dernier (Chambre d'agriculture de la Gironde, IFV 2021b).

Les faibles et variables efficacités de ces produits montrent donc l'importance de la prise en compte des facteurs d'efficacité dans les essais et lors de l'utilisation de ces produits. L'huile essentielle d'orange douce est la solution de biocontrôle la plus fréquemment utilisée en viticulture biologique contre le mildiou (Errecart et al. 2022). Cette substance active a des propriétés antifongiques directes. Ce n'est pas le cas des produits à base de Cerevisane (Roméo) et des autres produits stimulateurs de défenses des plantes, « dont les modes d'action moins connus peuvent rendre plus difficile la maîtrise par les viticulteurs des conditions optimales d'application d'un produit (température, humidité, physiologie de la plante, stade de développement de la maladie...) » (Errecart et al. 2022).

II. Éléments retenus pour améliorer l'expérimentation des produits de biocontrôle

II.1 Facteurs à prendre en compte lors de la réalisation d'essais avec des produits de biocontrôle

Les caractéristiques d'utilisation des produits

Tout d'abord, les caractéristiques d'utilisation des produits sont les éléments les plus importants à prendre en compte lors de la création d'un protocole dans lequel des produits de biocontrôle sont testés. Ces produits présentent une efficacité limitée, souvent montrée dans des conditions spécifiques.

○ Mode d'utilisation

Par exemple, pour les produits testés dans BIOVIMED, l'intérêt de leur utilisation est notable lorsqu'ils sont utilisés en association avec d'autres produits, avec du cuivre par exemple, comme cela est souligné dans les entretiens. Cependant, dans le protocole du projet BIOVIMED les produits de biocontrôle ne sont pas testés en association avec d'autres produits mais en début de campagne avant le début de traitement au cuivre dans le but de retarder l'utilisation du cuivre. Les résultats montrent que les produits de biocontrôle ont une très faible efficacité lorsqu'ils sont utilisés seuls en début de campagne. Seulement la modalité `limocide_romeo` était basée sur l'utilisation de deux produits de biocontrôle en association.

Cette association se basait donc sur des produits avec des modes d'action complémentaire (un SDP avec un produit de contact éradiquant). Les résultats de cette association, ont montré un léger intérêt sur l'efficacité par rapport aux autres modalités. Cette modalité était la plus efficace parmi celle avec de produits de biocontrôle. Cependant, cela est à nuancer car elle était significativement différente des autres modalités dans peu d'essais. L'intérêt de cette association est donc limité. De plus, en raison du coût élevé des produits de biocontrôle, il est plus judicieux de les associer à des produits plus classiques, comme le cuivre, plutôt qu'à d'autres produits de biocontrôle. Ce qui est en accord avec les conseils établis par les firmes sur une utilisation des produits de biocontrôle en association.

Cet élément doit donc être pris en compte lors de l'élaboration de protocole d'essai avec des produits de biocontrôle. En optimisant leur efficacité en suivant un protocole conforme aux recommandations d'utilisation et aux informations déjà connues, il serait possible de les comparer plus efficacement et de les examiner de manière plus approfondie. Le mode d'utilisation du produit doit être évalué globalement. Par exemple pour les SDP, « il faut associer l'utilisation des SDP avec de l'agronomie et de la physiologie pour maximiser leur efficacité. Il vaut mieux évaluer le système de protection globale par rapport à l'évaluation du produit en lui-même (c'est-à-dire seul) » (Entretien réalisé pour le Roméo). Pour assurer une utilisation optimale des produits de biocontrôle, il est essentiel de repenser l'ensemble de l'itinéraire technique ainsi que le système global. Cela a été testé dans le projet « Biocontrôle et Equilibre de l'Ecosystème Vigne (BEE) » (Trouvelot, Burgun 2024). Ce projet avait pour objectif de tester l'intégration de produits de biocontrôle dans une approche système afin de réduire de 75% l'IFT hors biocontrôle. Ce projet a mis en évidence que la reconception du système avec une attention particulière sur l'activation de différents leviers (liés à la gestion du sol ou à la prophylaxie) serait plus efficace dans la régulation des bioagresseurs. Néanmoins, cela est plus difficile à mettre en place et à faire adopter par les viticulteurs par rapport à une « simple » substitution d'un produit phytosanitaire conventionnel par une solution de biocontrôle (Trouvelot, Burgun 2024).

○ Positionnement des traitements

Lors d'essais avec des produits de biocontrôle, plusieurs produits sont testés en même temps sous différentes « modalités ». Le positionnement des traitements est à établir pour chaque produit et non pas de manière générale pour tout l'essai. En effet, chaque produit a son mode d'action, sa sensibilité au lessivage et sa cadence de renouvellement. Le renouvellement des traitements doit être réfléchi et effectué produit par produit afin de maximiser l'efficacité des produits. Cela permettra de réduire le nombre de jours sans protection.

○ Volume de bouillie

La détermination du volume de bouillie optimal à utiliser par hectare est nécessaire pour tous les produits afin que le produit de biocontrôle soit utilisé au mieux. Dans la plupart des cas ce volume est déterminé et connu par les firmes commercialisant le produit. Dans les essais, il est donc nécessaire d'ajuster le volume de bouillie en fonction de chaque produit testé, plutôt que d'utiliser un volume standard pour l'ensemble de l'essai.

○ Qualité de pulvérisation

La qualité de pulvérisation est repérée comme un facteur majeur de l'efficacité des produits, cependant ce n'est pas un facteur étudié à l'échelle de chaque produit. Pour tous les produits, le principal conseil d'utilisation donné par les firmes est d'avoir une « bonne qualité de pulvérisation ». Cela signifie généralement qu'il est nécessaire de recouvrir le maximum d'organes végétatifs lors de l'application du produit mais cela ne met pas en évidence la méthode la plus adaptée à chaque produit ou à chaque mode d'action des produits. Ce facteur serait donc intéressant à prendre en compte et à étudier lors d'essais.

Les travaux conduits à l'UMT-ECOTECH (IFV-INRA-CTIFL) sur Montpellier depuis 2012 ont permis d'avancer de manière significative sur l'étude de la dose reçue par le végétal rapportée à la surface foliaire et sur les indicateurs mobilisables en parallèle pour qualifier la physique de l'application (taux de couverture, nombre d'impacts par unité de surface) et la répartition différentielle des dépôts au sein des organes (distribution produit dessus/dessous des feuilles, ...) (Codis et al. 2023). Des projets sont actuellement en cours sur l'étude de ces paramètres sur l'efficacité de certains produits de biocontrôle.

L'environnement d'utilisation

Ensuite, l'environnement, dans lequel le produit de biocontrôle est appliqué, influe sur l'efficacité des produits.

○ Nutrition hydrominérale de la vigne

Lors d'essais avec des produits de biocontrôle, la nutrition hydrominérale est à surveiller afin qu'elle soit optimale et stable pour ne pas influencer les résultats, notamment pour les SDP (entretien pour le Roméo).

○ Pression sanitaire

La pression sanitaire présente lors de chaque essai influence l'efficacité des produits. En effet, certains sont moins efficaces lors de fortes ou moyennes pressions (Entretien Roméo). Afin de mieux prendre en compte ce facteur lors d'essai, des notations régulières sur les TNT permettraient de voir l'évolution de la pression et d'analyser les résultats d'essais en lien avec cette pression.

II.2 Formalisation d'une base de données avec les caractéristiques de chaque produit

Pour s'adapter au mieux aux effets de l'ensemble de ces facteurs lors de l'utilisation des produits de biocontrôle, il est important de connaître les caractéristiques et les conseils d'utilisation de chaque produit. Afin de recueillir et de diffuser plus facilement les informations des produits, il serait intéressant de résumer l'ensemble des informations connues sur chaque produit dans une base de données générale. La grille d'analyse des entretiens présente en annexe

4 peut servir de support dans l'élaboration d'une base de données recensant les caractéristiques des produits. Chaque colonne correspond à une information sur le produit, cette information est définie dans le glossaire présent en annexe 9.

III. Étude des facteurs d'efficacité des produits de biocontrôle sur un réseau expérimental adapté ou plus large

Pour analyser plus précisément les facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle, il est essentiel de concevoir un protocole spécifique pour examiner chaque facteur individuellement, ou de mettre en place un réseau expérimental suffisamment vaste pour permettre de recroiser et d'analyser statistiquement certains facteurs.

III.1 Création d'un dispositif expérimental adapté

Pour étudier plus en détails les facteurs d'efficacité des produits de biocontrôle avec un protocole adapté au facteur que l'on veut étudier, il est généralement nécessaire d'utiliser des méthodes ou des installations spécifiques. Cela rend la mise en place difficile, souvent coûteuse, et nécessite plusieurs années pour identifier la méthode adéquate et qui fonctionne.

Certains objectifs du projet ABA PIC sont dans cette optique. Des essais ont été mis en place pour trouver des méthodologies à différentes échelles afin de « développer et tester des méthodes d'étude des facteurs qui conditionnent le succès d'utilisation du biocontrôle (facteurs abiotiques, état physiologique des plantes, compatibilité) » (Klervi Crenn et al. 2024). Des essais en conditions contrôlées et semi-contrôlées ont été mis en place afin d'étudier les effets de différents facteurs abiotiques (température, lessivage, UV...) sur l'efficacité des produits de biocontrôle. Les essais dans le cadre de ce projet ont permis de tester les dispositifs, d'adapter leur capacité à reproduire au mieux les facteurs environnementaux et d'acquérir des données sur des produits sélectionnés. Ce projet a eu lieu sur un an, en 2022, les méthodes ont alors pu être validées ou non. Cependant, cela n'a pas abouti à une étude poussée des facteurs. Ce projet a montré qu'une étude détaillée de ces facteurs est possible mais longue à mettre en place pour tous les produits. Dans l'optique de poursuivre cette démarche de nouveaux projets vont émerger.

Un projet porté par l'IFV sur

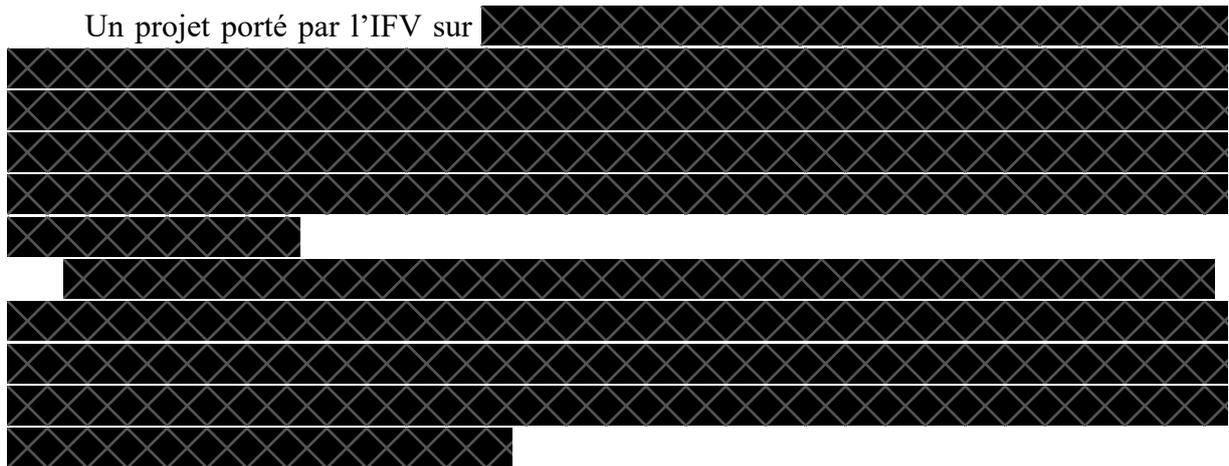
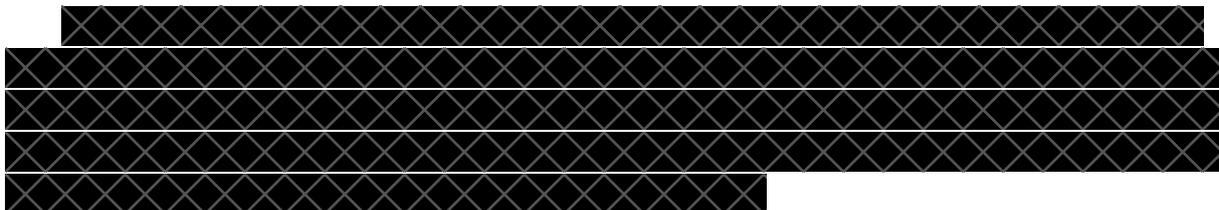
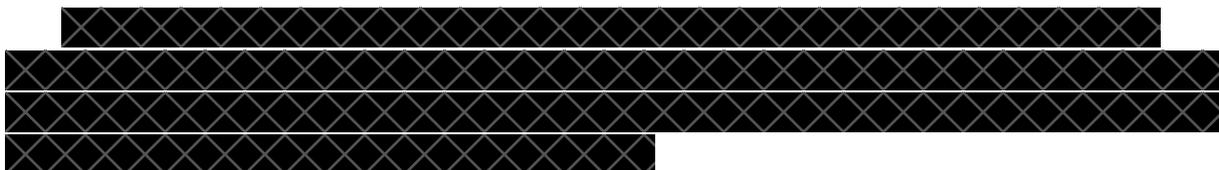




Figure 24 : Liste des éléments à relever lors d'un essai avec un produit de biocontrôle



Utiliser et croiser des essais réalisés à différents niveaux permettra de mieux caractériser les facteurs influençant l'efficacité des produits. Cependant cela nécessite du temps et des dispositifs spécifiques et coûteux.

III.2 La mise en réseau de résultats d'essais

Une étude plus détaillée des facteurs d'efficacité serait également possible en utilisant les résultats de l'ensemble des essais menés sur un produit, que ce soit dans des conditions variées ou similaires, mais avec un même mode d'utilisation (seule ou en association). En effet, la multiplication des expériences en conditions réelles et dans diverses régions permettrait de mieux analyser les facteurs d'efficacité et de faire évoluer l'utilisation de ces produits.

Cela permettrait de recueillir une grande diversité de caractéristiques d'essai, avec la possibilité que certaines caractéristiques communes permettent d'obtenir des répétitions entre les essais, dans le but d'étudier statistiquement des potentiels facteurs d'efficacité. Pour arriver à cela, il est intéressant d'établir une liste minimale d'indicateurs, de caractéristiques, de résultats à recueillir lors des essais des produits, dans l'optique de mutualiser les résultats provenant de différents essais et d'en faciliter l'interprétation. Une liste de ce type a été réalisée (Figure 24) à partir de tous les constats réalisés précédemment. Le recueil de tous ces éléments lors de la réalisation d'essais permettrait d'étudier un maximum de facteurs potentiels d'efficacité. La méthodologie statistique d'analyse de résultats mise en place dans ce mémoire pourrait être utilisée. En effet, elle serait plus adaptée à l'étude de potentiels facteurs d'efficacité avec les résultats d'un réseau de plus grande taille. De nouveaux effets aléatoires pourraient être testés et intégrés au modèle linéaire mixte.

Une méthodologie plus complète, incluant des bases de données communes et plus détaillées pour les résultats des essais, pourrait enrichir la connaissance de chaque produit dans diverses conditions d'utilisation. Cela reviendrait à travailler en réseau avec une base de données unique à remplir après chaque essai de biocontrôle réalisé. Lamichhane et al. (2016) soulignent l'importance de la mise en réseau lors des essais, car cela augmente la quantité de données disponibles pour un produit et diversifie les conditions et les paramètres d'utilisation.

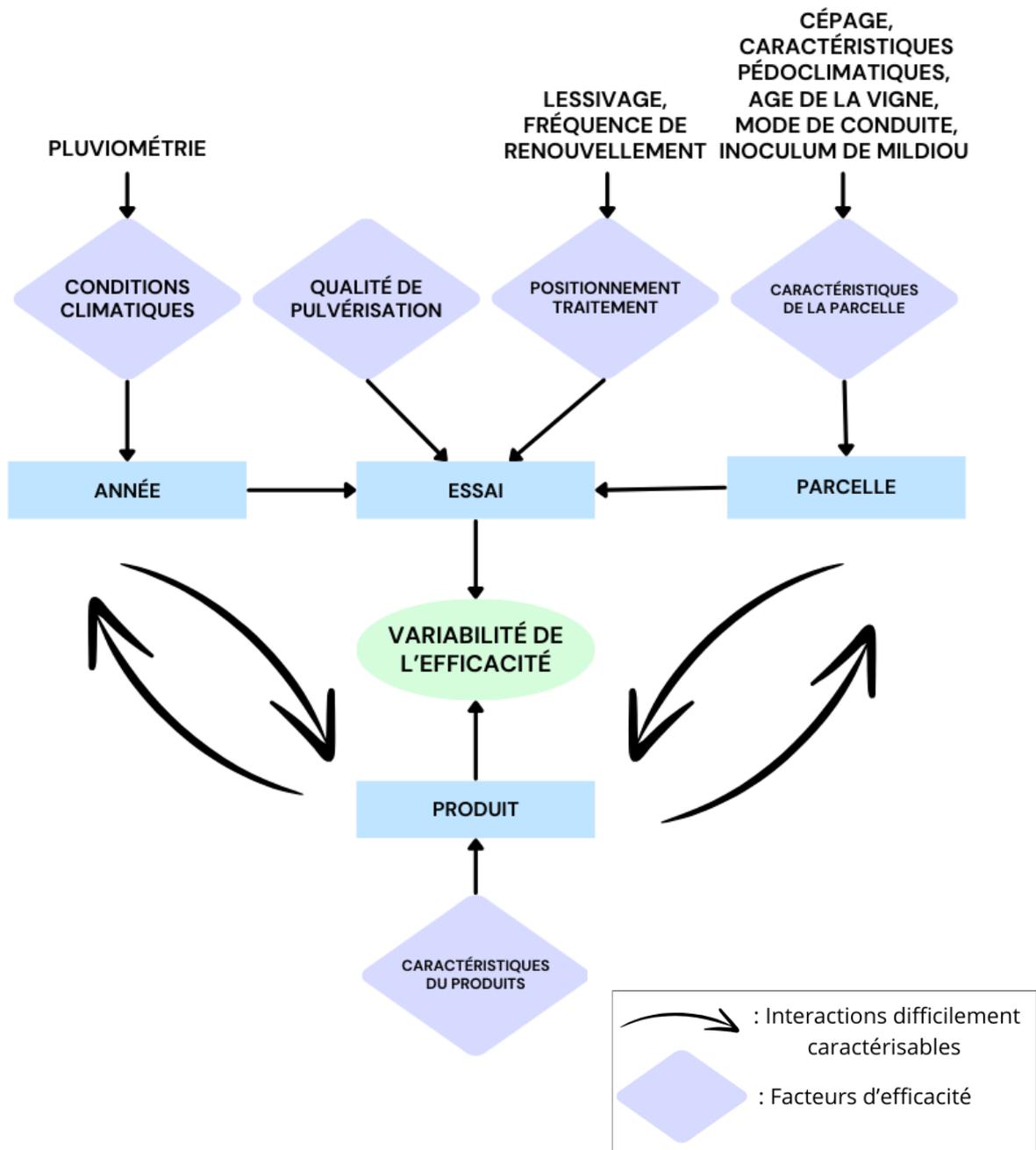


Figure 25 : Schéma bilan des principaux facteurs d'efficacité repérés dans cette étude

Conclusion

La détermination et l'explication des facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle sur le terrain est complexe. D'un site expérimental à un autre, d'une année sur l'autre et donc d'un essai à un autre l'efficacité d'un produit de biocontrôle varie par l'intermédiaire des caractéristiques de chaque essai et en interaction avec les spécificités du produit. Lors de l'utilisation de produit de biocontrôle, les interactions influençant l'efficacité des produits sont difficilement caractérisables et le manque d'informations disponibles sur ces produits entraînent, dans la plupart des cas, des résultats décevants et limités lors d'essais sur le terrain. Ce qui freine la diffusion des solutions à base de produits de biocontrôle.

Les résultats obtenus par le réseau expérimental des essais BIOVIMED sur le mildiou confirment la variabilité de l'efficacité des produits de biocontrôle entre les essais. Cette variabilité peut être expliquée principalement par l'effet lié aux caractéristiques propres à chaque parcelle (les caractéristiques pédoclimatiques, le cépage, l'âge de la vigne, le mode de conduite, l'inoculum de mildiou présent et la sensibilité au mildiou mais également l'influence de l'expérimentateur et la qualité de pulvérisation) et aussi par l'effet de l'année qui intègre les conditions météorologiques (Figure 25). L'efficacité est également influencée par les caractéristiques propres à chaque produit.

Pour s'adapter au mieux à ces effets, lors de l'utilisation de ces produits, il est important de connaître les caractéristiques et les conseils d'utilisation de chaque produit. La création d'une base de données générale avec l'ensemble de ces éléments est nécessaire pour recueillir et diffuser plus facilement les informations des produits.

À partir des éléments recueillis sur les produits testés, la qualité de pulvérisation, le positionnement des traitements et les lessivages ressortent comme les facteurs influençant le plus l'efficacité des produits testés. Les lessivages, la fréquence de renouvellement et le positionnement des traitements peuvent être intégrés dans un indicateur propre à chaque combinaison d'essai et de produit. Cet indicateur a montré, qu'avec une stratégie de protection avec du cuivre, chaque jour non protégé entraîné une augmentation de l'intensité d'attaque du mildiou.

Le manque de données sur les facteurs d'efficacité limite la compréhension de leur impact potentiel sur les résultats. Ces éléments, bien qu'ils soient repérés comme influents, nécessiteraient une attention accrue dans de futures études pour affiner les recommandations de traitement.

Pour analyser plus précisément les facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle, il est possible de concevoir un protocole spécifique pour examiner chaque facteur individuellement ou de mettre en place un réseau de mise en commun de résultats d'essais suffisamment vaste pour permettre de recroiser et d'analyser statistiquement certains facteurs. Ainsi ces perspectives sont à prendre en compte dans l'élaboration de futurs essais sur les produits de biocontrôle.

Références bibliographiques :

ADAMA, 2023. Le mildiou de la vigne - ADAMA France sas. [en ligne]. 24 mars 2023. [Consulté le 23 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.adama.com/france/fr/agronomie/le-mildiou-de-la-vigne-plasmopara-viticola>

ANGELOVA, M., ASENOVA, Svetla, NEDKOVA, V. et KOLEVA-KOLAROVA, Rositsa, 2011. Copper in the human organism. *Trakia J Sci*. 1 janvier 2011. Vol. 9, pp. 88-98.

ARENA, Maria, AUTERI, Domenica, BARMAZ, Stefania, BRANCATO, Alba, BROCCA, Daniela, BURA, László, CARRASCO CABRERA, Luis, CHIUSOLO, Arianna, CIVITELLA, Consuelo, COURT MARQUES, Daniele, CRIVELLENTI, Federica, CTVÉRACKOVA, Lucie, LENTDECKER, Chloe, EGSMOSE, Mark, ERDOS, Zoltan, FAIT, Gabriella, FERREIRA, Lucien, GRECO, Luna, IPPOLITO, Alessio et VILLAMAR BOUZA, Laura, 2018. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance ABE-IT 56 (components of lysate of *Saccharomyces cerevisiae* strain DDSF623). *EFSA Journal*. 1 septembre 2018. Vol. 16. DOI 10.2903/j.efsa.2018.5400.

AVELINE, Nicolas, BECQUET, Stéphane, CAYLA, Laure, DUPIN, Séverine et GUÉGNIARD, S, 2022. *Mémo cuivre en viticulture* [en ligne]. 2022. Disponible à l'adresse : https://www.vinopole.com/wp-content/uploads/2022/07/memo_cuivre_display_vinopole.pdf

AVELINE, Nicolas, DUPIN, Séverine, BECQUET, Stéphane et CAYLA, Laure, 2022. *Les itinéraires ; Les références techniques de l'IFV. Le biocontrôle en viticulture*. [en ligne]. 2022. Disponible à l'adresse : https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2022/11/itineraires_web.pdf

BARBIER, Jean-Marc, CONSTANT, Nicolas, DAVIDOU, Ludivine, DELIERE, Laurent, GUISSSET, Marc, OLIVIER JACQUET, DAVID LAFOND, MARIE-LAURE PANON et DIDIER SAUVAGE, 2011. *CEPVITI Co-conception de systèmes viticoles économes en produits phytosanitaires Guide méthodologique* [en ligne]. 2011. Disponible à l'adresse : https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2019/03/Guide_Methodologiq_CEPViti2011.pdf

BASF, 2024a. Résistance aux produits phytosanitaires : qu'est-ce qu'un mo. [en ligne]. 2024. [Consulté le 29 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.agro.basf.fr/fr/produits/prevention_des_resistances_aux_produits/qu_est_ce_qu_un_mode_d_action/

BASF, 2024b. Biologie du mildiou – Maladies de la vigne. [en ligne]. 2024. [Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/vigne/maladies_de_la_vigne/mildiou_de_la_vigne/biologie_du_mildiou_de_la_vigne.html

BLANCARD, D, 2018. Vigne - Principaux symptômes. [en ligne]. 2018. [Consulté le 23 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <http://ephytia.inra.fr/fr/C/6966/Vigne-Principaux-symptomes>

BLANCARD, D, 2021. Vigne - Biologie, épidémiologie. [en ligne]. 2021.

[Consulté le 23 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <http://ephytia.inra.fr/fr/C/6967/Vigne-Biologie-epidemiologie>

CAB PAYS DE LA LOIRE, 2016. *Cahier technique BIO Mildiou de la vigne - 14 règles d'or* [en ligne]. 2016. Disponible à l'adresse : http://www.produire-bio.fr/wp-content/uploads/2017/10/Cahier-technique-Mildiou_web.pdf

CAUBEL, J., LAUNAY, M., LANNOU, C. et BRISSON, N., 2012. Generic response functions to simulate climate-based processes in models for the development of airborne fungal crop pathogens. *Ecological Modelling*. 10 septembre 2012. Vol. 242, pp. 92-104. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2012.05.012.

CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA GIRONDE et IFV, 2021a. UV-C | Ecophytopic. [en ligne]. 2021. [Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/cuivre-viticulture/protoger/uv-c>

CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA GIRONDE et IFV, 2021b. Huile essentielle d'Orange Douce | Ecophytopic. [en ligne]. 2021. [Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/cuivre-viticulture/protoger/huile-essentielle-dorange-douce>

CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA GIRONDE et IFV, 2022. Cerevisane® | Ecophytopic. [en ligne]. 2022. [Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/cuivre-viticulture/protoger/cerevisaner>

CODIS, Sébastien, CHERAÏËT, Anice, DELPUECH, Xavier, CARRA, Mathilde, RIBEYROLLES, Xavier, TRINQUIER, Elodie, VERGES, Adrien, NAUD, Olivier, VIN, Institut Français de la Vigne et du, DEMAIN, Technologies et Méthodes pour les Agricultures de, INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE POUR L'AGRICULTURE, l'Alimentation et l'Environnement-Institut Agro Montpellier, INSTITUT NATIONAL D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR POUR L'AGRICULTURE, l'alimentation et l'environnement-Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture et CONVERGENCE #DIGITAG, -ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire- OFB dans le cadre du plan Ecophyto- l'Institut de, 2023. Experimental modeling of phytosanitary treatment deposits as a function of plant architecture in viticulture. Applications to dose expression and precision spraying | TechnodoseViti : Modélisation expérimentale pour la prédiction des dépôts de produits phytosanitaires au sein du couvert végétal en viticulture. Application à l'expression des doses et à la viticulture de précision. [en ligne]. 2023. [Consulté le 26 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/6582ebcdde2dcdb4f674e13c>

COEN, Aurélie, 2023. [Webinaire ABA PIC] Optimiser l'application des traitements de biocontrôle. *acta* [en ligne]. 16 février 2023. [Consulté le 28 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.acta.asso.fr/webinaire-aba-pic-optimiser-lapplication-des-traitements-de-biocontrole/>

DESAIN, Henri, AOUN, Nathalie, DESLANDES, Laurent, VAILLEAU, Fabienne, ROUX, Fabrice et BERTHOMÉ, Richard, 2021. Fight hard or die trying: when plants face pathogens under heat stress. *New Phytologist*. 2021. Vol. 229, n° 2, pp. 712-734. DOI 10.1111/nph.16965.

DUBOS, Bernadette, 2002. *Maladies cryptogamiques de la vigne ; Champignons parasites des organes herbacés et du bois de la vigne*. Féret.

ECOPHYTO PIC, 2019. Centre de ressources Cuivre. [en ligne]. 2019. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/cuivre-viticulture/centre-de-ressources-cuivre>

EFSA, European Food Safety, ARENA, Maria, AUTERI, Domenica, BARMAZ, Stefania, BELLISAI, Giulia, BRANCATO, Alba, BROCCA, Daniela, BURA, Laszlo, BYERS, Harry, CHIUSOLO, Arianna, COURT MARQUES, Daniele, CRIVELLENTI, Federica, DE LENTDECKER, Chloe, EGSMOSE, Mark, ERDOS, Zoltan, FAIT, Gabriella, FERREIRA, Lucien, GOUMENOU, Marina, GRECO, Luna, IPPOLITO, Alessio, ISTACE, Frederique, JARRAH, Samira, KARDASSI, Dimitra, LEUSCHNER, Renata, LYTHGO, Christopher, MAGRANS, Jose Oriol, MEDINA, Paula, MIRON, Ileana, MOLNAR, Tunde, NOUGADERE, Alexandre, PADOVANI, Laura, PARRA MORTE, Juan Manuel, PEDERSEN, Ragnor, REICH, Hermine, SACCHI, Angela, SANTOS, Miguel, SERAFIMOVA, Rositsa, SHARP, Rachel, STANEK, Alois, STREISSL, Franz, STURMA, Juergen, SZENTES, Csaba, TARAZONA, Jose, TERRON, Andrea, THEOBALD, Anne, VAGENENDE, Benedicte, VERANI, Alessia et VILLAMAR-BOUZA, Laura, 2018. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance copper compounds copper(I), copper(II) variants namely copper hydroxide, copper oxychloride, tribasic copper sulfate, copper(I) oxide, Bordeaux mixture. *EFSA Journal*. 2018. Vol. 16, n° 1, pp. e05152. DOI 10.2903/j.efsa.2018.5152.

EPICURE IFV, 2024. EPicure 2. [en ligne]. 2024. [Consulté le 3 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.vignevin-epicure.com/>

ERRECART, Camille, MATRAY, Bertille, CONSTANT, Nicolas, DUPIN, Séverine et SERÉE, Et Lola, 2022. Accompagner pour réduire le cuivre en viticulture. . 2022.

FEDELE, Giorgia, BRISCHETTO, Chiara et ROSSI, Vittorio, 2020. Biocontrol of Botrytis cinerea on Grape Berries as Influenced by Temperature and Humidity. *Frontiers in Plant Science* [en ligne]. a 2020. Vol. 11. [Consulté le 16 avril 2024]. DOI 10.3389/fpls.2020.01232. Disponible à l'adresse : <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.01232/full>

FERNANDES DE OLIVEIRA, Ana, SERRA, LIGIOS, SATTA et NIELDDU, 2021. Horticulturae | Free Full-Text | Assessing the Effects of Vineyard Soil Management on Downy and Powdery Mildew Development. [en ligne]. 2021. [Consulté le 2 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/2311-7524/7/8/209>

IFV, 2023. *Liste des produits de biocontrôle homologués en viticulture (mars 2023)* [en ligne]. 2023. Disponible à l'adresse : https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2023/04/fiche_biocontrole_vigne_mars_2023v2.pdf

IFV, INRAE, ANSES-CASPER, CIVC, CHAMBRES D'AGRICULTURE et DGAL-SDSPV, 2024. *NOTE TECHNIQUE COMMUNE RESISTANCES 2024 MALADIES DE LA VIGNE : MILDIOU, OÏDIUM, POURRITURE GRISE, BLACK-ROT* [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2024/01/Note-technique-commune-vigne-2024-VDef.pdf>

JACQUENS, Lucile, TROUVELOT, Sophie, LEMAITRE-GUILLIER, Christelle, KRZYZANIAK, Yuko, CLÉMENT, Gilles, CITERNE, Sylvie, MOUILLE, Grégory, MOREAU, Estelle, HÉLOIR, Marie-Claire et ADRIAN, Marielle, 2022. Biostimulation can prime elicitor induced resistance of grapevine leaves to downy mildew. *Frontiers in Plant*

Science. 9 novembre 2022. Vol. 13, pp. article 998273. DOI 10.3389/fpls.2022.998273.

KLERVI CRENN, PAULINE DEWAEGENEIRE, NICOLAS FORMEZ, CAROLINE GOUTTESOULARD, ÉMILIE HASCOET, MATHILDE MERRER et MARIE TURNER, 2024. Impact des facteurs abiotiques sur l'efficacité du biocontrôle dans le cadre du projet ABA PIC. *Phytoma*. mars 2024. Vol. 772.

LAMICHHANE, Jay Ram, AUBERTOT, Jean-Noël, BEGG, Graham, BIRCH, Andrew Nicholas E., BOONEKAMP, Piet, DACHBRODT-SAAAYDEH, Silke, HANSEN, Jens Grønbech, HOVMØLLER, Mogens Støvring, JENSEN, Jens Erik, JØRGENSEN, Lise Nistrup, KISS, Jozsef, KUDSK, Per, MOONEN, Anna-Camilla, RASPLUS, Jean-Yves, SATTIN, Maurizio, STREITO, Jean-Claude et MESSÉAN, Antoine, 2016. Networking of integrated pest management: A powerful approach to address common challenges in agriculture. *Crop Protection*. 1 novembre 2016. Vol. 89, pp. 139-151. DOI 10.1016/j.cropro.2016.07.011.

LAURENT, Anabelle, 2020. On-Farm Trials Reveal Significant but Uncertain Control of *Botrytis cinerea* by *Aureobasidium pullulans* and Potassium Bicarbonate in Organic Grapevines-Chapter 5-p119-150. [en ligne]. 2020. [Consulté le 3 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2021.620786/full>

LEGIFRANCE, 2021. Article L253-6 - Code rural et de la pêche maritime - Légifrance. [en ligne]. 2021. [Consulté le 7 avril 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042911985

MAKOWSKI, David, PIRAUX, François et BRUN, François, 2019. *From Experimental Network to Meta-analysis: Methods and Applications with R for Agronomic and Environmental Sciences* | SpringerLink [en ligne]. Quae. Disponible à l'adresse : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-024-1696-1>

MAROLLEAU, Brice, STAUB, Johan, BARRIÈRE, Quentin et BRISSET, Marie-Noelle, 2013. La qPFD, un outil de criblage des SDP alias stimulateurs de défense des plantes. [en ligne]. 2013. [Consulté le 21 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/257606312_La_qPFD_un_outil_de_criblage_des_SDP_alias_stimulateurs_de_defense_des_plantes

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2024. Plan d'action stratégique pour l'anticipation du potentiel retrait européen des substances actives et le développement de techniques alternatives pour la protection des cultures (PARSADA). *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. 2024. [Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/plan-daction-strategique-pour-lanticipation-du-potentiel-retrait-europeen-des-substances-actives-et>

MINITAB, 2024. What are factors, crossed factors, and nested factors? [en ligne]. 2024. [Consulté le 5 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/supporting-topics/anova-models/what-are-crossed-and-nested-factors/>

OFAG, Office fédéral de l'agriculture, 2022. Protection intégrée des cultures. [en ligne]. 2022. [Consulté le 2 août 2024]. Disponible à l'adresse :

<https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/integrierterpflanzenschutz.html>

OLIVIER YOBREGAT, 2024. Les variétés résistantes. *IFV Occitanie* [en ligne]. 2024. [Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/les-varietes-resistantes/>

ORGANISATION EUROPE'ENNE ET ME'DITERRANE'ENNE POUR LA PROTECTION DES PLANTES, 2020. *General principles for efficacy evaluation of plant protection products with a mode of action as plant defence inducers* [en ligne]. 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://pp1.eppo.int/standards/PP1-319-1-en.pdf&ved=2ahUKEWj1kN6FqM6FAxWHT6QEhcDFA7kQFnoECA4QAQ&usg=AOvVaw0SmwZpDx0CZh8UXvldsWTu>

PASQUIER, David et PERRIOT, Benjamin, 2024. Des conditions de pulvérisation spécifiques à chaque substance. *Phytoma*. 2024. N° 772.

PERTOT, I., CAFFI, T., ROSSI, V., MUGNAI, L., HOFFMANN, C., GRANDO, M. S., GARY, C., LAFOND, D., DUSO, C., THIERY, D., MAZZONI, V. et 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*. 1 juillet 2017. Vol. 97, pp. 70-84. DOI 10.1016/j.cropro.2016.11.025.

PIERMANN, Luana, FUJINAWA, Miriam, PONTES, Nadson, GALVÃO, José et BETTIOL, Wagner, 2023. Inhibition of mycelial growth, conidial germination, and *Botrytis cinerea* Pers.: Fr colonization in begonia with biocompatible products. *Scientia Agricola*. 1 janvier 2023. Vol. 80. DOI 10.1590/1678-992x-2021-0062.

PRESSECQ, Thomas, 2023. *Développement d'outil d'aide à la décision pour favoriser l'usage du biocontrôle microbien* [en ligne]. phdthesis. Université d'Avignon. [Consulté le 30 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-04563686>

SALAUN, Paul-Armel, 2021. *La lutte contre le mildiou en viticulture bio* [en ligne]. 2021. Disponible à l'adresse : <http://www.bionouvelleaquitaine.com/wp-content/uploads/2021/01/Lutte-contre-le-MildiouMAIL.pdf>

SIMONOVICI, Maxime, 2021. Hausse Des Traitements Fongicides En Viticulture Entre 2010 Et 2016 : Une Évaluation De L'Impact Des Différentes Pratiques Culturelles. . 2021.

STEF, Christelle, 2024. 4 usages phytos menacés en vigne par les futurs retraits. *Vitisphere* [en ligne]. 16 mars 2024. [Consulté le 28 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.vitisphere.com//actualite-101503-4-usages-phytos-menaces-en-vigne-par-les-futurs-retraits.html>

STEFANIAK, Nicolas, 2018. Formation SFP 2018 : les modèles linéaires mixtes. [en ligne]. 2018. [Consulté le 5 août 2024]. Disponible à l'adresse : https://regnault.perso.math.cnrs.fr/R_tuto/Intro_modeles_lineaires_mixtes.html

STENBERG, Johan, 2021. When is it biological control? A framework of definitions, mechanisms, and classifications | Journal of Pest Science. *Journal of Pest Science* [en ligne]. 2021. [Consulté le 14 mai 2024]. Disponible à l'adresse :

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10340-021-01354-7>

SYNGENTA, 2019. Mildiou de la vigne, le rôle prépondérant du climat. *Syngenta France* [en ligne]. 11 février 2019. [Consulté le 23 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.syngenta.fr/cultures/vigne/article-fongicide/mildiou-de-la-vigne-role-preponderant-du-climat>

SYNGENTA, 2023. Taegro, 3 modes d'action pour protéger la vigne. *Syngenta France* [en ligne]. 2023. [Consulté le 3 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.syngenta.fr/biocontrôle/vigne/article/taegro-mode-d-action>

TROUVELOT, Sophie, AVELINE, Nicolas, BIDAUT, Florent, BOURQUE, Stephane, DUPIN, Séverine, POINSSOT, Benoît et DAIRE, Xavier, 2021. Stimuler l'immunité de la vigne : un levier pour réduire les traitements fongicides ? *La revue des œnologues et des techniques vitivinicoles et œnologiques*. 2021. N° 181, pp. 14.

TROUVELOT, Sophie et BURGUN, Xavier, 2024. Les solutions de biocontrôle dans les agrosystèmes viticoles, des innovations diffusables à grande échelle ? *Innovations Agronomiques*. 2024. Vol. 91, pp. 28. DOI 10.17180/ciag-2024-vol91-art03.

VALDÉS-GÓMEZ, Héctor, FERMAUD, Marc, ROUDET, Jean, CALONNEC, Agnès et GARY, Christian, 2008. Grey mould incidence is reduced on grapevines with lower vegetative and reproductive growth. *Crop Protection*. 1 août 2008. Vol. 27, n° 8, pp. 1174-1186. DOI 10.1016/j.cropro.2008.02.003.

VINOPOLE, 2023. Oïdium | Wiki Biocontrôle en Viticulture. [en ligne]. 2023. [Consulté le 23 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.vinopole.com/docs/oidium-erisiphe-necator>

VINOPOLE, 2024a. Pourriture grise | Wiki Biocontrôle en Viticulture. [en ligne]. 2024. [Consulté le 21 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.vinopole.com/docs/pourriture-grise-botrytis-cinerea/>

VINOPOLE, 2024b. Mildiou | Wiki Biocontrôle en Viticulture. [en ligne]. 2024. [Consulté le 23 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.vinopole.com/docs/mildiou/>

Viti-Tunnel, 2024. *Viti-Tunnel* [en ligne]. [Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://viti-tunnel.com/>

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle

Annexe 2 : Tableau récapitulatif des références bibliographiques citées dans l'annexe précédente

Annexe 3 : Exemple du guide d'entretien utilisé pour le Roméo

Annexe 4 : Grille d'analyse des entretiens

Annexe 5 : Script R de l'analyse par essai

Annexe 6 : Script R de la visualisation globale des données

Annexe 7 : Script R analyse des facteurs « traitement », « année » et « parcelle »

Annexe 8 : Script R de l'indicateur « Nombre de jours sans protection »

Annexe 9 : Glossaire de la base de données des caractéristiques des produits

ANNEXES

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle

Groupe de facteurs	Facteurs	Sous facteurs	Description	Impacts	Variable associée/méthode de mesure	Accessibilité de prise en compte	Références bibliographiques en viticulture	Références bibliographiques autres cultures
Caractéristiques de la vigne	Age de la vigne		Nombre d'années écoulées depuis la plantation de la vigne		Age	Facteur non modifiable		
	Stade phénologique		Stade de développement au cours de son cycle de croissance		Stade BBCH	Facteur non modifiable	(Pertot et al. 2017)	
	Age des feuilles		Durée écoulée depuis l'apparition des feuilles sur la vigne.	Les feuilles plus âgées sont plus résistantes aux maladies	Observation visuelle	Facteur non modifiable	(Colonnec et al. 2021)(Colonnec et al. 2018)	
	Densité de la canopée		Quantité de feuilles par plant			Facteur modifiable		(Van Eeden 2013)
	Cépages/varétés		Variété de vignes cultivées	Grande variabilité de réponse et du degré d'attaque à la suite de l'application	Nom du cépage	Facteur non modifiable	(Klervi Crenn et al. 2024)(Bunea et al. 2013)(Rezgui 2016)	(Biondi et al. 2021) (Pressecq 2023)
	Stress de la plante						(Desaint et al. 2021)	(Van Eeden 2013)
Mode de conduite	Fertilisation		Apport de nutriment pour favoriser la croissance de la plante	Une concentration élevée en azote des feuilles réduit l'efficacité des produits	Observation à l'aide du logiciel Assess 2 (APS Press, St Paul Minnesota, USA)	Facteur modifiable		(Bulletin OEPP/EPPO 2020)(Van Eeden 2013) (Nicot et al 2013)
	Gestion du sol		Pratiques utilisées pour maintenir la productivité d'un sol	Les couverts végétaux contribuent à obtenir un meilleur équilibre de croissance de la surface foliaire et un microclimat moins favorable aux maladies fongiques	Observation visuelle des symptômes, mesures de biomasses et de densité du couvert, mesure de l'azote foliaire, mesure de l'interception lumineuse	Facteur modifiable	(Fernandes de Oliveira et al. 2021)	
	Irrigation		Apport d'eau à la culture			Facteur modifiable		
	Mode de taille		Technique de taille			Facteur modifiable		
Conditions pédoclimatiques et météorologiques	Température		Mesure de l'agitation des particules dans l'air	L'efficacité des agents de biocontrôle est réduite en fonction des températures. Certains peuvent être plus sensibles à certain niveau de température que d'autres.	Les baies de raisin traitées avec les différents BCA et incubées dans les différentes conditions environnementales (Fedele, Brischetto, et Rossi 2020)	Facteur non modifiable	(Klervi Crenn et al. 2024)(Fedele et al 2020)(Desaint et al. 2021)(Fernandes de Oliveira et al. 2021)	(Pressecq 2023) (Bulletin OEPP/EPPO 2020)
	Hygrométrie		Humidité de l'air	Le pourcentage d'humidité relative va impacter l'efficacité des agents de biocontrôle. La sensibilité varie en fonction des agents de biocontrôle.	Relevé d'une station météorologique et mesuré en %	Facteur non modifiable	(Klervi Crenn et al. 2024)(Fedele et al. 2020)(Fernandes de Oliveira et al. 2021)	(Pressecq 2023)(Bulletin OEPP/EPPO 2020)
	pH		Indication de l'acidité ou de la basicité du sol	Les différents agents de biocontrôle présente une sensibilité variables faces aux variations de pH de la surface de la feuille ou du sol.		Facteur peu modifiable		(Pressecq 2023)(Bulletin OEPP/EPPO 2020)
	Structure du sol		Mode d'arrangement spatial des particules minérales et organiques d'un sol			Facteur non modifiable		(Bulletin OEPP/EPPO 2020)
	Altitude		Hauteur verticale mesurée par rapport au niveau de la mer			Facteur non modifiable		
	Rayonnement solaire/UV		Ondes émises par le soleil	Le rayonnement peut diminuer la viabilité et l'efficacité des agents de biocontrôle.	Utilisation d'un ceptomètre pour représenter le rayonnement photosynthétiquement actif en %	Facteur non modifiable	(Klervi Crenn et al. 2024)(Fernandes de Oliveira et al. 2021)	(Pressecq 2023)
	Méthode d'innoculation		Introduction d'un agent de biocontrôle			Facteur modifiable	(Compant et al. 2013)	

Agents de biocontrôle	Mode d'action	Mécanismes naturels pour contrôler les populations de ravageurs et de pathogène	Les agents de biocontrôle présentent des modes d'actions diversifiés (compétition, stimulation des défenses naturelles, antibiose,...). Pour lutter contre les agents pathogène varie en fonction modes d'action de l'agent de biocontrôle choisi.		Facteur non modifiable	(Dufour et al. 2009)(Pasquier et Perriot 2024)	
	Dose	Quantité de produit appliqué par unité de surface	La dose de produit utilisé est directement lié à l'efficacité et la viabilité de l'agent de biocontrôle.	Volume/ha	Facteur modifiable		(Bulletin OEPP/EPPO 2020)(Da Cunha Sant'ana 2023)(Mantecon 2008)
	Fréquence d'application	Intervalle auxquels les traitements sont effectués	Le nombre et l'intervalle des applications doivent être conforme aux consignes d'utilisations du produit. La fréquence peut prendre en compte le délai de réponse de la plante, l'état physiologique de la culture et la persistance de l'action du produit	Nombre de jours entre chaque traitements	Facteur modifiable		(Bulletin OEPP/EPPO 2020)(Van Eeden 2013)
	Adjuvants	Préparation ajoutée en mélange au produit phytopharmaceutique pour renforcer leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques	Les adjuvants permettent aux agents de biocontrôle d'améliorer leur stabilité, leur pulvérisation, leur protection contre les conditions environnementales défavorables (températures, humidité, rayons UV) et leur activité.	Comparaison avec des formulations témoins sans adjuvants	Facteur modifiable		(Matzen et al. 2019) (Van Eeden 2013) (Leggett et al 2011)
	Compatibilité avec d'autres produits	Capacité d'un produit à être mélangé avec d'autre produits	La suppression du pathogène par l'agent de biocontrôle peut varier dans un environnement riche tels que le compost ou l'utilisation intensive de pesticides.		Facteur modifiable	(Compant et al. 2013)	(Bulletin OEPP/EPPO 2020)
	Association avec biostimulant	Utilisation en combinaison d'un produit de biocontrôle avec un biostimulant	L'utilisation d'un biostimulant avec un SDP augmenterait l'efficacité du SDP		Facteur modifiable	(Jacquens et al. 2022)	
	Niveau de pression sanitaire	Niveau de présence de l'agent pathogène	Les agents de biocontrôle vivant ou inorganique sont en générale moins efficace sous une pression maladie élevée.	Pourcentage de grappe représentant des symptômes	Facteur peu modifiable	(Laurent 2020) (Compant et al. 2013)	(Pressecq 2023)
	Lessivage	Substances solubles présentes sur les feuilles éliminée par l'eau			Facteur peu modifiable	(Klervi Crenn et al. 2024)	
	Persistance	Longévité du produit			Facteur non modifiable		
		Versement	Moment où le produit est versé dans la cuve			Facteur modifiable	
	Mélange dans la cuve	Mélange de la bouillie			Facteur modifiable		
	Moment d'application	Moment choisi pour appliquer un traitement	Le choix d'une application préventive ou curative va influencer l'efficacité des agents de biocontrôle face aux pathogènes.	Recommandation du fabricant	Facteur modifiable	(Laurent 2020)(Pertot et al. 2017)	(Punja et al. 2019)(Piermann et al. 2023)(Pressecq 2023)(Bulletin OEPP/EPPO 2020)(Fiamingo et al. 2007)(Matzen et al. 2019)

Pulvérisation	Préparation et application	Heure d'application	Horaire à laquelle le traitement est réalisé			Facteur modifiable		
		Dépôt de pulvérisation	Quantité du produit déposée sur la surface de la culture.	Le dépôt varie en fonction du type de pulvérisation et de la surface foliaire de la culture.		Facteur modifiable	(Zewdie et 2024)	
		Couverture de pulvérisation	Proportion de la surface de la culture qui est couverte par le produit			Facteur modifiable	(Zewdie et 2024)	
	Volume bouillie		Quantité d'eau utilisée pour diluer le produit			Facteur modifiable	(Bulletin OEPP/EPPO 2020)(Pasquier et Perriot 2024)	
	Tailles des gouttes		Diamètre de la goutte du produit pulvérisé	La taille des gouttes est lié à la quantité de dépôt sur la plante, ce qui influence directe sur l'efficacité du produit. Petite goutte sensible à la dérive et grosse goutte difficulté à traverser le feuille.	Diamètre de gouttes	Facteur modifiable	(Zewdie et 2024)(De Cock 2017)	
	Pression		Force exécutée sur la bouillie à l'intérieur du système de pulvérisation			Facteur modifiable	(Bulletin OEPP/EPPO 2020)	
	Vitesse d'avancement		Vitesse à laquelle le tracteur/pulvérisateur avance	La vitesse d'avancement joue sur le volume de produit appliqué.	km/h	Facteur modifiable	(De Cock 2017)	
	Typologie des pulvérisateurs	Face par face	Pulvérisateur à 4 descentes qui traite toutes les faces de la végétation				Facteur modifiable	
		Aéroconvecteurs	Pulvérisateur constitué de ventilateurs qui propulsent l'air et le produit				Facteur modifiable	
		Voûte pneumatique mains et canons	Pulvérisateur qui utilise de l'air comprimé pour créer un flux d'air qui transporte les gouttelettes de pulvérisation				Facteur modifiable	
	Types de buses	Classique	Pièce du pulvérisateur qui transforme le liquide en fine goutte				Facteur modifiable	(Bulletin OEPP/EPPO 2020)(Pasquier et Perriot 2024)
		Injection d'air		Réduction des dérives diminue la perte de produit.			Facteur modifiable	(Bulletin OEPP/EPPO 2020)(Pasquier et Perriot 2024)
	Conditions météorologiques	Présence de rosée	Condensation de l'humidité atmosphérique sous forme de petites gouttelettes d'eau sur la surface des feuilles				Facteur non modifiable	(Klervi Crenn et al. 2024)
		Vitesse du vent	Vitesse à laquelle se déplace l'air horizontalement à un endroit donné	Plus la vitesse du vent est forte plus produit pulvérisé dérive.	m/s		Facteur non modifiable	(Bulletin OEPP/EPPO 2020) (De Cock 2017)
Direction du vent		Provenance du vent				Facteur non modifiable	(Bulletin OEPP/EPPO 2020)	

Annexe 2 : Tableau récapitulatif des références bibliographiques citées dans l'annexe précédente

Références	Cible	Culture	Produit / Agent	Facteurs	Effet du facteur sur l'efficacité du produit	Sources
(Bunea et al. 2013)	<i>Plasmopara viticola</i>	Vigne	Trichoderma harzianum	Cépages / Variétés	Grande variabilité de réponse et du degré d'attaque à la suite de l'application	Bunea, Claudiu-Ioan, Daniela Popescu, Andrea Bunea, et Marin Ardelean. 2013. « Variation of attack degree of downy mildew (<i>Plasmopara viticola</i>) in five wine grape varieties, under conventional and organic control treatments ». <i>Journal of Food Agriculture and Environment</i> 11 (octobre): 1166-70.
(Colonnec et al. 2021)	<i>Erysiphe necator</i>	Vigne	/	Age des feuilles	Pas directement sur l'efficacité produit mais sur le développement du pathogène	Colonnec, Agnes, Jolivet, Ramarosan, Marie Cecile Dufour, et Corio-Costet. 2021. « Defence responses of grapevine cultivars to powdery mildew: Ontogenic resistance versus genetic resistance - Colonnec - 2021 - Plant Pathology - Wiley Online Library ». 2021. https://bsppjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ppa.13404?casa_token=0mC6MJcDJr8AAAAA%3AFPH_cAsUHYnWdKZe1P4S9hrh1ibV71w9h_moSEfUWPv2VWTdG5A0x7iCjJnEyEaMXlZ8n4Q9pH_CluLmkA .
(Colonnec et al. 2018)	<i>Erysiphe necator</i>	Vigne	/	Age des feuilles	Pas directement sur l'efficacité produit mais sur le développement du pathogène	Colonnec, Agnes, Jerome Jolivet, Philippe Vivin, et Sylvain Schnee. 2018. « Pathogenicity Traits Correlate With the Susceptible <i>Vitis vinifera</i> Leaf Physiology Transition in the Biotroph Fungus <i>Erysiphe necator</i> : An Adaptation to Plant Ontogenic Resistance ». 2018. https://www.researchgate.net/publication/329566035_Pathogenicity_Traits_Correlate_With_the_Susceptible_Vitis_vinifera_Leaf_Physiology_Transition_in_the_Biotroph_Fungus_Erysiphe_necator_An_Adaptation_to_Plant_Ontogenic_Resistance?_tp=eyJjb250ZXh0Jp7ImZpcnN0UGFnZSI6InNpZ251cCIsInBhZ2UiOiJwdWJsaWNhdGlvbilInByZXZpb3VzUGFnZSI6InByb2ZpbGUlLCJwb3NpdGlvbil6InBhZ2VDb250ZW50In19 .
(Fernandes de Oliveira et al. 2021)	<i>Plasmopara viticola</i> et <i>Erysiphe necator</i>	Vigne	/	Gestion du sol, température, hygrométrie, UV	Pas directement sur l'efficacité produit mais sur le développement du pathogène	Fernandes de Oliveira, Ana, Serra, Ligios, Satta, et Nielddu. 2021. « Assessing the Effects of Vineyard Soil Management on Downy and Powdery Mildew Development ». 2021. https://www.mdpi.com/2311-7524/7/8/209 .
(Dufour et al. 2009)	<i>Plasmopara viticola</i> et <i>Erysiphe necator</i>	Vigne	BTH et phosphonates	Mode d'action	Directement sur l'efficacité du produit	Dufour, Marie Cecile, Lionel Druelle, Pierre Sauris, Gilles Taris, et Corio-costet Marie-France. 2009. <i>Efficacité de stimulateurs de défenses des plantes (BTH et phosphonates) sur l'oidium et le mildiou de la vigne: impact de la diversité des pathogènes</i> .
(Union Girondine des vins de Bordeaux 2021)	<i>Botrytis cinerea</i> , <i>Plasmopara viticola</i> et <i>Erysiphe necator</i>	Vigne	/	/	/	Union Girondine des vins de Bordeaux. 2021. « Bilan du projet Alt'Fongi Biocontrôle », février. https://www.vinopole.com/wp-content/uploads/2022/05/UG_Alt_Fongi.pdf .
(Klervi Crenn et al. 2024)	/	Vigne	/	Hygrométrie, cépages/variétés, température, UV, lessivage	Directement sur l'efficacité du produit	Klervi Crenn, Pauline Dewaegeneire, Nicolas Formez, Caroline Gouttesoulard, Émilie Hascoet, Mathilde Merrer, et Marie Turner. 2024. « Impact des facteurs abiotiques sur l'efficacité du biocontrôle dans le cadre du projet ABA PIC ». <i>Phytoma</i> , mars.
(Van Eeden 2013)	/	Avocat	Bacillus subtilis	Densité de la canopée, fertilisation, fréquence d'application, adjuvant	Directement sur l'efficacité du produit	Van Eeden Madel. 2013. « Determining Appropriate Parameters for Optimization of Biocontrol Success ».
(Laurent 2020)	<i>Botrytis cinerea</i>	Vigne	Aureobasidium pullulans et bicarbonate de potassium	Température, niveau de pression sanitaire, moment d'application	Pas directement sur l'efficacité produit mais sur le développement du pathogène	Anabelle Laurent. 2020. « Frontiers On-Farm Trials Reveal Significant but Uncertain Control of <i>Botrytis cinerea</i> by <i>Aureobasidium pullulans</i> and Potassium Bicarbonate in Organic Grapevines ». 2020. https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2021.620786/full .

(Fedele et al. 2020)	<i>Botrytis cinerea</i>	Vigne	Aureobasidium pullulans, Bacillus amyloliquefaciens, Bacillus amyloliquefaciens plantarum, Bacillus subtilis, Pythium oligandrum, or Trichoderma atroviride	Hygrométrie et température	Directement sur l'efficacité du produit	Fedele, Giorgia, Chiara Brischetto, et Vittorio Rossi. 2020. « Biocontrol of Botrytis Cinerea on Grape Berries as Influenced by Temperature and Humidity ». <i>Frontiers in Plant Science</i> 11 (août). https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01232 .
(Desaint et al. 2021)	/	Vigne	/	Température	Pas directement sur l'efficacité produit mais sur le développement du pathogène	Desaint, Henri, Nathalie Aoun, Laurent Deslandes, Fabienne Vailleau, Fabrice Roux, et Richard Berthomé. 2021. « Fight Hard or Die Trying: When Plants Face Pathogens under Heat Stress ». <i>New Phytologist</i> 229 (2): 712-34. https://doi.org/10.1111/nph.16965 .
(Jacquens et al. 2022)	<i>Plasmopara viticola</i>	Vigne	SDP	Association avec un biostimulant	L'utilisation d'un biostimulant avec un SDP augmenterait l'efficacité du SDP	Jacquens, Lucile, Sophie Trouvelot, Christelle Lemaitre-Guillier, Yuko Krzyzaniak, Gilles Clément, Sylvie Citerne, Grégory Mouille, Estelle Moreau, Marie-Claire Héloir, et Marielle Adrian. 2022. « Biostimulation Can Prime Elicitor Induced Resistance of Grapevine Leaves to Downy Mildew ». <i>Frontiers in Plant Science</i> 13 (novembre): article 998273. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.998273 .
(Pressecq 2023)	/	/	/	Température, hygrométrie, pH, niveau de pression sanitaire	Directement sur l'efficacité du produit	
(Compant et al. 2013)	<i>Maladies du tronc, de la pourriture des racines par F. oxysporum, botrytis, oidium, mildiou</i>	Vigne	Agent de biocontrôle d'origine bactérienne	Méthode d'inoculation, compatibilité avec d'autres produits, niveau de pression	Pas directement sur l'efficacité produit mais sur l'efficacité d'un agent de biocontrôle bactérien	Compant, Stéphane and Brader, Günter and Muzammil, Saima and Sessitsch, Angela and Lebrhi, Ahmed and Mathieu, Florence Use of beneficial bacteria and their secondary metabolites to control grapevine pathogen diseases. (2013) <i>BioControl</i> , vol. 58 (n° 4). pp. 435-455. ISSN 1386-6141
(Wylie et Punja 2021)	<i>Fusarium oxysporum f.sp. radialis cucumerinum</i>	Concombre et radis	Clonostachys rosea f. catenulata et la souche QST 713 de Bacillus subtilis	Compatibilité avec d'autres produits	Directement sur l'efficacité du produit	Wylie, A.C., Punja, Z.K., 2021. Assessing aerated vermicompost tea combined with microbial biological control agents for suppression of Fusarium and Rhizoctonia. <i>Phytopathology</i> 111, 1137–1151. https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-20-0156-R
(Fiamingo et al. 2007)	<i>Podosphaera aphanis f.sp.fragariae</i>	Fraise	Ampelomyces quisqualis AQ10, Bacillus subtilis QST 713, Trichoderma harzianum T39	Moment d'application	Les produits entraînent une induction de résistance dans la plante hôte le moment d'application est donc primordial	Fiamingo, F., Elad, Y., Pertot, I., 2007. Effect of application time of control agents on <i>Podosphaera aphanis</i> and side effect of fungicides on biocontrol agents survival on strawberry leaves.
(Matzen et al. 2019)	<i>Blumeria graminis f.sp. tritici</i>	Blé d'hiver	Bacillus amyloliquefaciens souche QST 713 (Serenade ASO)	Adjuvants, moment d'application, effet dose-réponse	Absence d'une dose-réponse claire, mais ont confirmé que le timing a un impact majeur sur le contrôle	Matzen, N., Heick, T.M., Jorgensen, L.N., 2019. Control of powdery mildew (<i>Blumeria graminis</i> spp.) in cereals by Serenade (R) ASO (<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> (former subtilis) strain QST 713). <i>Biol. Control</i> 139, UNSP 104067. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104067
(Biondi et al. 2021)	<i>Pseudomas syringae pv.actinidae</i>	Kiwi	Bacillus amyloliquefaciens souche QST 713 (Serenade Max)	Cépages/Variétés	0% sur A. deliciosa et 40 % sur A. chinensis	Biondi, E., Gallipoli, L., Mazzaglia, A., Fuentealba, S.P., Kuzmanovic, N., Bertaccini, A., Balestra, G.M., 2021. <i>Bacillus</i> -based products for management of kiwifruit bacterial canker. <i>Phytopathol. Mediterr.</i> 60, 215–228. https://doi.org/10.36253/phyto-12184
(Mantecon 2008)	<i>Septoria glycines</i>	Soja	Bacillus subtilis et B. pumilus	Dose	Les plus fortes doses de produits de biocontrôle sont les plus efficaces	Mantecon, J.D., 2008. Efficacy of chemical and biological strategies for controlling the soybean 152

(Bulletin OEPP/EPPO 2020)	/	/	/	Fertilisation, hygrométrie, pH, dose, fréquence d'application, compatibilité avec d'autres produits, moment d'application, volume de bouillie, pression, type de buses, vitesse du vent et direction du vent	Directement sur l'efficacité du produit	Bulletin OEPP/EPPO Bulletin (2020), Principes généraux pour l'évaluation de l'efficacité des produits de protection des plantes ayant un mode d'action en tant qu'inducteurs de défense des plantes, 0 (0), 1-5 ISSN 0250-8052. DOI: 10.1111/epp.12692
(Pertot et al. 2017)	<i>Botrytis cinerea</i>	Vigne	<i>Aureobasidium pullulans</i>	Moment d'application/stade phénologique	Si application à véraison meilleure efficacité	Pertot, I., Giovannini, O., Benanchi, M., Caffi, T., Rossi, V. et Mugnai, L. (2017b). Combiner des agents de biocontrôle avec différents mécanismes d'action dans une stratégie de contrôle de <i>Botrytis cinerea</i> sur vigne. <i>Protection des cultures</i> . 97, 85-93.
(Zewdie et 2024)		blé		Dépôt de pulvérisation, couverture de pulvérisation, taille des gouttes et vitesse du vent	Directement sur l'efficacité du produit	Andargie Zewdie T, Zwertvaegher I, De Ryck S, Vanwijnsberghe J, De Cauwer B, Nuyttens D, Verboven, P. 2024. OPTISPRAY : Sélection de la technique d'application par pulvérisation optimale techniques et réglages à l'aide d'un modèle CFD – Partie 2 : approche de modélisation. <i>Aspects de la biologie appliquée</i> 148,
(De Cock 2017)	/	/	/	Taille de goutte et vitesse du vent	Directement sur l'efficacité du produit	Ouled Taleb Salah, Sofiene & De Cock, Nicolas & Massinon, Mathieu & Schiffers, Bruno & Dorbolo, Stephane & Lebeau, Frederic. (2016). B A Étude des potentialités des systèmes d'application contrôlée des gouttes (CDA) pour les traitements phytosanitaires en céréaliculture (synthèse bibliographique). <i>Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement</i> . 20. 10.25518/1780-4507.12794.
(Nicot 2013)	<i>Botrytis cinerea</i>	Fraise	ChitoPlant et Serenade Max	Fertilisation	Directement sur l'efficacité du produit et développement de la maladie	Nicot, Philippe & Bardin, Marc & DEBRUYNE, François & DUFFAUD, Magali & Lecomte, François & Neu, Laurent & Pascal, Michel. (2013). Effect of nitrogen fertilisation of strawberry plants on the efficacy of defence-stimulating biocontrol products against <i>Botrytis cinerea</i> . <i>IOBC/WPRS Bulletin</i> . 88. 39-42.
(Rezgui 2016)	<i>Phaeomoniella chlamydospora</i> , <i>N. parvum</i>	Vigne	<i>B. subtilis B6</i> , <i>Pantoea agglomerans S5</i>	Cépages/Variétés	Directement sur l'efficacité de l'agent de biocontrôle	Awatef Rezgui. Étude de la microflore colonisant les tissus ligneux de <i>Vitis vinifera</i> : Intérêt pour le développement d'agents de biocontrôle contre une maladie du bois de la vigne, l'esca. <i>Mycologie</i> . Université de Bordeaux; Université de Tunis El Manar, 2016. Français. ffNNT : 2016BORD0449ff. ffeI-02063177v2
(Leggett et al 2011)	/	/	Agent de biocontrôle d'origine bactérienne	Adjuvants	Directement sur l'efficacité du produit et développement de la maladie	Leggett M, Leland J, Kellar K, Epp B (2011) Formulation of microbial biocontrol agents – an industrial perspective. <i>Canadian Journal of Plant Pathology</i> 33:101–107
(Piermann et al. 2023)	<i>Botrytis cinerea</i>	Begonia	Carbonate et bicarbonate de potassium et de sodium carbonate, <i>Bacillus subtilis</i> QST-713, <i>Bacillus pumilus</i> QST-2808, huile de café brute et huile de café torréfiée	Moment d'application	Les résultats indiquent que les produits testés doivent être utilisés de manière préventive et peuvent induire une résistance à l'hôte.	Piermann, Luana, Miriam Fujinawa, Nadson Pontes, José Galvão, et Wagner Bettiol. 2023. « Inhibition of mycelial growth, conidial germination, and <i>Botrytis cinerea</i> Pers.: Fr colonization in begonia with biocompatible products ». <i>Scientia Agricola</i> 80 (janvier). https://doi.org/10.1590/1678-992x-2021-0062 .
(Pasquier et Perriot 2024)	/	/	/	Mode d'action, pression, type de buses, volume bouillie	Chaque substance à des conditions d'application spécifiques	Pasquier, David, et Benjamin Perriot. 2024. « Des conditions de pulvérisation spécifiques à chaque substance ». <i>Phytoma</i> , no 772.
(Andrивon et al 2018)		/				Didier Andrивon, Marc Bardin, Cédric Bertrand, Laurent Brun, Xavier Daire, et al.. Peut-on se passer du cuivre en protection des cultures biologiques ? Rapport d'expertise scientifique collective. [O] Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). 2018. fhal-02791118

Guide d'entretien Roméo : facteurs d'efficacité des produits de biocontrôle

Introduction

Dans le cadre de mon stage de fin d'études à l'IFV, je m'intéresse aux facteurs influençant l'efficacité des produits testés dans le projet BIOVIMED, dans le but de mieux caractériser ces facteurs et leur impact sur l'efficacité des produits. Pour cela, j'aimerais recueillir le maximum d'information sur les produits afin de voir si les facteurs que j'ai identifiés ont déjà été étudiés ou s'il existe des informations complémentaires à celles présentes sur les fiches techniques. J'aimerais donc vous poser quelques questions sur le Roméo.

Efficacité

Quels sont les facteurs qui sont les plus importants à prendre en compte lors de l'utilisation du produit ou qui influencent le plus son efficacité ?

Caractéristiques du produit :

Mode d'action

Le Roméo est considéré comme un stimulateur de défenses des plantes, quel est son comportement à la surface de la culture, est-ce qu'on peut le considérer comme translaminaire ou systémique ?

Cible

- La cible principale du produit est le mildiou, comment évalueriez-vous son efficacité contre cette cible ?
- Est-ce que la pression sanitaire a un effet sur l'efficacité du produit ?
- Est-ce que le produit a un effet sur d'autres cibles ?

Conditions d'usage

Dose recommandée :

- Nous avons vu que la dose d'homologation est de 0,25kg/ha, est-ce que c'est la dose recommandée ?

Modulation des doses :

- Les doses peuvent-elles être modulées ?
 - En fonction du stade phénologique, pression sanitaire, conditions météorologiques ?

Cadence de traitement :

- La cadence de traitement recommandée est de 7 à 10 jours, est-ce qu'il existe des critères pour définir la fréquence de renouvellement des traitements ?

Influence de la pluie :

- Est-ce que la stratégie de pulvérisation est influencée par la pluie ?

- Que faire avant une pluie prévue ?
- Que faire après une pluie ?
- Y a-t-il un cumul de pluie à partir duquel il serait nécessaire d'adapter le programme des traitements ?
- Est-ce qu'il existe un délai entre l'application du produit et une pluie pour que l'efficacité du traitement ne soit pas impactée ?

Nombre d'application :

- Le nombre d'application maximum par an est de 10.
- Est-ce qu'il a un nombre d'application minimum pour que l'efficacité du produit soit visible ?
- Avez-vous observé une variation d'efficacité entre différents nombres d'application par an ?

Compatibilité avec d'autres produits :

- Est-ce que ce produit est incompatible avec d'autres produits ou types de produits ? (Une incompatibilité de mélange ou une association qui entraîne une baisse d'efficacité)
- Est-ce que l'efficacité de ce produit a été évaluée en association avec d'autres produits (phytosanitaire, biostimulants) ?
- Voyez-vous un intérêt à utiliser le produit en association ?

Risques de phytotoxicité :

- Avez-vous remarqué des risques de phytotoxicité ?

Volume de bouillie :

- Quel volume de bouillie est recommandé pour optimiser son efficacité ?
 - Est ce qu'il existe des volumes maximum et minimum ?

Réglage de pulvérisation

- Avez-vous observé si certains types de buses sont plus efficace que d'autres pour la pulvérisation du produit ?
- Faut-il des réglages précis pour optimiser l'efficacité de la pulvérisation ?
 - Vitesse de déplacement
 - Pression de pulvérisation
 - Calibrage des équipements

Stratégie et positionnement du produit dans un programme de protection

- Le produit peut être utilisé entre le stade deux feuilles étalées jusqu'aux vendanges, est-ce qu'il est préconisé préférentiellement à un stade ou à une période de la saison ? Est-ce que son utilisation doit plutôt être raisonnée par la pression de la maladie en lien avec son mode d'action (préventif/éliciteur) ?
- Est-ce que son application est préconisée à un moment particulier dans la journée ? (Tôt le matin pour éviter les chaleurs ?)

Évolution

- Est-ce que des recherches sont en cours sur ce produit ?

- Est-ce que des nouvelles formulations sont prévues ?

Facteurs d'efficacité

Facteurs impactant le produit pendant l'application

- Est-ce que le produit est "formulé" ? Le Roméo est sous forme de poudre mouillable, est-ce qu'il a des co-formulants ?
 - Quel sont leurs rôles ?
- L'efficacité du produit peut-elle être influencée par des facteurs météorologiques lors de l'application ?
 - Température, UVs, hygrométrie, rosée, vent ?
- Lors de la pulvérisation, la taille de goutte et la proportion de la surface des organes recouvert par le produit après pulvérisation influencent-ils son efficacité ? (Taux de couverture)
- Les résidus de produits qui restent sur les feuilles et les fruits après pulvérisation, ont-ils une influence sur son efficacité ? (Dépôt de pulvérisation)
- Le nombre de faces traitées peut-il influencer son efficacité ?
- Existe-t-il d'autres facteurs liés à la pulvérisation qui pourraient améliorer l'efficacité du produit ?

Facteurs impactant le produit après traitement

- Quels sont les principaux facteurs qui influencent la vitesse de dégradation du produit ?
 - Lessivage ?
 - Cumul de pluie ?
 - Température extrême ?
 - Dose, bouillie, taux de couverture ?
 -

Facteurs impactant le produit avant traitement

- Est-ce que le stockage du produit peut exercer une influence sur son efficacité ?
 - Temps ?
 - Température, exposition au soleil ?
 - Humidité ?

Facteur abiotiques

- Les pratiques culturales peuvent-elles influencer son efficacité ?
 - Fertilisation, gestion du sol, irrigation, mode de taille ?

Facteurs biotiques

- Quels facteurs biotiques peuvent influencer son efficacité ?
 - Cépages, stade phénologique, âges des feuilles, âge de la vigne, densité de la canopée ?

Est-ce qu'il y a des aspects importants concernant le produit que nous n'avons pas évoqué et dont vous aimeriez parler ?

Annexe 4 : Grille d'analyse des entretiens

Caractéristique du produit								Mode de transfert				Mode d'action			Cible				
Nom commercial	Nature du produit	Substance active	Numéro d'AMM	Statut réglementaire	Formulation	Produits formulés	Biofongicide	Contact	Translaminaire	Systémique	Éliciteur	Préventif	Curatif	Eradiquant	Mildiou	Oidium	Blackrot	Pourriture grise	Autres
Limocide	substance naturelle végétale	Huile essentielle d'orange douce	2090127	Biocontrôle	Micro émulsion (ME)	Oui	Oui	Prouvé	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Erinose, Thrips, Cicadelles, Acariens
Romeo	substance naturelle à base de levure	Cerevisane	2170654	Biocontrôle	Poudre mouillable (WP)	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
Belvine	substance naturelle à base de levure	ABE-IT 56 (lysate de Saccharomyces cerevisiae)	2210387	Biocontrôle	Micro émulsion (ME)	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non

Nom commercial	Conditions d'usage réglementaires				Conditions d'usage												
	Dose/ha	Stade d'application (BBCH)	Intervalle minimum entre applications	Nombre maximum d'application par an	Modulation dose	Cadence ou règles de décision pour le renouvellement	Stratégie d'emploi (avant/après la pluie)	Quantité de pluie nécessitant une adaptation de stratégie	Nombre minimum d'application par an	Variation d'efficacité selon le nombre d'application	Incompatibilité	Application en association ou en alternance avec d'autres produits	Risques de phytotoxicité	Type de buse	Réglages de pulvérisation	Mode d'application conseillé	
Limocide	1,6L/ha si volume de 200L/ha, à utiliser avec une concentration à 0,8% sur mildiou	12 à 77	7	6	Posible si utilisé en association avec un autre produit	Cadence 7-10 jours	Renouvellement après la pluie et il faut que la protection soit présente lors d'une pluie	Très sensible au lessivage, renouvellement nécessaire après une pluie	Aucun, pas d'effet de l'accumulation de plusieurs application	Aucune mais le fait de détruire les spores lors de chaque application qui fait diminuer la pression parasitaire	Incompatible avec les trichogrammes et le Pyrévert	Utilisation conseillé avec du cuivre ou du soufre	Oui si appliqué lors de fortes températures ou si association avec soufre ou Pyrévert	NSP	NSP	NSP	
Romeo	0,25kg/ha	12 à 89	7	10	Non	Cadence 7-10 jours	En début de saison pas en fonction des pluies	Aucune, pas sensible au lessivage	2	Au moins 2 applications pour avoir un effet	Aucune	S'utilise seul, en alternance ou en association	Non	NSP	NSP	NSP	
Belvine	3L/ha	NA	7	10	Non	Cadence 8 jours	Pas en fonction des pluies mais respect de la cadence	Aucune, pas sensible au lessivage	Au moins 4 fois avant floraison pour le mildiou.	Au moins 4 applications pour avoir un effet	Aucune	En association avec des doses modulées de cuivre	Non pas avec la dose homologuée	NSP	NSP	NSP	

	Stratégie et positionnement du produit		Efficacité			Facteurs avant application	Facteurs pendant l'application										
Nom commercial	Positionnement du produit dans un programme de protection	Raisonnement du traitement	Facteurs les plus influents	Recommandations	Niveau de pression parasitaire maximum	Conditions de stockage	Heure d'application	pH	Température	Hygrométrie	Rosée	Nombre de faces traitées	Ciblage face inférieure des feuilles	Taux de couverture	Volume bouillie conseillé/ha	Taille des gouttes	Autres facteurs de pulvérisations
Limocide	Il peut être utilisé lors de la floraison et son utilisation est conseillée en association avec du cuivre ou du soufre pour son action séchante supplémentaire	Éviter les fortes chaleurs et la rosée, applications en préventif et pour son effet éradiquant lorsqu'il y a des symptômes visibles	Qualité de pulvérisation, lessivage, température et rosée lors de l'application, dose	Éviter les applications quand il y a de la rosée et il fait chaud température > 30°C dans les 6h, renouveler après une pluie, bonne pulvérisation pour toucher le maximum d'organes, respecter la concentration à 0,8%	Forte	Pas d'effet	Éviter les heures où la température est supérieure à 30°C	NSP	Oui, éviter les températures supérieures à 30°C dans les 6h après application (risque de perte d'efficacité par la volatilisation trop rapide des composés)	NSP	Oui, éviter l'application lorsque le feuillage est humide (risque de perte d'efficacité par diminution du produit)	2 faces idéalement	Couvrir un maximum les organes	Important car produit de contact	200L/ha	NSP	NSP
Romeo	Traitements conseillés en début de programme avant le développement des premiers symptômes et en association avec un LBG ou du cuivre	Effet préventif et éliciteur des défenses à appliquer avant les contaminations	Positionnement, qualité de pulvérisation, nutrition minérale de la plante	Bonne qualité de pulvérisation, bon équilibre nutritif de la plante et application préventive avec une cadence régulière pour réactiver les gènes de défense.	Moyenne	Pas d'effet	Éviter les heures où la température est supérieure à 25°C	NSP	Éviter les applications lors de fortes chaleurs, température > 25°C	NSP	NSP	2 faces idéalement	Application sur chaque face des feuilles	Important	100-150L/ha	NSP	NSP
Belvine	Ne pas appliquer les produits SDP au moment de la floraison. Au moins 4 applications conseillées avant floraison	Effet préventif et éliciteur des défenses à appliquer avant les contaminations	Positionnement, la cadence, le volume de bouillie, la qualité de pulvérisation	NSP	Moyenne	Risque de dégradation si stockage à une température supérieure à 40°C	Éviter les heures où la température est supérieure à 25°C	NSP	Éviter les applications lors de fortes chaleurs, température > 25°C, privilégier les applications le matin ou le soir	NSP	NSP	2 faces idéalement	Face inférieure	Important	300L/ha (essais à 800 ou 1000L/ha avec des résultats plus homogènes)	NSP	NSP

	Facteurs après application				Autres		Commentaires
Nom commercial	UV	Lessivage et seuil critique (mm)	Délai entre l'application et une pluie	Température	Pratiques culturales	Facteurs biotiques	
Limocide	NSP	Sensible même pour un faible cumul, renouvellement nécessaire après une pluie	Forte sensibilité au lessivage quelque soit le délai	Sensible aux températures > 30°C dans les 6 heures après l'application	NSP	NSP	
Romeo	NSP	Non	Temps de séchage du produit	Non	Un bon équilibre nutritionnel de la plante est important	Les organes jeunes sont plus réceptifs.	
Belvine	NSP	Non	30 minutes, temps de pénétration du produit par les stomates	Non	NSP	Les vignes plus âgées sont plus réceptives car elles ont une meilleure absorption de l'eau -> ferment leurs stomates moins vite que les vignes plus jeunes	

Annexe 5 : Script R de l'analyse par essai

```
A <- openxlsx::read.xlsx("Data_R_notations_selection.xlsx")

#### Création d'un dataframe avec les données d'un seul essai

data_essai <- A %>%
  group_by(essai) %>%
  filter(essai %in% c("grabZ4"))

print("Data après filtrage:")
print(data_essai)

# Convertir traitement en facteur dans data_essai
data_essai <- data_essai %>%
  mutate(traitement = as.factor(traitement))

#### ANOVA
# Ecriture du modèle d'Anova a un facteur à partir des données d'un seul essai après transformation de Bliss
model_freq <- aov(Arcsin_freq ~ traitement, data = data_essai)
model_int <- aov(Arcsin_int ~ traitement, data = data_essai)

anova(model_freq)
anova(model_int)

#### Test de validation de l'ANOVA
# 1 - normalité des résidus
# Les résidus du modèle s'obtiennent par:
model_freq$residuals
model_int$residuals

# Test de normalité de Shapiro
hist(model_freq$residuals, col = "lightgoldenrod", main = "Répartition des résidus de la fréquence",
      xlab = "Résidus", ylab = "Nombre")
hist(model_int$residuals, col = "lightgoldenrod", main = "Répartition des résidus de l'intensité",
      xlab = "Résidus", ylab = "Nombre")

# Pour avoir une première idée (visuellement) si les résidus sont répartis
# équitablement autour de 0 (càd, s'ils suivent une loi normale)
qqnorm(model_freq$residuals)
qqline(model_freq$residuals) # autre méthode visuelle
shapiro.test(model_freq$residuals) # validé si > 0.05 donc H0 validée (la normalité)

qqnorm(model_int$residuals)
qqline(model_int$residuals) # autre méthode visuelle
shapiro.test(model_int$residuals) # validé si > 0.05 donc H0 validée (la normalité)

# 2 - Homogénéité des variances entre les groupes
# Test de Levene
leveneTest(model_freq$residuals~traitement,data = data_essai)
leveneTest(model_int$residuals~traitement,data = data_essai)
# validé si > 0.05 on ne rejette pas l'homogénéité des variances

# 3 - Graphe de diagnostic des résidus des modèles
par(mfrow=c(2,2)) # Affichage graphique 2 lignes 2 colonnes
plot(model_freq) # normalité résidus, indépendance -> les résidus se répartissent en haut en bas
plot(model_int) # normalité résidus, indépendance -> les résidus se répartissent en haut en bas

#### Visualisation de la différence des moyennes de chaque groupe avec la moyenne générale avec :

model.tables(model_freq)
plot.design(frequency~traitement,data=data_essai, main = "Comparaison des moyennes de la fréquence du mildiou sur grappe par traitement", xlab = "traitement", ylab = "Moyenne de la fréquence du mildiou")

model.tables(model_int)
plot.design(intensite~traitement,data=data_essai, main = "Comparaison des moyennes de l'intensité du mildiou sur grappe par traitement", xlab = "traitement", ylab = "Moyenne de l'intensité du mildiou")

par(mfrow=c(2,1))

#### Test de Newman-Keuls test
snk_freq <- SNK.test(model_freq, "traitement", group = TRUE, console = TRUE)
snk_int <- SNK.test(model_int, "traitement", group = TRUE, console = TRUE)

#### Représentation graphique
ggplot(snk_freq$groups, aes(x = rownames(snk_freq$groups), y = Arcsin_freq, fill = groups)) +
  geom_bar(stat = "identity", color = "black") +
  scale_fill_manual(values = c("a" = "#780000", "ab" = "#e29578", "b" = "#FDF0D5", "c" = "#66988C", "d" = "#003049")) +
  labs(title = "La fréquence d'attaque du mildiou en fonction des traitements",
       x = "Traitement",
       y = "Fréquence") +
  theme_minimal()
ggplot(snk_int$groups, aes(x = rownames(snk_int$groups), y = Arcsin_int, fill = groups)) +
  geom_bar(stat = "identity", color = "black") +
  scale_fill_manual(values = c("a" = "#780000", "ab" = "#e29578", "b" = "#FDF0D5", "c" = "#66988C", "d" = "#003049")) +
  labs(title = "L'intensité d'attaque du mildiou en fonction des traitements",
       x = "Traitement",
       y = "Intensité") +
  theme_minimal()
```

Annexe 6 : Script R de la visualisation globale des données

```
A <- openxlsx::read.xlsx("Data_R_notations_selection.xlsx")

# Calculer la moyenne pour chaque combinaison de traitement et essai
result <- A %>%
  group_by(traitement, essai) %>%
  summarise(frequence = mean(frequence, na.rm = TRUE),
            intensite = mean(intensite, na.rm = TRUE),
            tnt_freq = mean(tnt_freq, na.rm = TRUE),
            tnt_int = mean(tnt_int, na.rm = TRUE),
            eff_freq = mean(eff_freq, na.rm = TRUE),
            eff_int = mean(eff_int, na.rm = TRUE),
            .groups = 'drop')

result %>%
  filter(essai!="ctifl23") -> result
result %>%
  filter(essai!="ctifl24") -> result
result %>%
  filter(essai!="IFV_tes24") -> result

# Description des données
result %>%
  group_by(parcelle, annee, traitement) %>%
  summarise(nb=n()) %>%
  tidyr::pivot_wider(names_from = traitement,
                    values_from = nb) %>%
  knitr::kable()

bilan <- result %>%
  group_by(traitement)

# Créer les quatre graphiques avec ggplot2
p1 <- ggplot(data=result, aes(x=traitement, y=frequence)) +
  geom_boxplot() +
  coord_flip() +
  geom_jitter(aes(x=traitement, y=frequence, color=essai)) +
  ggtitle("Fréquence d'attaque du mildiou en fonction des traitements
          et des essais") +
  labs(x = "Traitement", y = "Fréquence d'attaque") +
  theme_bw()

p3 <- ggplot(data=result, aes(x=traitement, y=intensite)) +
  geom_boxplot() +
  coord_flip() +
  geom_jitter(aes(x=traitement, y=intensite, color=essai)) +
  ggtitle("Intensité d'attaque du mildiou en fonction des traitements
          et des essais") +
  labs(x = "Traitement", y = "Intensité d'attaque") +
  theme_bw()

p2 <- ggplot(data=result, aes(x=traitement, y=eff_freq)) +
  geom_boxplot() +
  coord_flip() +
  geom_jitter(aes(x=traitement, y=eff_freq, color=essai)) +
  ggtitle("Efficacité d'Abbott sur la fréquence d'attaque du mildiou
          en fonction des traitements et des essais") +
  labs(x = "Traitement", y = "Efficacité d'Abbott sur la fréquence d'attaque") +
  theme_bw()

p4 <- ggplot(data=result, aes(x=traitement, y=eff_int)) +
  geom_boxplot() +
  coord_flip() +
  geom_jitter(aes(x=traitement, y=eff_int, color=essai)) +
  ggtitle("Efficacité d'Abbott sur l'intensité d'attaque du mildiou
          en fonction des traitements et des essais") +
  labs(x = "Traitement", y = "Efficacité d'Abbott sur l'intensité d'attaque") +
  theme_bw()

# Afficher les graphiques dans une grille 2x2
grid.arrange(p1, p2, p3, p4, ncol=2)
```

Annexe 7 : Script R analyse des facteurs « traitement », « année » et « parcelle »

```
A <- openxlsx::read.xlsx("Data_R_notations_selection.xlsx")

##### Calculer la moyenne pour chaque combinaison de traitement et essai
result <- A %>%
  group_by(traitement, essai) %>%
  summarise(intensite = mean(intensite, na.rm = TRUE),
            intensite = mean(intensite, na.rm = TRUE),
            tnt_int = mean(tnt_int, na.rm = TRUE),
            tnt_int = mean(tnt_int, na.rm = TRUE),
            .groups = 'drop')

## Ajout des colonnes des caractéristiques des essais au dataframe result contenant les moyennes calculées
# Créer un vecteur d'indices à fusionner
indices <- match(result$essai, A$essai)
# Fusionner en utilisant les indices correspondants
result <- cbind(result, A[indices, c("annee", "parcelle", "volume", "age", "cepage", "stade_BBCH")])
# Afficher le résultat
print("Moyenne des valeurs par traitement et essai :")
print(result)

##### Conversion des données en facteurs
result$annee <- as.factor(result$annee)
result$parcelle <- as.factor(result$parcelle)
result$traitement <- as.factor(result$traitement)

##### Enlever les données des essais non étudiés
result %>%
  filter(essai != "ctifl23") -> result
result %>%
  filter(essai != "ctifl24") -> result
result %>%
  filter(essai != "IFV_tes24") -> result

##### Modèle mixte avec les facteurs parcelle et année
res.lmer <- lmer(intensite ~ traitement + (1|parcelle) + (1|annee) +
                (1|annee:parcelle), data = result, na.action = na.exclude)
res.lmer

sjPlot::plot_model(res.lmer, show.values = T, digits = 3, show.p = TRUE, p.shape = TRUE, vline.color = "grey")

#####

##### Validation du modèle : Graphes pour vérifier :
#- La normalité des résidus et des variables aléatoires
#- Homoscédasticité
#- La distribution des résidus pour chaque effet -> voir la normalité

sjPlot::plot_model(res.lmer, type = "diag")

# Histogrammes des effets aléatoires
par(mfrow = c(2, 2))
hist(ranef(res.lmer)$parcelle[, "(Intercept)"], main = "Parcelle",
     xlab = "Effets aléatoires (Intercept)")
hist(ranef(res.lmer)$annee[, "(Intercept)"], main = "Année",
     xlab = "Effets aléatoires (Intercept)")
hist(ranef(res.lmer)$`annee:parcelle`[, "(Intercept)"], main = "Année:Parcelle",
     xlab = "Effets aléatoires (Intercept)")
par(mfrow = c(1,1))

# Vérifier l'homogénéité de la variance des résidus
result$residus <- residuals(res.lmer)

#### Détection des valeurs aberrantes parmi les résidus
grubbs.test(result$residus)
#identification de la valeur la plus aberrante
result[which.min(result$residus),]

#####
```

```

##### Effets aléatoires
# Extraire les variances des effets aléatoires
variance_df <- as.data.frame(VarCorr(res.lmer)) %>%
  filter(grp != "Residual") %>%
  mutate(grp = factor(grp, levels = unique(grp)))

ggplot(variance_df, aes(x = grp, y = vcov)) +
  geom_bar(stat = "identity") +
  labs(title = "Variances des Effets Aléatoires", x = "Facteurs Aléatoires", y = "Variance") +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))

# Estimation des effets aléatoires pour chaque niveau des facteurs aléatoires
ranef(res.lmer)

# Visualisation des effets aléatoires
par(mfrow = c(2, 2))
ranef_res <- ranef(res.lmer, condVar = TRUE)
ranef_df <- as.data.frame(ranef_res)

plot_random_effects <- function(data, title, x_label, y_label) {
  ggplot(data, aes(x = grp, y = condval)) +
    geom_point() +
    geom_errorbar(aes(ymin = condval - 1.96 * condsd, ymax = condval + 1.96 * condsd), width = 0.2) +
    labs(title = title, x = x_label, y = y_label) +
    theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))
}

plot_random_effects(ranef_df %>% filter(grpvar == "parcelle"), "Effets Aléatoires: Parcelle",
  "Parcelle", "Effet Aléatoire")
plot_random_effects(ranef_df %>% filter(grpvar == "annee"), "Effets Aléatoires: Année", "Année",
  "Effet Aléatoire")
plot_random_effects(ranef_df %>% filter(grpvar == "annee:parcelle"), "Effets Aléatoires: Année:Parcelle",
  "Année:Parcelle", "Effet Aléatoire")

##### Graphique bilan des effets
# Préparer les effets fixes pour le graphique
moy_var <- lsmeans(res.lmer, ~ traitement)
moy_var_df <- as.data.frame(summary(moy_var))

fixed_effects <- moy_var_df %>%
  mutate(type = "Effet Fixe",
    lower = lsmean - 1.96 * SE,
    upper = lsmean + 1.96 * SE,
    traitement_reord = fct_reorder(traitement, lsmean)) %>%
  rename(effect = lsmean, group = traitement_reord)

# Préparer les effets aléatoires pour le graphique
random_effects_parcelle <- ranef_df %>%
  filter(grpvar == "parcelle") %>%
  rename(effect = condval, group = grp) %>%
  mutate(type = "Effet Aléatoire - Parcelle")

random_effects_annee <- ranef_df %>%
  filter(grpvar == "annee") %>%
  rename(effect = condval, group = grp) %>%
  mutate(type = "Effet Aléatoire - Année")

random_effects_annee_parcelle <- ranef_df %>%
  filter(grpvar == "annee:parcelle") %>%
  rename(effect = condval, group = grp) %>%
  mutate(type = "Effet Aléatoire - Année:Parcelle")

# Combiner tous les effets dans un seul data frame
combined_effects <- bind_rows(fixed_effects, random_effects_parcelle, random_effects_annee,
  random_effects_annee_parcelle)

```

```

# Visualiser les effets
ggplot(combined_effects, aes(x = group, y = effect, fill = type)) +
  geom_bar(stat = "identity", position = "dodge") +
  labs(title = "Effets Fixes et Aléatoires", x = "Traitement/Parcelle/Année", y = "Effet") +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1)) +
  scale_fill_manual(values = c("Effet Fixe" = "blue",
                              "Effet Aléatoire - Parcelle" = "green",
                              "Effet Aléatoire - Année" = "red",
                              "Effet Aléatoire - Année:Parcelle" = "purple"))

##### Tableau ANOVA -> analyse de variance pour les termes du modèle mixte
Anova(res.lmer, test.statistic = "F")

##### Tests post-hoc
## Moyennes ajustées pour chaque niveau de traitement
moy_var <- emmeans(res.lmer, ~ traitement)
pairs(moy_var)
#
multcomp::cld(moy_var, Letters = c(LETTERS))

## Comparaisons avec un contrôle
contrasts <- contrast(moy_var, method = "trt.vs.ctrl", ref = "cuivre_tardif")
contrasts
plot(contrasts)

##### Comparaison modèle mixte et modèle fixe
moy_var <- lsmeans(res.lmer, ~ traitement)
moy_var_df <- as.data.frame(summary(moy_var))
res.lm <- lm(intensite ~ traitement, data = result)
moy_var_fixed <- lsmeans(res.lm, ~ traitement)

# Préparer les données pour les effets fixes des deux modèles
moy_var_df$model <- "Modèle Mixte"
moy_var_fixed_df <- as.data.frame(moy_var_fixed)
moy_var_fixed_df$model <- "Modèle Fixe"

moy_var_combined <- bind_rows(moy_var_df, moy_var_fixed_df)

ggplot(moy_var_combined, aes(x = traitement, y = lsmean, color = model)) +
  geom_point(size = 3) +
  geom_errorbar(aes(ymin = lsmean - 1.96 * SE, ymax = lsmean + 1.96 * SE), width = 0.2) +
  labs(title = "Comparaison des Effets Fixes: Modèle Mixte vs Modèle Fixe", x = "Traitement",
        y = "Effet Fixe Ajusté") +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))

```

Annexe 8 : Script R de l'indicateur « Nombre de jours sans protection »

```
A <- openxlsx::read.xlsx("Data_R_notations_selection.xlsx")

# Calculer la moyenne pour chaque combinaison de traitement et essai
result <- A %>%
  group_by(traitement, essai) %>%
  summarise(frequence = mean(frequence, na.rm = TRUE),
            intensite = mean(intensite, na.rm = TRUE),
            tnt_freq = mean(tnt_freq, na.rm = TRUE),
            tnt_int = mean(tnt_int, na.rm = TRUE),
            nb_jours_trait = mean(nb_jours_trait, na.rm = TRUE),
            .groups = 'drop')

result$traitement <- as.factor(result$traitement)

result %>%
  filter(essai!="ctifl23") -> result
result %>%
  filter(essai!="ctifl24") -> result
result %>%
  filter(essai!="IFV_tes24") -> result
result %>%
  filter(traitement!="prele_saule") -> result

#### Analyse pour le Limocide
#Création d'une base de données pour le Limocide
data_limocide <- result %>%
  group_by(traitement) %>%
  filter(traitement %in% c("limocide"))
print(data_limocide)

# Effectuer la régression linéaire
model <- lm(intensite ~ nb_jours_trait, data = data_limocide)

# Afficher un résumé du modèle
print(summary(model))

#### Analyse pour le cuivre
#Création d'une base de données avec les modalités "cuivre"
data_cuivre <- result %>%
  group_by(traitement) %>%
  filter(traitement %in% c("cuivre_precoce", "cuivre_tardif", "cuivre_conseil"))
print(data_cuivre)

# Effectuer la régression linéaire
model <- lm(intensite ~ nb_jours_trait, data = data_cuivre)

# Afficher un résumé du modèle
print(summary(model))

# Représentation résultat modalités cuivre regroupées
ggplot(data_cuivre, aes(x = nb_jours_trait, y = intensite)) +
  geom_point() +
  geom_smooth(method = "lm", se = FALSE) +
  labs(title = "Effet du nombre de jours non protégés sur l'intensité d'attaque par traitement",
       x = "Nombre de jours non protégés",
       y = "Intensité d'attaque")

# Représentation de l'ensemble des modalités
ggplot(result, aes(x = nb_jours_trait, y = intensite, color = traitement)) +
  geom_point() +
  geom_smooth(method = "lm", se = FALSE) +
  labs(title = "Effet du nombre de jours non protégés sur l'intensité d'attaque par traitement",
       x = "Nombre de jours non protégés",
       y = "Intensité d'attaque")
```

Annexe 9 : Glossaire de la base de données des caractéristiques des produits

Catégorie	Nom	Définition	Références
Caractéristiques du produit	Nom commercial	Nom d'usage du produit	
	Nature du produit	Les produits de biocontrôle sont « des agents et produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Ils comprennent en particulier : - Macro-organismes - Micro-organismes - Médiateurs chimiques - Substances d'origine naturelle»	LEGIFRANCE, 2021. Article L253-6 - Code rural et de la pêche maritime - Légifrance. [en ligne]. 2021. Disponible à l'adresse : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042911985
	Substance active	Substances ou micro-organismes, y compris les virus, exerçant une action générale ou spécifique sur les organismes nuisibles ou sur les végétaux, parties de végétaux ou produits végétaux.	Directive 91/414/CEE du Conseil, du 15 juillet 1991, concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques, https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31991L0414:FR:HTML
	AMM = numéro d'AMM	Numéro d'Autorisation de Mise sur le Marché	Fillatre, Y. (2011). Produits phytosanitaires: Développement d'une méthode d'analyse multi-résidus dans les huiles essentielles par couplage de la chromatographie liquide avec la spectrométrie de masse en mode tandem (Doctoral dissertation, Université d'Angers).
	Statut réglementaire	Produit de biocontrôle, Substance de base, Préparations Naturelles Peu Préoccupantes (PNPP)	PYRÉNÉES-ORIENTALES, Chambre d'agriculture des, 2024. Définition biostimulants/substance de base/PNPP/biocontrôle. [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : https://po.chambre-agriculture.fr/actualites/detail-de-lactualite/actualites/definition-biostimulantsubstance-de-basepnppbiocontrole/
	Formulation	Le type de formulation est basé sur la forme physique et la méthode d'utilisation. Les types de formulation les plus fréquents sont les suivants : poudre pour poudrage (DP), concentré émulsionnable (EC), granulé (GR), suspension concentrée (SC), concentré soluble (SL), granulés à disperser dans l'eau (WG), poudre mouillable (WP),	NETTY, Hoefakker, 2022. Formulation codes. [en ligne]. 16 novembre 2022. Disponible à l'adresse : https://www.cipac.org/index.php/m-p/further-information/formulation-codes
	Produits formulés	Est ce que le produit est composé d'un ou plusieurs co-formulants ?	
	Biofongicide	Utilisation directe de substances biologiquement actives produites par des organismes biologiques ou de processus métaboliques biologiques ou de substances extraites d'organismes en tant que prévention et traitement des maladies	Naili, I., Ababsa, D., & Bensalama, O. (2021). Les Biofongicides comme moyen de biocontrôle contre les champignons phytopathogènes.
Mode de transfert = Mécanisme physique ou biologique qui explique l'absorption, le déplacement, la distribution ou l'accrétion d'un produit phyto dans un organisme ou un milieu. (Source : Index Acta biocontrôle)	Contact	Produit phytopharmaceutique dont la ou les matières actives agissent sur l'agent pathogène ou sur le ravageur par contact.	INRA, Paris (http://www.inra.fr/); Terminology (A16.16)/CPAM, FAO, 2019, http://www.fao.org/faoterm/viewEntry/fr/?entryId=72492
	Translaminaire	Qualifie la propriété, pour une substance ou une préparation, de migrer à travers plusieurs couches de cellules d'un même organe.	Termium Plus, Services publics et Approvisionnement Canada, 2024
	Systémique	Produit phytopharmaceutique dont la ou les matières actives agissent sur l'agent pathogène ou le ravageur après pénétration, puis migration à l'intérieur de la plante.	INRA, Paris (http://www.inra.fr/); Terminology (A16.16)/CPAM, FAO, 2020, http://www.fao.org/faoterm/viewEntry/fr/?entryId=72491
	Eliciteur =SDP	Substances ou produits, naturels ou non, capables d'induire (ou de préparer à l'induction), chez les plantes traitées, un état de résistance aux bio-agresseurs	AFPP-CEB DT N°18, https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20143073290
Mode d'action = Mécanisme qui permet d'expliquer l'effet d'un produit phyto (Source : Index Acta biocontrôle)	Préventif	Qualifie une substance ou une préparation capable d'agir en empêchant l'installation d'un agent pathogène dans les tissus de l'hôte.	Index ACTA Biocontrôle 2023
	Curatif	Qualifie une substance ou une préparation capable d'arrêter une infection dont la phase parasitaire a été amorcée.	Index ACTA Biocontrôle 2023
	Eradiquant	Qualifie une substance ou une préparation qui supprime l'infection en éliminant le parasite après l'apparition des symptômes	Index ACTA Biocontrôle 2023
Cible	Mildiou	Est ce que le produit est homologué sur la cible mildiou ?	
	Oïdium	Est ce que le produit est homologué sur la cible oïdium ?	
	Blackrot	Est ce que le produit est homologué sur la cible blackrot ?	

	Pourriture grise	Est ce que le produit est homologué sur la cible nourriture grise ?	
	Autres	Est ce que le produit est homologué sur d'autres cibles ?	
Conditions d'usage	Dose/ha	Quantité (masse ou volume) de produit ou de substance active appliqué par unité de surface (dose/hectare) ou par hectolitre de bouillie (dose/hectolitre)	Guide Eco-Fruits - Rappel sur la notion de « dose de produit phytopharmaceutique », 2015, https://ephytia.inra.fr/fr/C/22296/Guide-Eco-Fruits-Rappel-sur-la-notion-de-dose-de-produit-phytopharmaceutique
	BBCH	Echelle de référence de la description des stades phénologiques	
	Modulation dose	Est-ce que une adaptation de la quantité de produit utilisée est possible ? Si oui dans quel contexte/en fonction de paramètres?	
	Cadence ou régles de décision pour le renouvellement	Nombre de jours entre le renouvellement de chaque traitement	Marchand, D. (2020). Stratégie de traitement 2020 en viticulture biologique.
	Intervalle minimum entre applications	Nombre de jours minimum entre le renouvellement de chaque traitement, défini lors de l'homologation	
	Stratégie d'emploi (avant/après la pluie)	Conseils d'utilisation par rapport à la pluie	
	Quantité de pluie nécessitant une adaptation de stratégie	Quelle quantité de pluie entraine un lessivage qui nécessite un renouvellement	
	Nombre maximum d'application par an	Nombre déterminé lors de l'homologation	
	Nombre minimum d'application par an	Quel est le nombre minimal d'application par an pour que le produit ait une efficacité du produit ?	
	Variation d'efficacité selon le nombre d'application	Est-ce l'efficacité du produit peut être influencée par le nombre d'application ?	
	Incompatibilité	Est-ce que ce produit est incompatible avec d'autres produits ou types de produits ? (Une incompatibilité de mélange ou une association qui entraine une baisse d'efficacité	
	Application en association ou en alternance avec d'autres produits	Est-ce qu'il est conseillé d'appliquer le produit en association ou en alternance avec d'autres produits ?	
	Risques de phytotoxicité	Effets néfastes sur les plantes (brûlures, nécroses, retard de croissance,...)	
	Type de buse	Est-ce que le type de buse à un effet sur l'efficacité du produit ?	
	Réglages de pulvérisation	Est-ce que différents réglages de pulvérisation ont été testés et quels sont les recommandations ?	Entretien et réglage du pulvérisateur, https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/ProtectionCultures/Troussepesticides/Fiche1.pdf
Mode d'application conseillé	Est-ce qu'il y a une ou des méthodes conseillées pour l'application du produit ?		
Stratégie et positionnement du produit	Positionnement du produit dans un programme de protection	Quel positionnement du produit est conseillé dans un programme de protection ?	
	Raisonnement du traitement	Réflexion autour de la cadence des traitements pour avoir une meilleur efficacité	
Efficacité	Facteurs les plus influants	Quels sont les facteurs qui influencent le plus l'efficacité du produit selon la firme ?	
	Recommandations	Quelles sont les recommandations d'utilisation du produit de la firme ?	
	Niveau de pression parasitaire maximum	Niveau de pression parasitaire maximum recommandé lors de l'utilisation du produit	
Facteurs avant application	Conditions de stockage	Est-ce que certaines conditions de stockage peuvent influencer l'efficacité du produit ?	

Facteurs pendant l'application	Heure d'application	Est-ce qu'il y a un moment de la journée à privilégier pour l'application du produit ?	
	pH	Est-ce que le pH de la bouillie a un effet sur l'efficacité du produit ?	
	Température	Est-ce que le moment d'application est à choisir en fonction de la température ? Quelle est son influence ?	
	Hygrométrie	Est-ce que le moment d'application est à choisir en fonction de l'hygrométrie ? Quelle est son influence ?	
	Rosée	Est-ce que le moment d'application est à choisir en fonction de la rosée ? Quelle est son influence ?	
	Nombre de faces traitées	Est-ce le nombre de face traité a une influence sur l'efficacité du produit ?	
	Ciblage face inférieure des feuilles	Est-ce le ciblage des faces traitées a une influence sur l'efficacité du produit ?	
	Taux de couverture	Proportion de la surface des organes recouvert par le produit après pulvérisation	
	Volume bouillie conseillé/ha	Volume du mélange du produit, généralement, dans l'eau qui sert de vecteur à une préparation phytopharmaceutique destinée à être appliquée par pulvérisation, arrosage ou trempage qui a pour but d'assurer une bonne répartition du produit phytopharmaceutique (mouillage, proportion de la surface des organes recouverte par le produit...)	Guide Eco-Fruits - Rappel sur la notion de « dose de produit phytopharmaceutique », 2015, https://ephytia.inra.fr/C/22296/Guide-Eco-Fruits-Rappel-sur-la-notion-de-dose-de-produit-phytopharmaceutique
	Dépôt de pulvérisation	Résidus de produits qui restent sur les feuilles et les fruits après pulvérisation	Cheraïet, A. (2020). Modélisation expérimentale et statistique des relations entre caractéristiques morphologiques de la vigne et dépôts de pulvérisation: application à l'agriculture de précision (Doctoral dissertation, L'institut Agro-Montpellier; Montpellier University).
Taille des gouttes	Le diamètre des gouttes de pulvérisation. Très fines (<1 5 0 µm), Fines (1 5 0 - 2 5 0 µm), Moyennes (2 5 0- 3 5 0 µm), Grosses (3 5 0- 4 5 0 µm), Très grosses (450 - 550 µm), Extrêmement grosses (> 550 µm)	Sébastien Codis, Bonnes pratiques pour la réduction de la dérive de pulvérisation, https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2019/03/PROWADIS_Flyers_032014_VF_taille_reduite.pdf	
Autres facteurs de pulvérisations	Est-ce que d'autres facteurs liés à la pulvérisation ont été étudiés ?		
Facteurs après application	UV	Est-ce que les UV ont une influence sur l'efficacité du produit ?	
	Lessivage	Perte de produit entraîné par les eaux de pluie	Molot, B., & Gaimon, C. (2004). Réduction des apports cupriques en viticulture biologique: étude du lessivage foliaire sous simulateur de pluie.
	Délai entre l'application et une pluie	Est-ce qu'il existe un délai entre l'application du produit et une pluie pour que l'efficacité du traitement ne soit pas impactée ?	
	Seuil de lessivage en mm	Seuil de quantité de pluie pour laquelle un renouvellement est nécessaire	Molot, B., & Gaimon, C. (2004). Réduction des apports cupriques en viticulture biologique: étude du lessivage foliaire sous simulateur de pluie.
	Température extrême	Est-ce qu'une température élevée peut influencer l'efficacité du produit après son application ?	
Autres	Pratiques culturales	Est-ce que les travaux réalisés à la vigne (taille, rognage, effeuillage) ont une influence ?	Boutin, F., & Payan, J. C. (2012). Viticulture et changement climatique: adaptation de la conduite du vignoble méditerranéen.
	Facteurs biotiques	Est-ce que des facteurs biotiques peuvent influencer son efficacité ? (Cépages, stade phénologique, âges des feuilles, âge de la vigne, densité de la canopée)	
Commentaires			
Références			



CERCLÉ Marion, Promotion 2021-2024, Les facteurs d'efficacité des produits de biocontrôle contre le mildiou de la vigne : une approche par le projet BIOVIMED, 40 pages, mémoire de fin d'études soutenu à VetAgro Sup Clermont-Ferrand le 20 septembre 2024.

Ce stage a reçu le soutien financier du ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire par l'intermédiaire du compte d'affectation spéciale « développement agricole et rural » (CASDAR) dans le cadre du projet Biovimed : « le BIOcontrôle en Vignoble MEDiterranéen : stratégies innovantes d'intégration en lien avec les particularités du climat méditerranéen »

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES :

- ♦ Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV)
- ♦ FranceAgriMer
- ♦ Ministère de l'agriculture et de l'alimentation

ENCADRANTS :

- ♦ Maître de stage : CONSTANT Nicolas (IFV)
- ♦ Tutrice pédagogique : MARLIAC Gaëlle

OPTION : Concevoir et accompagner l'innov'action en agronomie (CALICE)

RESUMÉ

Le mildiou est l'une des principales menaces pathogènes pour les vignobles et l'efficacité des traitements fongicides est de plus en plus compromise en raison de la résistance accrue des pathogènes et du retrait de certaines substances actives. Cela encourage l'adoption de solutions plus durables telles que les produits de biocontrôle, bien que leur efficacité soit souvent limitée et variable. Les résultats du réseau expérimental BIOVIMED montrent une grande variabilité dans l'efficacité de ces produits sur le mildiou, en grande partie liée aux caractéristiques spécifiques de chaque parcelle et de chaque année. Pour optimiser leur utilisation, il est crucial de connaître les spécificités et les conseils d'utilisation de chaque produit. La création d'une base de données générale est nécessaire pour recueillir et diffuser plus facilement ces informations. À partir des éléments recueillis, la qualité de pulvérisation, le positionnement des traitements et les lessivages ressortent comme les facteurs influençant le plus l'efficacité des produits testés. Les lessivages, la fréquence de renouvellement et le positionnement des traitements peuvent être intégrés dans un indicateur propre à chaque combinaison d'essai et de produit. Cet indicateur a montré qu'avec une protection à base de cuivre, chaque jour sans protection fait augmenter l'intensité d'attaque du mildiou. Pour remédier au manque d'informations sur les produits de biocontrôle et les interactions complexes influençant leur efficacité, il est crucial d'étudier les nombreux facteurs d'efficacité. En l'absence de ces données, les essais sur le terrain aboutissent souvent à des résultats décevants et limités, freinant ainsi la diffusion de ces solutions.

Mots clés : Biocontrôle, Mildiou, Substances naturelles, Facteurs d'efficacité, Réseau expérimental, Alternatives naturelles, Maladies cryptogamiques, Viticulture