



HAL
open science

Facteurs d'efficacité de la protection phytosanitaire liés au mode d'application à l'échelle de la parcelle viticole

Maude Lewis, Xavier Delpuech, Alexis Bourguignon, Adrien Vergès, Olivier Naud, Sébastien Codis

► To cite this version:

Maude Lewis, Xavier Delpuech, Alexis Bourguignon, Adrien Vergès, Olivier Naud, et al.. Facteurs d'efficacité de la protection phytosanitaire liés au mode d'application à l'échelle de la parcelle viticole. *Innovations Agronomiques*, 2024, 98, pp.373-387. 10.17180/ciag-2024-vol98-art26 . hal-04828071

HAL Id: hal-04828071

<https://hal.inrae.fr/hal-04828071v1>

Submitted on 9 Dec 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Facteurs d'efficacité de la protection phytosanitaire liés au mode d'application à l'échelle de la parcelle viticole.

Maude LEWIS^{1,3}, Xavier DELPUECH^{2,3}, Alexis BOURGUIGNON^{1,3}, Adrien VERGÈS^{2,3}, Olivier NAUD^{1,3}, Sébastien CODIS^{2,3}

¹ITAP, Univ Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France

²IFV Institut Français de la Vigne et du Vin, Montpellier, France

³UMT ECOTECH, IFV-INRAE-CTIFL, Montpellier, France

Correspondance : sebastien.codis@vignevin.com

Résumé

Un essai visant à étudier le rôle de l'application dans l'efficacité des traitements phytosanitaires, ici avec du cuivre et soufre, a été conduit en 2023 sur une parcelle entière d'une exploitation conduite en agriculture biologique au sud de la France, avec une pulvérisation de précision géoréférencée et de multiples répliques de chaque modalité. Grâce à une analyse statistique spatialisée de la présence d'oïdium utilisant un zonage issu de données de contrôle, un diagnostic d'efficacité différencié des 7 modalités évaluées a pu être posé en fonction de la pression de maladie, de la dose appliquée et de sa répartition sur les faces des rangs de vigne. Si la méthodologie expérimentale repose sur des techniques d'agriculture de précision, les conclusions qui en découlent sont applicables à tout type de matériel. Cette étude est une étape méthodologique dans l'évaluation de l'impact des méthodes d'application sur le biocontrôle.

Mots-clés : protection de la vigne, pulvérisation de précision, expérimentation de précision au champ, expérimentation phytosanitaire, oïdium

Abstract: Evaluating the efficacy of phytosanitary protection provided by spray applications in the field context Studying at vineyard block scale the factors of efficacy of phytosanitary protection related to spraying.

A trial that aimed at studying the role of spraying in the efficacy of phytosanitary treatments, in this case with copper and sulfur, was organized in 2023 over a whole vineyard block in an organic farming estate located in the south of France, with georeferenced precision spraying and many replications of each modality. Thanks to a spatialized statistics study of the presence of powdery mildew using a zoning derived from control data, a diagnostic of the differences of the efficacies of the 7 evaluated modalities was obtained and included disease pressure, applied dose and its distribution on the sides of vine rows. The methodology of the experiment rests on precision agriculture techniques. Yet, the conclusions that can be derived are applicable to any sprayer. This study is a methodological step towards evaluation of the impact of spraying methods on biocontrol.

Keywords: vine protection, precision spraying, *whole-of-block precision experiment*, *phytosanitary experiment*, *powdery mildew*.

1. Introduction

L'utilisation des produits de biocontrôle est amenée à s'accroître dans le contexte des politiques et stratégies nationales et européennes visant à limiter les quantités d'intrants phytopharmaceutiques de synthèse ou conventionnels et au retrait de nombreuses substances actives sur la base de leur profil toxicologique (Plans Ecophyto successifs, stratégie Farm To Fork, ...). Toutefois, le développement de



l'utilisation des solutions de biocontrôle au champ, et notamment sur vigne, reste assez limité en production, à l'exception notable du soufre.

L'efficacité démontrée en conditions contrôlées sur plantules et plantes en pot de nombreux produits à vocation de lutte contre les maladies cryptogamiques peine souvent à « passer l'échelle » dans les conditions très variables rencontrées au champ. Les efficacités sont souvent partielles et surtout irrégulières au vignoble. La difficulté de maîtriser au champ les conditions abiotiques d'utilisation des solutions est souvent évoquée comme un facteur a priori important de cette irrégularité. Ensuite, les conditions de test des produits de biocontrôle au laboratoire ou en serre sont très éloignées des conditions d'utilisation des produits en parcelle viticole (Roger et al., 2024 ; Crenn et al., 2024). Par conséquent, une des pistes consiste à identifier quels modes d'utilisation des produits (modalités de pulvérisation, cadences de renouvellement, conditions météorologiques lors de l'usage des produits) permettront de se rapprocher au champ des niveaux d'efficacité obtenus aux échelles où les conditions sont contrôlées. La démarche esquissée dans cet article a vocation *in fine* à permettre une évaluation agronomique multi-leviers à l'échelle du champ cultivé.

Dans cet article, nous présentons un essai destiné à tester une nouvelle manière d'expérimenter pour comprendre les effets des modalités de pulvérisation des produits sur l'efficacité de la protection contre les maladies, en prenant ici comme modèle l'oïdium de la vigne

2. Matériels et méthodes

Les éléments décrits dans cette section concernent en premier lieu la stratégie expérimentale, puis la description d'un pulvérisateur à commandes numériques qui permet d'appliquer une grande gamme de conditions d'application différentes sur une même parcelle, la description des modalités d'application étudiées, et enfin les principes d'analyse spatiale mobilisés dans la stratégie expérimentale.

2.1 L'expérimentation de précision au champ pour évaluer l'application de traitements de protection des plantes

Les résultats présentés dans cet article ont été obtenus en mettant en œuvre une nouvelle méthode d'expérimentation pour étudier la protection contre les maladies à l'échelle d'une parcelle viticole en production. Appelée « *expérimentation de précision au champ* », cette approche est inspirée à la fois de l'approche « *whole-of-block experimentation* » développée par Bramley et al. (2011) et Panten et al. (2010, 2012) et de l'approche « *On-farm precision experiment* » proposée par (Bullock et al., 2020). Elle repose sur l'utilisation des technologies de contrôle intra-parcellaire (« *Variable Rate Technologies* » en anglais) pour réaliser des expérimentations automatisées au niveau d'une parcelle ou d'un domaine agricole. Le principe est le suivant : une fois les facteurs à tester définis, les parcelles support des essais sont découpées en unités spatiales élémentaires (placettes). Les modalités à tester sont distribuées sur les unités élémentaires de façon randomisée et des cartes de commande géoréférencées sont produites pour une gestion automatique du plan d'expérience grâce aux technologies de contrôle intra-parcellaire.

2.2 Un pulvérisateur à commande numérique pour piloter automatiquement les modalités sur la parcelle d'essai.

Un prototype de pulvérisateur de précision a été développé en 2021 et 2022 dans le cadre du projet ABAPIC « *Accélération du Biocontrôle et des Agroéquipements pour la Protection Intégrée des Cultures* ». Dans le cadre de ce projet, l'Institut Français de la Vigne et du vin (IFV) et l'INRAE s'étaient donné pour objectif de mettre en place, en collaboration avec des partenaires industriels, des prototypes de pulvérisateur à commandes numériques permettant de piloter automatiquement et très précisément, en tout endroit de la parcelle, la dose de produit appliquée par hectare ainsi que la répartition du produit sur la plante. L'objectif de recherche poursuivi est d'étudier les effets sur la protection des modalités

d'application des produits de protection des plantes et en particulier pour les spécialités innovantes de biocontrôle. Les sociétés OPTIMA Concept (AgroSystem) et Berthoud (Supray Technologies) ont manifesté leur intérêt et ont mis au point un prototype répondant aux objectifs définis par IFV et INRAE. L'appareil a été développé sur la base d'un modèle WinAir : il s'agit d'un pulvérisateur de technologie jet porté et de configuration face par face, traitant deux rangs de vigne par passage. Il est équipé de quatre descentes disposant chacune de quatre hauteurs de buses, soit 16 buses au total (Figure 1). Le pulvérisateur est équipé de la solution de contrôle des buses SRP (*Smart Regulation Pressure*) développée par AgroSystem. Cette solution est basée sur la technologie PWM (« *Pulse Width Modulation* » ; buse à pulsation). Elle permet de modifier instantanément le débit d'un facteur de 1 à 4 au niveau de chacune des 16 buses équipant le pulvérisateur. Grâce à la technologie PWM, et à la différence des technologies basées sur des variations de pression, ces modifications de débit n'affectent pas les caractéristiques du jet pulvérisé en termes de granulométrie, ce qui est essentiel pour étudier précisément les méthodes d'application. Le prototype de pulvérisateur est équipé d'une console de commande développée par OPTIMA Concept (modèle Xenius) capable de lire des cartes de préconisation. Une carte de préconisation est une carte de consignes géolocalisées permettant de piloter le volume/ha appliqué par hectare au niveau de chacune des buses de l'appareil indépendamment de la vitesse d'avancement du tracteur. Le pulvérisateur est équipé d'un GPS RTK de précision centimétrique (correction Teria, www.reseau-teria.com).

Grâce à la possibilité de commande instantanée de chacune des 16 buses, le prototype de pulvérisateur permet de simuler différentes modalités d'application des produits sur la plante. Les modalités utilisées dans les résultats présentés sont décrites ci-après. Le volume/ha et la dose appliqués pour chaque modalité sont la résultante de la somme des débits de chaque buse. Le suivi en temps réel et l'enregistrement des paramètres d'application du pulvérisateur se font par l'intermédiaire d'un capteur de pression et de quatre débitmètres électromagnétiques de marque IFM positionnés sur chacune des descentes de l'appareil. Un enregistrement géoréférencé des débits instantanés et de la pression à une fréquence de 10 Hz permet de contrôler la précision dans l'application des volumes/ha consignes. Les technologies équipant le pulvérisateur prototype ainsi que les niveaux de performance en termes de précision sont détaillés dans Lewis et al ; 2024a, 2024b.

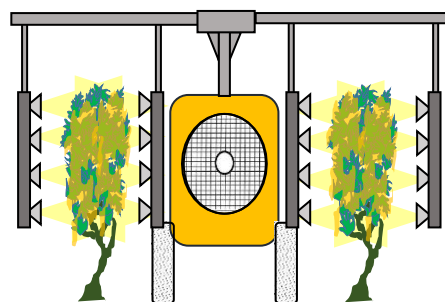


Figure 1 - Pulvérisateur Berthoud Win'Air équipé de la solution de contrôle des buses SRP (*Smart Regulation Pressure*) conçue par OPTIMA Concept® (AgroSystem) - (Crédit UMT ECOTECH (IFV-INRAE)).

2.3 Présentation des modalités testées sur la parcelle

Entre avril et juillet 2023, onze traitements phytosanitaires avec une bouillie comprenant cuivre et soufre ont été appliqués sur une parcelle de 1.03 ha de Carignan conduite selon le cahier des charges de l'agriculture biologique. La parcelle est située au Domaine Mas Piquet (Grabels, Hérault, Occitanie), domaine pédagogique du lycée viticole de Montpellier. La parcelle est conduite en gobelet sur un fil de palissage. Elle dispose d'un écartement entre rangs de 3 mètres et d'un espacement entre ceps sur le rang de 1 mètre.



Au total, 7 modalités croisant les facteurs « dose appliquée par hectare » (obtenu par variation du volume pulvérisé à concentration constante des produits dans la bouillie) et « mode de pulvérisation » (face par face et uniface) ont été testées sur l'ensemble de la saison. Le tableau 1 récapitule ces 7 modalités et le nombre de répétitions (nombre de placettes) par modalité. La dose N n'est pas une dose homologuée mais une dose de référence calculée avec l'outil d'aide à la décision DECITRAIT® de l'IFV (Davy et al. 2020). Il y a donc une dose/ha N pour le produit cuprique et une dose/ha N pour le produit à base de soufre. Il est à noter que seule la dose de soufre sera interprétée dans cet article en relation avec le contrôle de l'oïdium.

A l'exception de la modalité 2*N, chaque modalité de dose a été appliquée selon les deux modes de pulvérisation (cf. Tableau 1) : en face par face (FpF) ou en uniface (Uf) (Figure 2). La pulvérisation en face par face consiste à appliquer le produit de manière symétrique des deux côtés du rang. La pulvérisation en uniface est un mode de pulvérisation courant au vignoble. Il correspond à un mode de traitement très fréquent de la vigne par des appareils de type aéroconvecteur ou voûte pneumatique utilisée tous les 3 ou 4 rangs par passage. En traitement uniface, la végétation n'est ciblée que d'un seul côté du rang. Dans la suite de l'article, la face de rang qui est traitée est notée (Uf_TRUE) alors que la face de rang non-traitée est notée (Uf_FALSE).

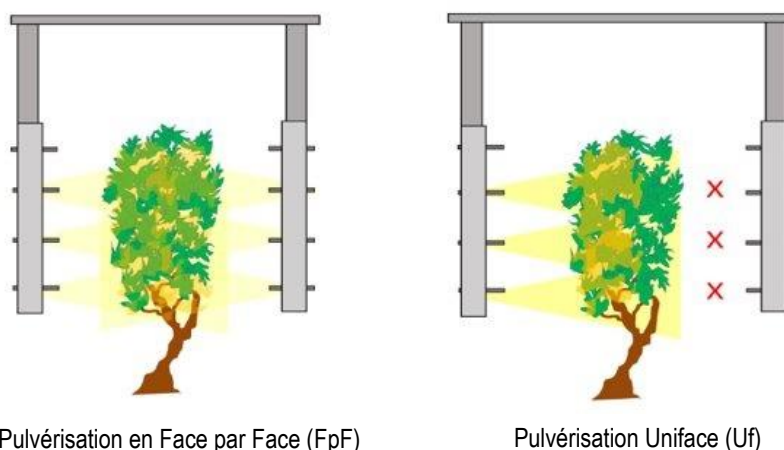


Figure 2 - Deux modes de pulvérisation étudiés dans l'essai.

Chacune des 7 modalités d'application a fait l'objet d'un nombre de répétitions compris entre 21 et 27 sur la parcelle. Une répétition d'une modalité correspond à l'application de la modalité sur une placette de 20 ceps consécutifs sur un rang, soit 20 m. Au total, l'essai comportait 171 placettes distribuées sur la parcelle.

Tableau 1 - Nombre de répétitions (placettes) par modalité sur la parcelle d'essai.

^a 1*N : dose/ha de référence issue de l'OAD DECITRAIT.

DOSE/HA	MODE DE PULVERISATION	
	Face par face - (FpF)	Uniface - (Uf)
0.7*N	24	27
1*N ^a	24	27
1.4 *N	21	27
2 *N	21	0
TOTAL	90	81

2.4 Mise en place du plan d'expérience sur la parcelle

Les 7 modalités ont été réparties aléatoirement sur les placettes au sein de 3 blocs disposés d'Est en Ouest sur la parcelle d'essai (figure 3).

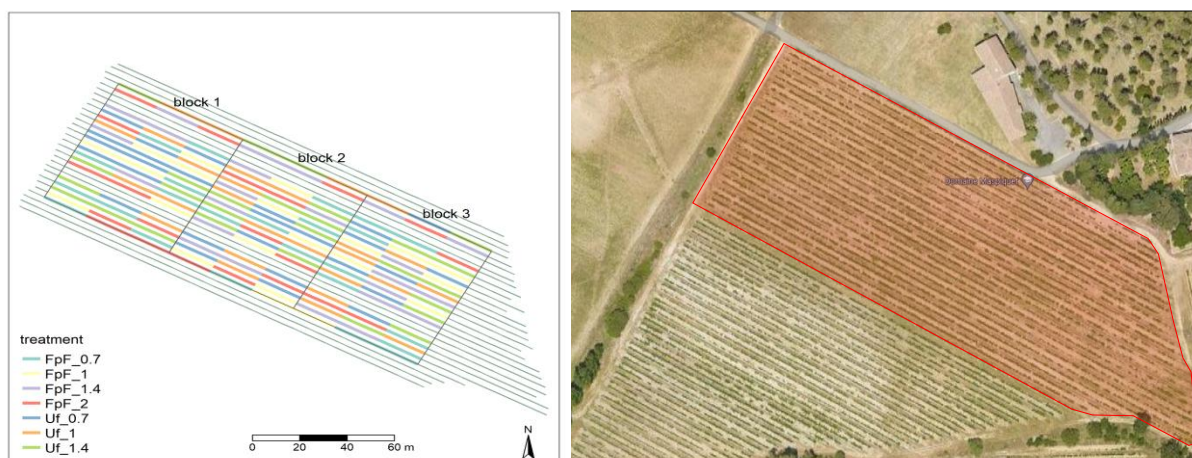


Figure 3 - Plan d'expérience comprenant les 171 placettes (surface totale des placettes 1.03 ha) sur la parcelle de Carignan (surface en fond rouge sur la photo de droite ; surface totale de 1.92 ha). Les rangs figurés en gris sur le schéma de gauche ne font pas partie de l'expérience et ont reçu la dose 1*N tout au long de la saison.

2.5 Programme des traitements phytosanitaires

Les onze traitements appliqués sur la parcelle expérimentale en 2023 sont récapitulés dans le tableau 2. La vitesse d'avancement du tracteur tirant le pulvérisateur était voisine de 4 km/h. Le pulvérisateur prototype était équipé de buses à fente Teejet XR80° de calibre ISO 02 sur les deux descentes de gauche et de calibre ISO 04 sur les deux descentes de droite. La pulvérisation a été effectuée à une pression hydraulique de 4 bars. Au cours de la saison, Le nombre de hauteurs de buses ouvertes a été adapté au selon la croissance de la végétation (de 2 à 4). La dose N a été calculée à partir de l'Outils d'Aide à la Décision DECITRAIT.

Tableau 2 - Traitements phytosanitaires appliqués sur la parcelle expérimentale en 2023. Les 3 colonnes « Cuivre métal appliqué », « Soufre appliqué » et « Volume appliqué » désignent les quantités appliquées pour les modalités avec la dose 1*N. Elles doivent être multipliées respectivement par 0.7, 1.4 et 2 pour les modalités 0.7*N, 1.4*N et 2*N. BBCH : échelle de phénologie.

N° TRAITEMENT	DATE	STADE BBCH	CUIVRE METAL APPLIQUE (KG/HA) 1*N	SOUFRE APPLIQUE (KG/HA) 1*N	VOLUME APPLIQUE (L/HA) 1*N
1	28/04/2023	15	0.1	3	76
2	04/05/2023	57	0.15	4	76
3	12/05/2023	57	0.3	5	76
4	22/05/2023	61	0.35	6	114
5	26/05/2023	61	0.35	6	114
6	02/06/2023	68	0.4	6	152
7	08/06/2023	75	0.3	2.7	152
8	15/06/2023	75	0.3	5	152
9	23/06/2023	77	0.3	2.4	152
10	04/07/2023	77	0.3	4	152
11	17/07/2023	80	0.3	3.2	152



Tableau 3 - Apport total en cuivre et en soufre sur la campagne selon la modalité de dose/ha testée.

MODALITE (DOSE/HA)	APPORT TOTAL EN CUIVRE (KG/HA) SUR LA CAMPAGNE	APPORT TOTAL EN SOUFRE (KG/HA) SUR LA CAMPAGNE
0.7*N	2.2	33.1
1*N	3.2	47.3
1.4*N	4.4	66.2
2*N	6.4	94.5

Le tableau 3 récapitule les apports totaux de soufre et cuivre sur l'ensemble des applications. Pour la plupart des produits contenant du soufre et utilisés en viticulture biologique, la dose homologuée de soufre est de 10 kg/ha (12.5 kg de produit commercial dosé à 80 % de soufre pur). Au total sur l'ensemble de la saison de traitement, 94.5 kg de soufre par hectare ont été appliqués sur la modalité 2*N, ceci pour 11 traitements, soit une moyenne de 8.6 kg/ha par traitement (dose de 10 % inférieure à la dose homologuée). Pour la dose 1*N, la moyenne par traitement a été de 4.3 kg/ha (soit donc 43 % de la dose homologuée de soufre).

2.6 Suivi des maladies sur la parcelle

Afin d'évaluer l'efficacité biologique des traitements phytosanitaires, un comptage des maladies basé sur une méthode que nous appelons « FAST » (*Frugal Analysis of Symptoms for whole-of-block Trials*) a été effectué sur les grappes les 11 et 12 juillet (BBCH 77). Cette méthode a été développée pour les besoins spécifiques des essais conduits selon le principe de l'expérimentation de précision au champ afin d'observer un grand nombre de micro-parcelles dans un court laps de temps. Contrairement à la méthode OEPP (2001, 2012) qui procède par organe, l'intensité de maladie est évaluée au niveau du cep entier. De chaque côté du rang, l'intensité d'attaque moyenne de la maladie observée sur l'ensemble des grappes visibles est notée. La notation de l'intensité de maladie consiste à attribuer une classe de 0 à 5, comme indiqué dans le tableau 4.

Le comptage n'a porté que sur l'oïdium ; le mildiou s'est très peu développé dans la parcelle. L'évaluation de l'oïdium a été conduite sur l'ensemble des 171 placettes. Les observations ont été réalisées sur les 10 ceps centraux (10m) des placettes de 20 ceps, afin d'éviter d'éventuels effets de bordure. Chaque cep a été observé de chaque côté du rang, ce qui correspond à 20 notations par placette en l'absence de ceps manquants.

Tableau 4 - Echelle de notation utilisée pour le protocole FAST. La troisième colonne indique la valeur quantitative considérée pour calculer une moyenne des intensités d'attaque pour chaque placette.

ECHELLE DE NOTATION	DESCRIPTION	TRADUCTION DE LA CLASSE QUALITATIVE EN VALEUR QUANTITATIVE
0	Nulle - maladie invisible	0 %
1	Traces (< 1 % des grappes attaquées) - doute sur la présence d'un peu de maladie	1 %
2	Facilement visibles (1 – 5 % des grappes attaquées) faible présence de maladie	4 %
3	Dégâts significatifs (5 à 20 % des grappes attaquées)	12 %
4	Dégâts importants (20% - 50 % des grappes attaquées)	35 %
5	Dégâts très importants (> 50 % des grappes attaquées)	75 %

L'intensité d'attaque de chaque placette (exprimée en %) a été calculée comme la moyenne des valeurs observées sur la placette après leur traduction quantitative, comme indiqué dans la troisième colonne du tableau 4.



3. Résultats et discussion

3.1 Analyse des données à l'échelle de la parcelle d'expérimentation

La Figure 4 présente les données d'intensité moyenne d'attaque d'oïdium calculée pour chacune des 7 modalités à l'échelle de la parcelle entière. Les points rouges représentent les 4 niveaux de doses pour la modalité face par face alors que les points bleus représentent les 3 niveaux de doses appliquées en uniface. Plus la dose de soufre augmente, plus les intensités d'attaque se distinguent entre les deux modes de pulvérisation. L'utilisation de doses réduites ($0.7*N$) ne permet pas de contenir la maladie et ce, quel que soit le mode de pulvérisation avec une intensité moyenne voisine de 20 %, préjudiciable pour la qualité de la vendange (Rousseau et al; 2013).

La réponse à la dose est faible pour la pulvérisation en uniface alors que l'effet dose est très marqué pour les modalités traitées en face par face où les 4 modalités de doses se distinguent au niveau statistique. En face par face, à la dose $2*N$ (mais également pour la dose $1.4*N$ dans une moindre mesure), le développement de l'oïdium reste faible sur l'ensemble des placettes. Cette faible variabilité du développement de la maladie sur les différentes placettes de la même modalité est exprimée par les intervalles de confiance sur la figure 4. De par la variabilité, les 3 modalités (Uf_0.7*N, Uf_1*N et Uf_1.4*N) ne se distinguent pas entre elles.

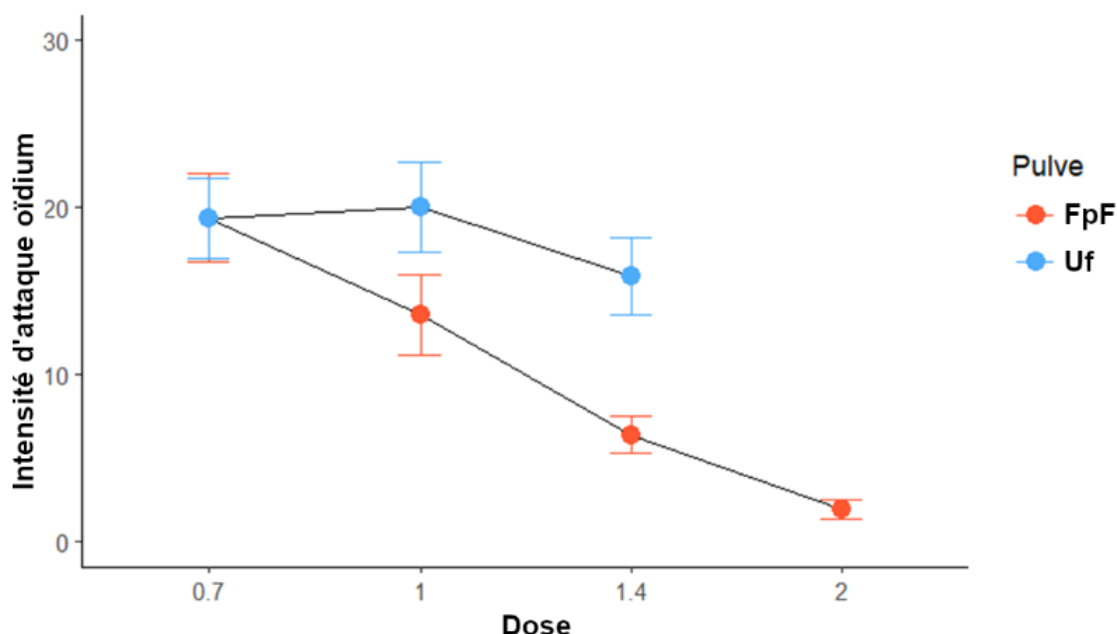


Figure 4 - Intensité d'attaque moyenne selon la dose/ha de produit appliquée et le mode de pulvérisation (Uf pour uniface, FpF pour face par face). Les valeurs moyennes d'intensité d'attaque sont accompagnées des intervalles de confiance à 95%. Les moyennes et intervalles de confiance sont calculés à partir des données unitaires (observations effectuées sur chaque face de chaque cep observé).

En pulvérisation uniface, un seul côté du rang a été ciblé lors du traitement. La figure 5 montre que du côté non traité (noté FALSE), l'intensité d'attaque pour les 3 niveaux de doses est voisine de 25 % alors que du côté traité (noté TRUE), les intensités d'attaque sont inférieures à 15 % pour les 3 niveaux de doses. L'intensité d'attaque relevée du côté non traité est constante et ne semble pas influencée par le niveau de dose appliqué sur le côté traité. A contrario, les comptages des maladies sur la face traitée montrent un développement de l'oïdium (différence significative à 5 %) significativement inférieur dans la modalité traitée avec la dose $1.4*N$ par rapport aux deux autres doses appliquées ($0.7*N$ et $1*N$).

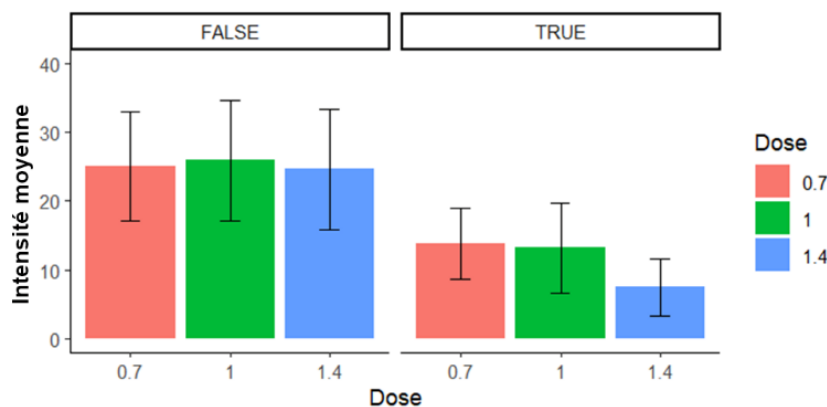


Figure 5 : Intensité d'attaque moyenne de la maladie et intervalle de confiance à 95% mesuré sur l'ensemble des placettes traitées en uniface (Uf). Présentation des résultats selon le niveau de doses appliquées (Uf_0.7*N, Uf_1*N et Uf_1.4*N) et la face de rang considérée (face traitée : TRUE, face non-traitée : FALSE).

L'interprétation proposée de ces observations est que le développement de la maladie sur la face non traitée est peu influencé par la dose appliquée sur la face traitée du cep (dans le cas d'un traitement au soufre). Le soufre agit par sublimation, et on pourrait éventuellement attendre un effet du côté non traité, là où on ne l'attendrait pas d'un produit de contact. Mais dans le cas présent, cet effet de sublimation semble donc avoir une portée assez restreinte au sein de la végétation. A l'inverse, il faut une dose par surface par feuille importante du côté traité pour freiner efficacement la maladie survenue de l'autre côté. En effet, les doses sont exprimées « cep complet » même en traitement uniface : une face traitée à 1.4*N en uniface reçoit sur les feuilles recevant de la pulvérisation l'équivalent de ce qui serait apporté par un traitement FpF à 2.8*N. Le caractère localisé et polycyclique de la maladie explique ces comportements.

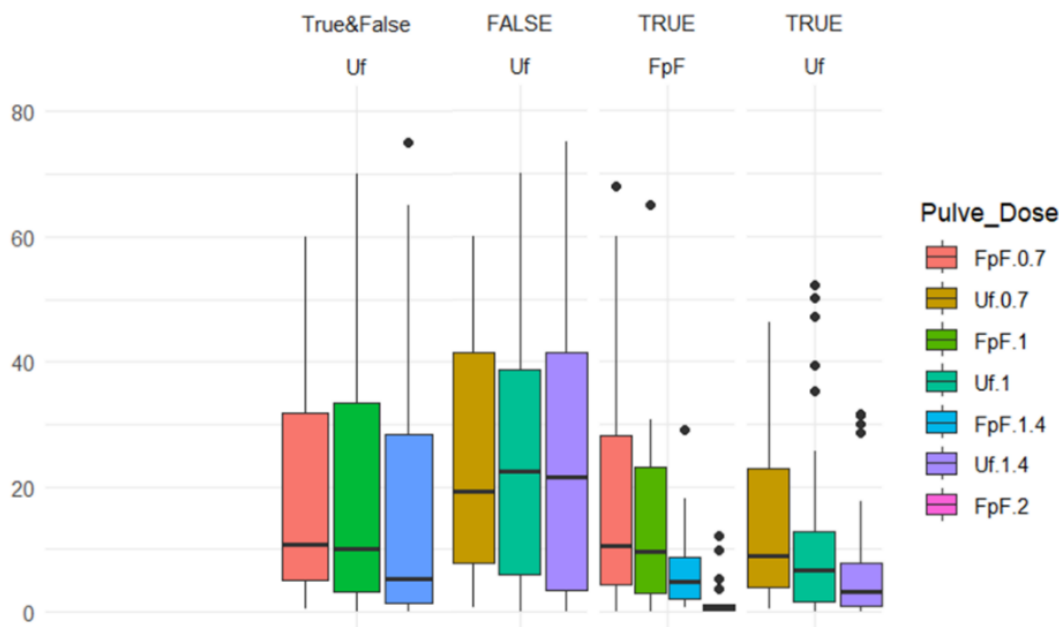


Figure 6 - Représentation des 7 modalités testées selon la distribution du développement de la maladie (intensité d'attaque exprimée en %) en utilisant un box-plot (25^{ème} centile, médiane, 75^{ème} centile). Utilisation des données obtenues à l'échelle des placettes unitaires pour chaque modalité (après moyenne par placette pour un côté du rang donné). Toutes les données FpF ne présentent que des côtés TRUE (face pulvérisée), alors que les données Uf présentent des données TRUE (face pulvérisée) et FALSE (face non pulvérisée). True&False désigne une utilisation combinée des données TRUE et FALSE pour Uf.

La figure 6 représente la distribution des intensités d'attaque observées dans les différentes placettes pour chaque modalité. Les intensités d'attaque pour les modalités directement ciblées (FpF et Uf_TRUE) diminuent fortement avec l'augmentation de la dose appliquée : ce constat se confirme quel que soit le quantile utilisé pour établir ces comparaisons (3^{ème} quartile, médiane et 1^{er} quartile). En effet, à la fois, les médianes et les hauteurs des boîtes à moustache diminuent avec l'augmentation des doses appliquées.

Pour les faces non traitées (Uf_FALSE), la figure 6 montre une grande amplitude du développement de la maladie selon les placettes. Cette amplitude ne dépend pas de la dose appliquée sur la face traitée. La cause de la variabilité du développement de la maladie en fonction des placettes est à rechercher dans l'influence de facteurs spatiaux que nous allons essayer de caractériser dans la suite.

De manière à aller plus loin dans l'analyse, il est donc apparu nécessaire de tenir compte de l'hétérogénéité spatiale du développement de la maladie à l'intérieur de la parcelle.

3.2 Prise en compte de l'hétérogénéité spatiale dans l'analyse des résultats des essais

Le nombre important de répétitions de chacune des modalités (entre 21 et 27) dans l'essai permet d'analyser la structure spatiale du développement de la maladie. La figure 7 représente des cartes interpolées du développement de l'oïdium obtenues par krigeage (logiciel GEOFIS : <https://www.geofis.org/fr/> (Leroux et al ; 2018)) à partir des intensités moyennes relevées dans les différentes placettes pour les modalités traitées à faible dose : Uf_0.7*N, FpF_0.7*N, Uf_1*N et FpF_1*N. La localisation des placettes utilisées pour créer la carte d'interpolation apparaît sous la forme de carrés.

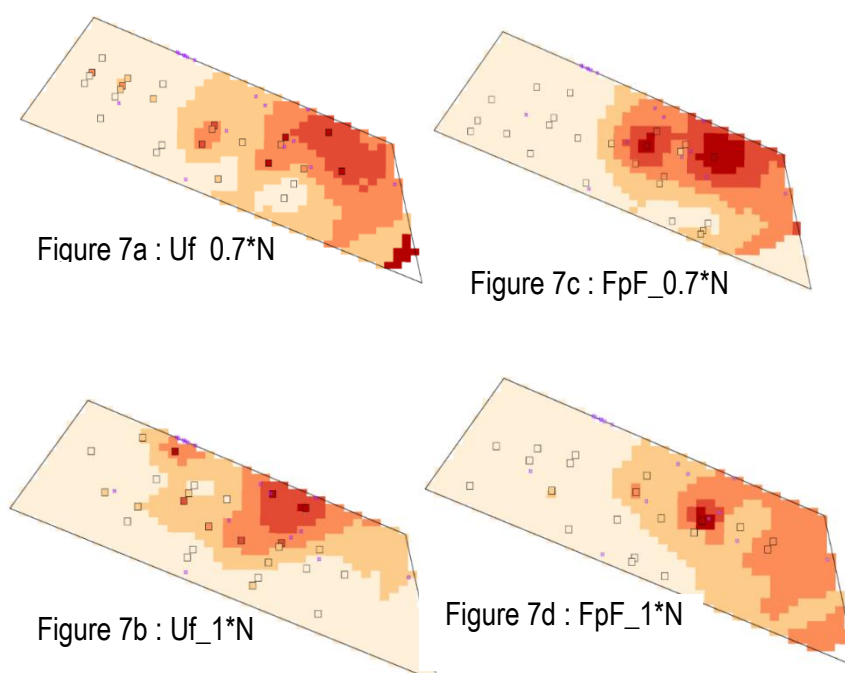


Figure 7 - Cartes d'interpolation obtenues par krigeage de l'intensité de l'oïdium sur la parcelle à partir des intensités relevées sur l'ensemble des placettes pour les modalités Uf_0.7*N (Figure 7a), Uf_1*N (Figure 7b), FpF_0.7*N (Figure 7c) et FpF_1*N (Figure 7d).

La structure spatiale du développement de la maladie sur la parcelle est similaire pour les modalités basées sur l'application des doses réduites (dose 0.7*N et dose 1*N) avec un gradient de maladie dans le sens Nord-Ouest Sud-Est et très peu de maladies du côté Ouest de la parcelle (Figure 7).

Pour aller plus loin dans l'analyse, un travail de prise en compte de la structuration spatiale de la maladie a été réalisé afin de contextualiser l'analyse de l'efficacité de la protection générée par chaque modalité



d'application. Une carte de pression relative de maladie sur la parcelle a été établie. La possibilité d'établir une telle carte est basée sur une hypothèse que nous allons vérifier. Comme le développement de la maladie sur les faces non traitées des modalités traitées en uniface ne semble pas dépendre de la dose reçue sur la face traitée (Figure 5 et 6), nous utilisons les données de maladies relevées sur les faces non traitées des placettes traitées en uniface (Uf et côté FALSE = non pulvérisé) comme des témoins non traités révélateurs de la pression locale de la maladie.

L'intensité d'attaque mesurée sur les faces non traitées des 81 placettes traitées en uniface a été utilisée pour établir une carte de développement de la maladie sur la parcelle. Un krigeage des données a été effectué avec le logiciel GEOFIS ainsi qu'un zonage du développement de la maladie (fonction zonage). Ce zonage a abouti à la définition de 3 zones différenciées en termes d'intensité de la maladie au sein de la parcelle (Figure 8).

La zone n°1 présente une faible intensité moyenne d'oïdium de l'ordre de 6 % ce qui est considérée comme une pression faible, la seconde présente une intensité moyenne de 21 % alors que la zone n°3 présente une intensité moyenne d'attaque de 42 % considérée comme une forte pression en oïdium.

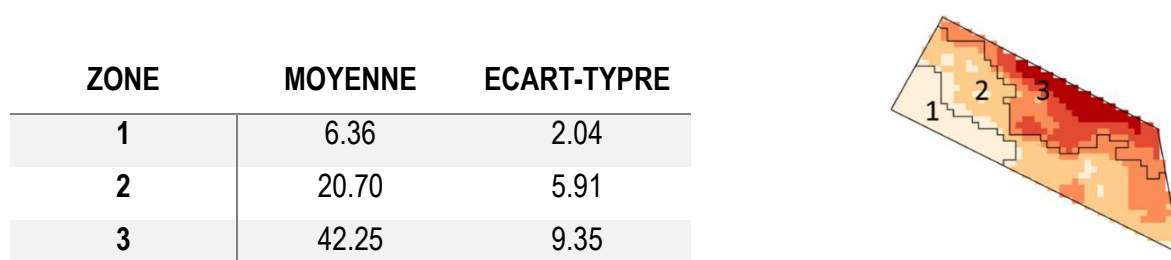


Figure 8 - Interpolation par krigeage et zonage en 3 zones des données d'intensité de maladie relevées sur les faces non traitées des modalités Uf (81 placettes). Le tableau à droite de la carte présente les moyennes des intensités d'attaque ainsi que l'écart type dans les 3 zones obtenues par zonage. Interpolation par krigeage selon les paramètres de variogramme : Pépité = 204.61, Palier partiel = 358.08, Portée = 32.64, Grille = 5 m, DistanceMax = 75 m. Zonage en 3 zones réalisé avec les paramètres : Longueur d'arrête minimum = 0.25 m, Distance entre attribut = Euclidienne, Distance entre zone = maximum, Nombre de points de la plus petite zone > 100.

La figure 9 ci-après représente les intensités moyennes de l'oïdium relevées dans chacune des 3 zones selon le niveau de doses appliquées en distinguant les faces non traitées (Uf_FALSE) des faces traitées (Uf_TRUE) des modalités traitées en uniface. La figure montre qu'à l'échelle de chacune des 3 zones, le développement de la maladie sur la face non traitée des ceps n'est pas influencé par la dose reçue sur la face traitée, ce qui était attendu puisque ces données ont été utilisées pour le krigeage et le zonage. La comparaison des médianes est un indice que le zonage post-krigeage n'a pas introduit de biais.

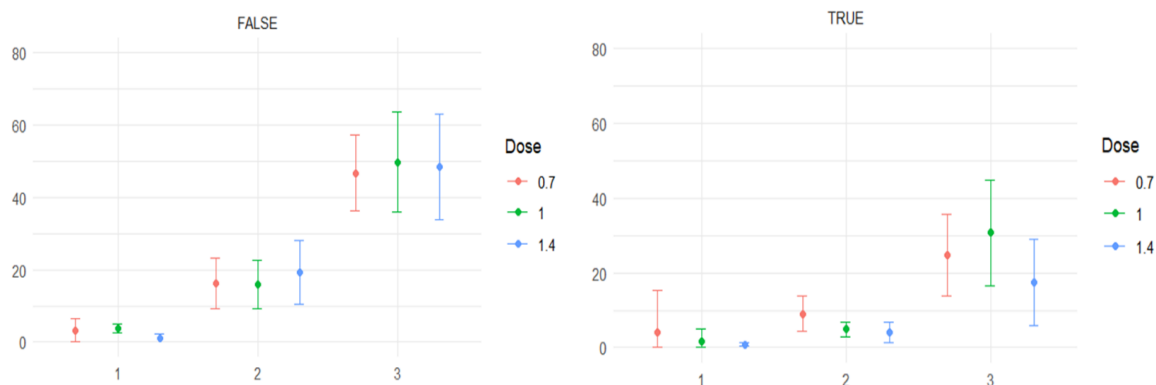


Figure 9 - Intensités moyennes de l'oïdium et intervalles de confiance à 95% relevées par zone (les numéros de zone correspondent à la figure 8) et par niveau de doses appliquées sur les faces non-traitées (Uf_FALSE) et les faces traitées (Uf_TRUE) des modalités traitées en uniface.

La figure 10 ci-dessous représente les intensités moyennes d'attaque pour les 2 modes d'application (FpF et Uf) en fonction du niveau de dose appliquée et selon la pression en oïdium, exprimée par le numéro de zone, 1 étant la zone de plus faible pression et 3 la zone de plus forte pression.

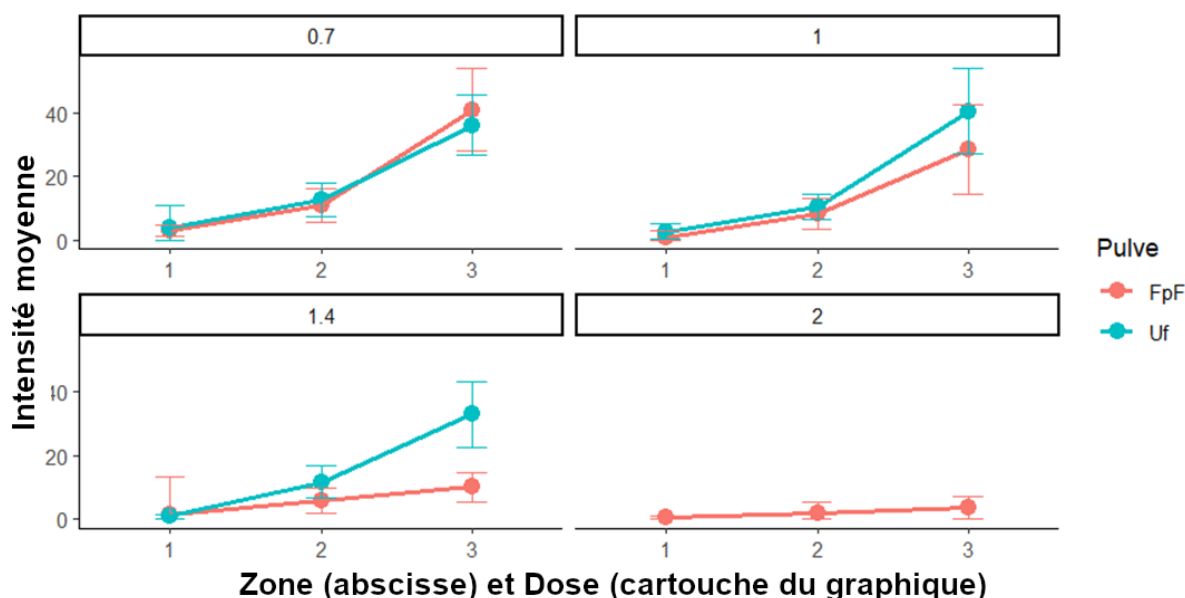


Figure 10 - Intensité moyenne de la maladie et intervalle de confiance à 95 % pour les 2 appareils (FpF et Uf) selon la zone considérée (1, 2 et 3) pour chaque dose appliquée. Les moyennes et intervalles de confiance sont calculés à partir des données moyennes calculées à l'échelle des placettes.

Les résultats de la figure 10 mettent en évidence un fort effet de la dose appliquée sur l'efficacité de la protection que nous allons analyser avec les modalités face par face (FpF) avant de nous pencher sur la pulvérisation uniface (Uf). L'utilisation de la dose 2*N en face par face (qui correspond à une dose moyenne appliquée par application proche de la dose homologuée de 10 kg de Soufre /ha) permet de contrôler la maladie dans l'ensemble des situations, y compris en condition de forte pression. L'application de la dose 1.4*N en face par face satisfait aux objectifs de production dans l'ensemble des conditions, malgré la moindre quantité de produit utilisée par rapport à la dose 2*N. Toujours en face par face, l'utilisation de la dose 1*N ne permet de satisfaire aux objectifs de production que dans les cas de moyenne pression et décroche en condition de forte pression. L'utilisation de la dose 0.7*N ne se



distingue pas de la dose 1*N en condition de pression moyenne mais décroche un peu plus pour le face par face en condition de forte pression.

Les conclusions pour les traitements réalisés en uniface sont sensiblement différentes. En conditions de forte pression, la protection décroche quel que soit le niveau de dose appliquée. En conditions de pression moyenne, l'effet dose est peu marqué avec le pulvérisateur uniface et le niveau de protection est moyen (efficacité de Abbott comprise entre 30 et 50 %). Il est intéressant de constater qu'en utilisant des doses réduites (0.7*N), les deux modes d'application ne se distinguent pour aucune des zones. Le mode de traitement est par contre très bien distingué au niveau de la capacité à gérer une pression élevée lorsqu'on regarde les comportements en doses 1*N et 1.4*N.

La figure 11 exprime ces mêmes résultats en les représentant selon le niveau de pression (selon la zone). La figure montre très clairement le décrochage de l'application en uniface quelle que soit la dose appliquée en condition de forte pression et une protection moyenne en cas de moyenne pression. L'effet dose est par contre plus visible sur les modalités face par face où chaque augmentation du niveau de dose appliqué se traduit par une diminution du développement de la maladie.

Il est à noter que le découpage en trois zones a permis de représenter 3 niveaux de pression car la parcelle présentait en fin de saison un gradient clair des intensités et les 3 zones résument ce gradient. Dans un autre contexte avec plusieurs foyers initiaux importants mais dispersés dans la parcelle, il aurait pu être nécessaire de distinguer plus de 3 zones puis de regrouper certaines en termes d'équivalence de pression. Ceci ne constitue pas une limite à la méthode, en veillant toutefois à ce que les zones présentent des contrastes suffisants en termes de valeurs de pression.

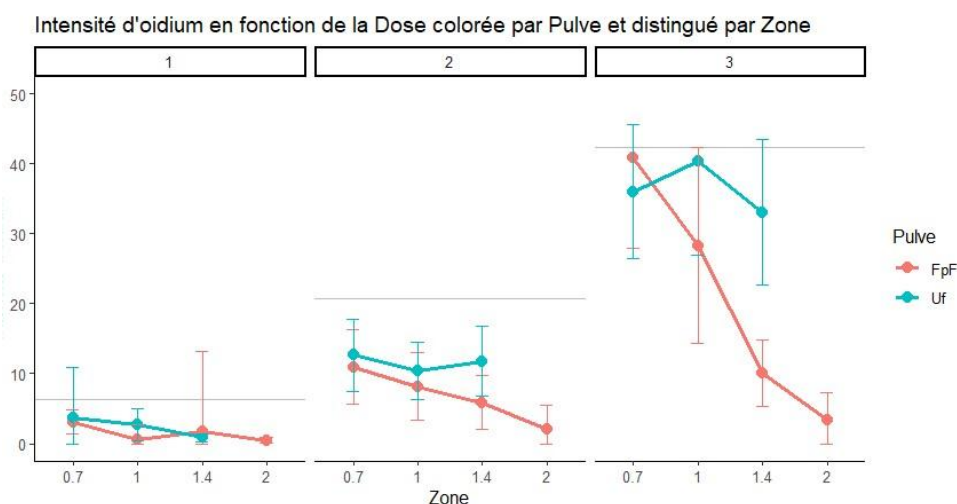


Figure 11 - Intensité moyenne de la maladie et intervalle de confiance à 95% pour les 2 modes d'application (FpF et Uf) selon la dose appliquée (0.7*N, 1*N, 1.4*N et 2*N) et la zone considérée (1, 2 et 3). Les barres grises horizontales représentent l'intensité d'attaque moyenne dans la zone considérée.

3.3 Discussion et enseignements de cette première expérimentation conduite selon le principe de « l'expérimentation de précision au champ ».

Cet article présente une nouvelle manière d'expérimenter les produits de protection des plantes destinée à étudier au champ l'impact des conditions d'application sur l'efficacité de la protection. La capacité à formuler des recommandations d'usage adaptées aux produits de protection des plantes, en particulier aux solutions de biocontrôle, est un enjeu essentiel pour accélérer leur passage à l'échelle. En effet, les biosolutions disposent le plus souvent d'une efficacité partielle et sont ainsi moins robustes aux diverses conditions environnementales et conditions d'application que les produits conventionnels (Crenn et al., 2024, Trouvelot et al., 2022). Le manque de connaissance des facteurs à l'origine de ces variabilités



d'efficacité limite actuellement fortement les perspectives de déploiement des biosolutions dans les itinéraires de protection (Roger et al ; 2024).

Or, le cadre de l'évaluation de ces solutions est resté celui des produits conventionnels (étude de laboratoire et test au champ selon les méthodes CEB). La méthode d'expérimentation présentée dans l'article a pour objectif de répondre à cet enjeu de formulation de recommandations d'usage adaptées aux solutions disposant d'une efficacité réelle mais variable.

4. Conclusions

La méthode proposée dans l'article pour évaluer l'influence des modalités d'applications sur l'efficacité de la protection phytosanitaire est basée sur le principe de « *l'expérimentation de précision au champ* ». Cette nouvelle façon d'expérimenter mobilise des technologies de pulvérisation de précision contrôlées numériquement pour mettre en œuvre de manière totalement automatisée sur la parcelle des plans d'expérience complexes où les différentes modalités étudiées peuvent être répliquées un grand nombre de fois à différents endroits de la parcelle.

Les résultats d'un premier essai de ce type conduit en 2023 sont présentés dans cet article. Différentes doses/ha de cuivre et de soufre et différents modes d'application des produits au sein du couvert végétal (pulvérisation face par face vs. uniface) ont été testés sur une parcelle de Carignan sensible à l'oïdium. Au total, 7 modalités différentes ont pu être testées sur 171 placettes de 20 mètres de long distribuées géographiquement au sein de la parcelle. Chaque modalité testée a fait l'objet d'un nombre important de répétitions à différents endroits de la parcelle (>20). Ce nombre important de répétitions a permis **d'intégrer a posteriori l'hétérogénéité** du développement de la maladie au sein de la parcelle dans l'analyse des résultats et ainsi de contextualiser les observations.

Les données d'intensité de maladie pour chaque modalité ont été analysées en tenant compte de la variabilité du développement de l'oïdium au sein de la parcelle. Trois zones ont pu être définies (faible, moyenne et forte pression). Les résultats mettent en évidence un effet très fort de la dose de soufre appliquée ainsi que du mode d'application en condition de pression moyenne et forte d'oïdium. Ces données sont utiles pour formuler des recommandations d'usage du soufre utilisé à dose réduite.

Cette méthode d'expérimentation continuera à être appliquée afin de tester des solutions de biocontrôle dans le cadre du projet ANR Ecophyto Maturation BIOSPRAYTECH (2024-2026) piloté par l'Unité Mixte Technologique (UMT) ECOTECH (IFV-UMR ITAP de l'INRAE Montpellier) en collaboration avec l'Unité Mixte de Recherche (UMR) Agro-écologie de l'INRAE Dijon. Le projet ambitionne de développer un service pour les sociétés qui produisent et distribuent des solutions de biocontrôle pour les maladies cryptogamiques de la vigne. L'objectif du service est de déterminer les façons d'appliquer une solution de biocontrôle pour en optimiser l'efficacité au champ.



Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article seront publiés en 2025 dans une revue de données. En tout état de cause, les données sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDi des auteurs

Olivier Naud (<https://orcid.org/0000-0001-5663-5062>), Sébastien Codis (<https://orcid.org/0000-0002-3095-0328>), Xavier Delpuech (<https://orcid.org/0000-0001-7278-3209>), Adrien Vergès (<https://orcid.org/0000-0002-1956-2201>),

Contributions des auteurs

Maude LEWIS : Conceptualisation, Préparation des données, Validation, Expérimentation, Rédaction initiale, Écriture, Administration du projet ; Xavier DELPUECH : Conceptualisation, Préparation des données, Méthodologie, Logiciel, Expérimentation, Écriture ; Alexis BOURGUIGNON : Expérimentation, Analyse formelle, Visualisation ; Adrien VERGÈS : Expérimentation, Écriture ; Olivier NAUD : Conceptualisation, Expérimentation, Écriture, Supervision, Acquisition de financement ; Sébastien CODIS : Conceptualisation, Méthodologie, Validation, Expérimentation, Rédaction initiale, Écriture, Visualisation, Supervision, Administration du projet, Acquisition de financement.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient le domaine MasPiquet support des essais biologiques présentés ainsi que les sociétés OPTIMA Concept et BERTHOUD pour leur implication dans la mise au point du prototype de pulvérisateur support de cet essai.

Déclaration de soutien financier

Le travail présenté a fait l'objet d'un appui financier dans le cadre des projets ABAPIC 2021-2022 (financement Plan de relance), ABC (financement régional Occitanie) (2023-2025) et ANR Ecophyto Maturation BIOSPRAYTECH (2024-2026, ANR 23 ECOM00004).



Références bibliographiques :

- Bramley R.G.V., Evans K.J., Dunne K.J., Gobbett D.L. (2011). Spatial variation in response to 'reduced input' spray programs for powdery mildew and botrytis identified through whole-of-block experimentation. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17: 341-350. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00153.x>
- Bullock D.S., Mieno T., Hwang J. (2020). The value of conducting on-farm field trials using precision agriculture technology: a theory and simulations. *Precision Agriculture* 21, 1027–1044. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09706-1>
- Crenn K., Dewaegeneire P., Formez P., Gouttesoulard C., Hascoet E., Merrer M., Turner M., (2024). Impact des facteurs abiotiques sur l'efficacité du biocontrôle. Dossier Biocontrôle : mode d'emploi. *Phytoma* N°772, mars 2024, pp.23-27
- Davy A., Raynal M., Vergnes M., Debord, Codis S., Naud O. , et al.. (2020). Decitrait® : un OAD pour la protection de la vigne. *Innovations Agronomiques*, 2020, 79, pp.89-99. (10.15454/7fk8-gt23). (hal-02983272)
- EPPO (2001). PP 1/004 Efficacy evaluation of fungicides. *Uncinula necator*. <https://pp1.eppo.int/standards/PP1-004-4>
- EPPO (2012). « PP 1/152 Evaluation biologique des produits phytosanitaires : Mise en place et analyse des essais d'évaluation biologique ». <https://pp1.eppo.int/standards/PP1-152-4-fr.pdf>
- Leroux C., Jones H., Pichon L., Guillaume S., Lamour J., Taylor J., ..., Tisseyre B. (2018). GeoFIS: An open source, decision-support tool for precision agriculture data. *Agriculture*, 8(6), 73.
- Lewis M., Codis S. , Ribeyrolles X. , Delpuech X., Trinquier E., Vergès A. et Naud O. (2024a). Des buses à pulsation pour une pulvérisation de précision en vigne. *Phytoma* N° 773 avril 2024 pp 42-46.
- Lewis M., Codis S., Ribeyrolles R., Delpuech X., Trinquier E. , Vergès A. Naud O. (2024b). Technological innovations in vineyard spraying: assessment of PWM technology and future prospects. *IVES Technical Review*. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2024.8211>
- Panten K., Bramley R. G. V., Lark R. M., & Bishop T. F. A. (2010). Enhancing the value of field experimentation through whole-of-block designs. *Precision Agriculture*, 11(2), 198–213.
- Panten K. and Bramley, R.G.V. (2012). Whole-of-block experimentation for evaluating a change to canopy management intended to enhance wine quality. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18: 147-157. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2012.00183.x>
- Roger M., Michi H., Champroux G., Boulon J-P., (2024). Biocontrôle : des exigences à connaître Dossier Biocontrôle : mode d'emploi. *Phytoma* N°772, mars 2024, pp.14-19.
- Rousseau J. , Blanc D., Jacus V. (2013). Oidium de la Vigne, vers une protection mieux raisonnée. *Phytoma* N°668, novembre 2013, pp 22-25.
- Trouvelot S., Magnin C., Callemeyn J, Jacquesn L., Daire X., Petitot, P. (2022). La pulvérisation : un levier majeur d'optimisation La qualité de pulvérisation constitue un point clé pour le criblage, l'application et l'efficacité de produits de biocontrôle. *Phytoma* N°755 juin-juillet , pp. 22-26.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.