



**HAL**  
open science

# Analyse du risque de mildiou de la vigne dans le Bordelais à partir de données régionales et d'informations locales collectées en cours de saison

Mathilde Chen

► **To cite this version:**

Mathilde Chen. Analyse du risque de mildiou de la vigne dans le Bordelais à partir de données régionales et d'informations locales collectées en cours de saison. Agronomie. Université Paris Saclay (COmUE), 2019. Français. NNT : 2019SACLA031 . tel-02457148

**HAL Id: tel-02457148**

**<https://pastel.hal.science/tel-02457148>**

Submitted on 27 Jan 2020

**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.

# Analyse du risque de mildiou de la vigne dans le Bordelais à partir de données régionales et d'informations locales collectées en cours de saison

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay  
préparée à AgroParisTech (l'Institut des sciences et industries  
du vivant et de l'environnement)

École doctorale n° 581 Agriculture, alimentation, biologie,  
environnement et santé (ABIES)  
Spécialité de doctorat : Sciences agronomiques

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 12 décembre 2019, par

**Mme Mathilde CHEN**

Composition du Jury :

|  |                          |
|--|--------------------------|
| M. Ivan SACHE<br>Professeur, AgroParisTech (UFR Ecologie, Adaptation,<br>Interactions) | Président                |
| M. François DELMOTTE<br>Directeur de recherche, INRA (UMR SAVE)                        | Rapporteur               |
| M. Samuel SOUBEYRAND<br>Directeur de recherche, INRA (UMR BioSP)                       | Rapporteur               |
| Mme Catherine ABADIE<br>Chercheur, CIRAD (UMR BGPI)                                    | Examineur                |
| M. David MAKOWSKI<br>Directeur de recherche, INRA (UMR Agronomie)                      | Directeur de<br>thèse    |
| M. François BRUN<br>Ingénieur, ACTA (UMR AGIR)   | Co-encadrant<br>de thèse |
| M. Marc RAYNAL<br>Ingénieur, IFV (UMT SEVEN)   | Invité                   |



## Avant-propos

Cette thèse a été financée par l'ACTA – les instituts techniques agricoles et l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA).



*ACTA – les instituts techniques agricoles*  
149, rue de Bercy  
75 595 Paris cedex 12



*UMR Agronomie – INRA, AgroParisTech, Université Paris Saclay*  
Avenue Lucien Brétignères  
78 850 Thiverval-Grignon

Le travail de recherche s'est appuyé sur la dynamique partenariale mise en place dans le cadre du RMT Modélisation et analyse de Données pour l'Agriculture et du projet CASDAR Smart PIC « Concevoir des outils pour l'aide à la décision en protection intégrée des cultures intégrant l'ensemble des leviers par la mobilisation de nouvelles données et de formalismes innovant ».



Les travaux de thèse ont été réalisés dans le cadre d'une convention CIFRE entre l'ACTA – les instituts techniques agricoles et l'INRA. La thèse a également bénéficié du soutien de l'institut de convergence #DigitAg.





## Remerciements

Par leurs réflexions, leurs relectures, leurs conseils ou leurs idées,  
A ce travail, de nombreuses personnes ont contribué.  
Les premiers que je tiens à remercier sont mes encadrants,  
Qui m'ont appris beaucoup en trois ans.

David et François,  
Grâce à vous, cette thèse s'est déroulée dans l'allégresse et la joie.  
En statistiques ou en agriculture numérique,  
Votre confiance et vos conseils ont toujours été bénéfiques.

J'adresse mes remerciements  
A François Delmotte et Samuel Soubeyrand,  
Pour avoir accepté, de cette thèse, être les rapporteurs,  
Et à Catherine Abadie et Ivan Sache, qui ont agréé d'en être les examinateurs.

Je remercie les membres du comité de pilotage de ce projet,  
Marc Raynal, François Piraux, Eric Gozet, Philippe Vissac et Alexandre Termier,  
Pour les connaissances et les conseils que vous avez apportés.

Un grand merci à Marc Raynal,  
Pour son expertise régionale,  
Et qui, avec David et François, tout au long de ce travail,  
M'ont accordé une disponibilité et une réactivité sans faille.

Je remercie les membres de la communauté technique,  
Grâce auxquels j'ai pu me sortir (un peu) des statistiques,  
Pour échanger et mieux connaître la viticulture du Bordelais,  
Marc Vergnes, Xavier Burgun et les collègues de l'IFV.

La recherche se nourrit d'échanges et de discussions,  
Et je remercie les chercheurs de l'INRA et d'autres horizons,  
A qui j'ai eu l'opportunité,  
De présenter des résultats, des hypothèses, des idées.

Certes, durant ces trois ans,  
J'ai passé de nombreuses heures derrière un écran,  
Mais je tiens à remercier ceux qui m'ont permis d'aller « sur le terrain »,  
C'est-à-dire aux participants des trois campagnes d'élicitation, ce n'est pas rien !

Que serait une thèse sans jardinage,  
Sans animations culinaires, sans partage,  
Sans session jeux ou sans *after-work* endiablés ?  
Pour cela, c'est l'ensemble de mes collègues que je voudrais remercier.

Merci aux membres de l'unité d'Agronomie de l'INRA,  
Avec qui il est toujours plaisant de parler bons petits plats,  
Agriculture biologique, pain au levain,  
Ou d'aller au No Water entre précaires pour partager un verre de vin.

Une pensée particulière à Damien, Maude et Margot,  
Avec qui il a été agréable de partager le bureau.  
Merci à tous les trois de m'avoir soutenue et encouragée,  
Ainsi que pour vos conseils avisés.

Je remercie également tous mes collègues de l'ACTA,  
Qui sont toujours là pour aller au Barracuda,  
Pour lancer une session jeux de société le midi,  
Répondre à mes questions administratives ou jouer au molky.

Par mes proches, je terminerai ces remerciements :  
Merci à ma famille, mes amis et Clément,  
Pour leur soutien inconditionnel,  
Leurs relectures et leurs encouragements exceptionnels.

A Bercy, en Guadeloupe ou à Grignon,  
En Italie, à Rouen ou sur Oléron,  
Toutes ces personnes et bien d'autres ont contribué  
A faire de ces trois ans un long jour d'été.

Merci à tous & bonne lecture !

## Table des matières

|   |            |
|---|------------|
| <b>Avant-propos .....</b>   | <b>3</b>   |
| <b>Remerciements .....</b>  | <b>5</b>   |
| <b>Liste des abréviations.....</b>  | <b>8</b>   |
| <b>Table des illustrations.....</b>   | <b>10</b>  |
| Liste des figures .....   | 10         |
| Liste des tableaux.....   | 15         |
| Liste des annexes .....   | 16         |
| <b>Partie I – Introduction.....</b>   | <b>21</b>  |
| <b>Chapitre 1. Introduction générale .....</b>  | <b>22</b>  |
| 1.1. Les pesticides : une assurance pour la production, un problème pour l’environnement et la santé humaine .....  | 22         |
| 1.2. La viticulture, une filière agricole consommatrice de pesticides en France.....  | 26         |
| 1.3. Le mildiou, bioagresseur responsable de 43 % des interventions dans le Bordelais.....  | 28         |
| 1.4. Moyens de lutte contre le mildiou de la vigne.....   | 35         |
| 1.5. Réduire l’utilisation de fongicides pour lutter contre le mildiou de la vigne .....  | 39         |
| <b>Chapitre 2. Problématique et organisation du manuscrit.....</b>  | <b>48</b>  |
| 2.1. Problématique et cas d’étude .....   | 48         |
| 2.2. Questions de recherche et organisation du manuscrit.....   | 50         |
| <b>Partie II – Matériel et méthodes.....</b>  | <b>55</b>  |
| <b>Chapitre 3. Matériel et méthodes .....</b>   | <b>56</b>  |
| 3.1. Démarche globale et schéma conceptuel de la thèse .....  | 56         |
| 3.2. Données .....  | 56         |
| 3.3. Utilisation des données disponibles.....   | 65         |
| 3.4. Schéma conceptuel de la thèse.....   | 66         |
| <b>Partie III – Résultats.....</b>  | <b>69</b>  |
| <b>Chapitre 4. Distribution des dates d’apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne dans le Bordelais.....</b>                                 | <b>70</b>  |
| 4.1. Abstract.....  | 72         |
| 4.2. Introduction.....  | 73         |
| 4.3. Materials and Methods.....   | 74         |
| 4.4. Results.....   | 78         |
| 4.5. Discussion.....  | 87         |
| <b>Chapitre 5. Estimation de la date d’apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne grâce à l’éllicitation probabiliste d’experts.....</b>      | <b>92</b>  |
| 5.1. Abstract.....  | 94         |
| 5.2. Introduction.....  | 95         |
| 5.3. Material and methods.....  | 97         |
| 5.4. Results.....   | 101        |
| 5.5. Discussion .....   | 110        |
| 5.6. Conclusion .....   | 113        |
| <b>Chapitre 6. Impact d’un report de la date de la première intervention sur le nombre de traitements et sur l’exposition des opérateurs.....</b>           | <b>114</b> |
| 6.1. Abstract.....  | 116        |
| 6.2. Introduction.....  | 117        |
| 6.3. Results.....   | 118        |
| 6.4. Discussion .....   | 124        |
| 6.5. Materials and methods .....  | 127        |
| <b>Chapitre 7. Impact de la date d’apparition des premiers symptômes de mildiou et du climat sur l’état sanitaire d’une parcelle en fin de saison .....</b> | <b>134</b> |
| 7.1. Abstract.....  | 136        |
| 7.2. Introduction.....  | 138        |

|  |            |
|--|------------|
| 7.3. Material and methods.....   | 139        |
| 7.4. Results.....  | 144        |
| 7.5. Discussion.....   | 150        |
| 7.6. Complément au Chapitre 7 .....  | 154        |
| <b>Partie IV – Discussion.....</b>   | <b>159</b> |
| <b>Chapitre 8. Discussion générale.....</b>  | <b>160</b> |
| 8.1. La date d'apparition du mildiou : un indicateur pour raisonner les traitements et anticiper l'état sanitaire en fin de saison.....                      | 160        |
| 8.2. Estimer la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou à partir de données régionales et d'information locale collectée en cours de saison..... | 167        |
| 8.3. Implications pratiques.....   | 169        |
| 8.4. Généricité des méthodes développées .....   | 172        |
| 8.5. Autres dispositifs de raisonnement des traitements.....   | 174        |
| <b>Chapitre 9. Conclusion générale.....</b>  | <b>178</b> |
| <b>Partie VI – Références bibliographiques.....</b>  | <b>181</b> |
| <b>Partie VII – Annexes.....</b>   | <b>203</b> |

## Liste des abréviations

|        |  |
|--------|--|
| ACTA   | Association de coordination des instituts techniques agricoles                             |
| AIC    | <i>Akaike Information Criterion</i>  |
| ANRT   | Association Nationale pour la Recherche Technique  |
| ANSES  | Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail |
| AOC    | Appellation d'origine contrôlée  |
| AOEM   | <i>Agricultural operator exposure model</i>  |
| AUC    | <i>Area under the (ROC) curve</i>  |
| BSV    | Bulletin de santé du végétal   |
| CASDAR | Compte d'affectation spéciale développement agricole et rural                              |
| CI     | <i>Confidence interval</i>   |
| CIFRE  | Conventions industrielles de formation par la recherche                                    |
| CIVB   | Conseil interprofessionnel du vin de Bordeaux  |
| CNRM   | Centre national de recherches météorologiques  |
| Cw     | <i>Calendar week</i>   |
| DRAAF  | Direction régionale de l'alimentation, l'agriculture et de la forêt                        |
| EFSA   | <i>European Food Safety Agency</i>   |
| EPI    | Equipement de protection individuelle  |
| EU     | <i>European Union</i>  |
| FAO    | <i>Food agricultural organization</i>  |
| FRAC   | <i>Fungicide Resistant Action Commitee</i>   |
| FREDON | Fédération régionale de défense contre les organismes nuisibles                            |
| GDM    | <i>Grape downy mildew</i>  |

|        |  |
|--------|--|
| GLM    | <i>Generalized linear models</i>   |
| IFT    | Indice de fréquence de traitement  |
| IFV    | Institut français de la vigne et du vin                                    |
| IGP    | Indication géographique protégée   |
| INAO   | Institut national de l'origine et de la qualité                            |
| INRA   | Institut national de recherche en agronomie                                |
| INSERM | Institut national de la santé et de la recherche médicale                  |
| NODU   | Nombre de doses unité  |
| NPMLE  | <i>Non-parametric maximum likelihood estimator</i>                         |
| OAD    | Outil d'aide à la décision   |
| OMS    | Organisation mondiale de la santé  |
| PHB    | Plant health bulletins   |
| PI     | Protection intégrée  |
| PPE    | <i>Personnal protection equipment</i>                                      |
| RCAI   | Résultat courant avant impôt   |
| RMSE   | <i>Root mean square error</i>  |
| ROC    | <i>Receiver operating characteristic</i>                                   |
| SAFRAN | Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige |
| SSP    | Service de la Statistique et Prospective du Ministère de l'agriculture     |
| TNT    | Témoin non traité  |
| UGVB   | Union girondine des vins de Bordeaux                                       |

## Table des illustrations

### Liste des figures

- Figure 1.1 : Quantité de pesticides (substances insecticides, herbicides, fongicides, biocides) utilisés et vendus dans le monde entre 1990 et 2016 ([données FAO](#)). .....22
- Figure 1.2 : Nombre moyen de traitements pour les différentes familles de pesticides appliqués dans une parcelle de vigne dans l'ensemble des bassins viticoles français et dans la région de Bordeaux durant les campagnes 2006, 2010, 2013 et 2016 (SSP, 2019a, 2015a, 2012, 2009). Un traitement désigne l'application d'un produit lors d'un passage (définition SSP). .....28
- Figure 1.3 : Schéma du cycle de contaminations primaires et secondaires de *Plasmopara viticola*, pathogène responsable du mildiou de la vigne. ....29
- Figure 1.4 : Symptômes de mildiou de la vigne sur feuilles et grappes. (a) : Symptôme « tache d'huile ». (b) : Tissus nécrosés à l'emplacement d'une ancienne « tache d'huile ». (c) : Sporulation du pathogène sur la face inférieure de la feuille infectée. (d) : Sporulation du pathogène sur baies de raisin (« rot gris »). (e) : Symptôme de « rot brun » sur grappe, avec taches brunes sur baies (baies « en coup de pouce », non fructifères). (f) : Symptômes de mildiou « mosaïque ». Source : M. Raynal (IFV) pour (a), (b), (d), et (e), D. Blancard, (INRA) pour (f). .....32
- Figure 1.5 : Schéma récapitulatif des différentes sources d'information mobilisables par les viticulteurs pour le raisonnement du premier traitement fongicide anti-mildiou. ....43
- Figure 1.6 : Descriptions du risque d'attaque de mildiou dans le Bordelais extraites de deux bulletins d'alerte : .....45
- Figure 3.1 : Carte représentant les communes dans lesquelles se trouvent les témoins non traités suivis entre 2010 et 2017 par l'IFV et ses partenaires (a) sur la façade atlantique (n = 543) et (b) dans la région de Bordeaux (n = 258). .....57
- Figure 3.2 : Nombre de sites-années suivis par année dans le Bordelais par l'IFV et ses partenaires entre 2010 et 2017. ....57
- Figure 3.3 : Schéma expliquant le positionnement du TNT et des placettes d'observation sur le TNT (source : protocole IFV, Annexe D). .....59
- Figure 3.4 : Exemples de (a) témoin non traité et de (b) placette fixe suivis par l'Institut Français de la Vigne et du Vin et ses partenaires durant la campagne 2017 dans le Bordelais. Le rang constituant le témoin non traité, les rangs de garde et les ceps de la placette fixe sont signalés par des rubans (Photos : F. Brun et M. Chen). .....60
- Figure 3.5 : Dernier pronostic de chaque expert au 18/06/2019 ; les participants sont regroupés par région (figure extraite du bulletin d'information édité le 18/06/2019). Le point de couleur représente la date médiane d'apparition du mildiou. Le trait horizontal gris correspond à l'intervalle de confiance à 90 %. Le losange noir représente la date à laquelle a été effectué le pronostic. Les pronostics sont anonymes ; chaque lettre correspond à un participant, réalisant son pronostic dans une seule région. L'étoile rouge correspond à la date d'apparition observée dans la parcelle de référence de l'expert. ....64
- Figure 3.6 : Evolution de la probabilité qu'une parcelle reste saine au cours du temps dans la région de Bordeaux ; la couleur de la courbe représente la méthode d'estimation de la probabilité. La courbe rouge représente l'estimation issue de la moyenne des derniers pronostics des experts de la région de Bordeaux. Les courbes bleues représentent la

|  |    |
|--|----|
| probabilité issue des analyses des observations des témoins non traités réalisées en 2010 (courbe supérieure) et 2018 (courbe inférieure). .....   | 65 |
| Figure 3.7 : Schéma conceptuel de la thèse. Les données utilisées pour répondre aux questions de recherche sont soulignées en bleu.....  | 66 |
| Figure 4.1: Number of observations collected per week and per year. ....   | 75 |
| Figure 4.2: Proportions of plots with symptomless vines (A) and bunches (B) estimated by non-parametric and parametric (log-normal model) survival analysis methods, over the period 2010-2017. Black and gray circles at the base of the graph indicate the estimated dates at which the proportion of symptomless plots decreased to 90%, 50%, and 10%, for the NPLME and loglogistic models, respectively. With non-parametric methods (i.e., NPLME method), the 10% level was never reached. Dashed lines indicate 95% confidence intervals. ....  | 79 |
| Figure 4.3: Examples of observed dates of GDM onset for two different years (2011 and 2015). Each point corresponds to a single untreated site in a Bordeaux vineyard. Recorded dates of symptom onset are represented by a palette of colors. Letters indicate censoring status as follows; N for non-censored data, R for right-censored data (the last recorded date is presented), L for left-censored data (the first recorded date is presented), I for interval-censored data (the first recorded date with an incidence of at least 1% of vines or bunches with symptoms is presented).....  | 80 |
| Figure 4.4: Proportions of plots with symptomless vines and bunches estimated by non-parametric (A, B), semi-parametric (Cox model, C, D), and parametric (log-normal model, E, F) survival analyses for 2011 (gray) and 2015 (black). Gray dots indicate the estimated dates by which the proportion of symptomless plots would decrease to 90%, 50%, and 10% in 2011, by method. Black dots indicate the estimated dates by which the proportion of symptomless plots would decrease to 90%, 50%, and 10% in 2015, by method. Dotted lines correspond to the 95% confidence interval estimated by log-normal model for each year.....  | 82 |
| Figure 4.5: Proportion of plots with symptomless vines (A) and bunches (B) estimated by semi-parametric (Cox model) and parametric (log-normal or log-logistic model) survival analyses in function of the average spring rainfall measured in 2011 (1.51 mm/day, grey lines) and 2013 (5.45 mm/day, black lines). Plain lines represent estimation for Cox models. Dotted lines represent the estimation of log-normal model for vines and log-logistic for bunches, respectively. Dots indicate the dates where the proportion of plots with symptomless vines or bunches reached 50% for each model. Grey dots represent the estimations for 2011 and black dots represent the estimations for 2013. Circle dots represent the estimations of Cox models and triangle dots represent the estimations of log-normal model for vines and log-logistic for bunches, respectively. .... | 84 |
| Figure 4.6 : Proportions of symptomless plots estimated each year with the parametric (log-normal model) and semi-parametric (Cox model, A, C, E) or non-parametric (NPLME model, B, D, F) models, on three different dates (weeks 22, 26, 31, i.e. early June, early July, early August). Gray and black circles correspond to vines and bunches, respectively. The numbers in the circles indicate the years.....  | 86 |
| Figure 4.7: Estimated proportions of plots with symptomless bunches for two different dates for the first observation of GDM symptoms on vines (week 22 and week 25). The dotted lines correspond to the 95% confidence intervals. Empty black and filled gray circles at the base of the graph indicate the estimated dates at which the proportion of symptomless  |    |

decreases to 90%, 50%, and 10%, for the Cox and the log-normal models, respectively. ....87

Figure 5.1: Expert elicitation using the “roulette” method implemented by MATCH Tool<sup>®</sup> (Morris et al., 2014). A: Empty histogram. Each column represents a 10-days interval between March 1st (0) and August 1st (150). B: Distribution of dates of appearance of downy mildew of the vine elicited by the expert. C: Density function adjusted to the elicited histogram in B. The vertical green and blue lines correspond to the 5<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile, respectively. D: Representation of the median (point) and of the 90% probability interval (bar). ....99

Figure 5.2: Elicited dates of the first downy mildew symptom appearance from three experts of the Bordeaux region (A, B and C) for three different vineyards in 2018. Each expert was elicited several times during the 2018 growing season (each row corresponds to a specific date of elicitation). The dates on which each elicitation is made are represented by black dots. The median date of onset of the first symptoms is represented by a grey dot. A horizontal line represents the 90% probability interval of this estimate. A vertical segment represents the date of appearance observed in each plot. In 2018, budburst and flowering were observed on April 5th and June 5th, respectively (Chambre d’Agriculture de Gironde, 2018a). ....102

Figure 5.3: Comparison of the median elicited date of appearance of the first symptoms of late blight of the vine estimated at the beginning (first elicitation) and end (last elicitation) of the season by each expert, in 2017 (A and B) and 2018 (C and D). Figures A and C represent the median dates obtained during the first (grey) and last (black) elicitation of each expert. In A and C, each row and each pair of points corresponds to one expert. Figures B and D represent the difference between the median dates estimated at the first and last elicitation as a function of the median date estimated at the first elicitation of each expert. The relationship between the median deviation and the estimated median early season date is shown for 2017 (B) and 2018 (D). ....103

Figure 5.4: Experts’ elicitation uncertainty levels in the first and last elicitation in 2017 and 2018. Figures A and C represent the number of days between the upper and lower limits of the 90% probability interval of the distribution of the appearance dates of the first symptoms of downy mildew elicited by each expert at the beginning (grey dots) and end of the season (black dots). Figures B and D compare the uncertainty levels of the first (x-axis) and the last elicitation (y-axis) of each expert. ....105

Figure 5.5: Elicited median dates of onset for each experts’ elicitation throughout the growing season (1 = first elicitation, 2 = second elicitation, etc.) in 2017 and 2018. Each dot indicates an elicited median date obtained with one expert. The distributions of the elicited median dates are described by boxplots (minimum, 1st quartile, median, 3rd quartile, maximum). The plain lines represent the medians of observed GDM onset dates in 2017 and 2018, while the dashed lines represent the 5th and the 90th percentiles of these observations. In 2017 in the Bordeaux region, budburst and flowering stages were observed on April 5th and May 30th (Chambre d’Agriculture de Gironde, 2017), respectively. In 2018, budburst and flowering were observed on April 5th and June 5th, respectively (Chambre d’Agriculture de Gironde, 2018b). ....107

Figure 5.6: Number of applications of anti-GDM fungicides resulting from the use of elicited dates of onset of disease symptoms (boxplots) or from observed dates of disease onset (horizontal lines) as the first date of application of the fungicide. Each dot indicates the number of fungicide applications obtained from the elicitation of one expert in one plot. The distributions of the estimated number of treatments resulting from expert elicitation

are described in the boxplots (minimum, 1<sup>st</sup> quartile, median, 3<sup>rd</sup> quartile, maximum). The plain lines represent the median number of fungicide treatments based on observed dates of GDM onset in the plots monitored in 2017 and 2018, while the dashed lines represent the 25<sup>th</sup> and the 75<sup>th</sup> percentiles (nearly undistinguishable in 2017).....108

Figure 5.7: Proportion of elicitations falling within each category of risk-rating system 1 and 2. Expert elicitation on risk of disease onset at mid May was conducted in late March 2017, early May 2017, early April 2018 and early May 2018.....109

Figure 5.8: Evolution of four experts' opinions on the risk of GDM onset at mid-May. The positions of the dots on the y-axis of the graphs indicate the probabilities of first symptom appearance provided by the elicited distributions. The number of the dot represents the risk category assigned to each expert's prognostic, according to the two qualitative risk rating systems defined in Table 5.1. ....110

Figure 6.1: Proportions of symptomless plots according to expert opinion or based on observed symptoms (decreasing survival curves in plain lines with 95% confidence intervals in dashed lines). Horizontal bars represent the 2.5% and 97.5% quantiles computed from each distribution and points correspond to medians, from top to bottom: dates of onset of the first GDM symptoms based on observed plots (light grey) and on expert elicitations (dark grey), first GDM fungicide spraying dates according to two surveys, IFV and SSP surveys (in black).....119

Figure 6.2: A: Number of anti-GDM fungicide sprays for different strategies to trigger the first fungicide application (based on expert elicitation or on observed dates of disease onset) and different treatment frequencies (F=1, i.e., one treatment per week, F=7/10, i.e., seven treatments every 10 weeks or one treatment every 10 days, F=1/2, i.e., 1 treatment every two weeks). Vertical lines represent the numbers of fungicide applications corresponding to current farmers' practices according the IFV survey (in blue) and SSP survey (in red). B: Same results expressed as relative differences in the number of fungicide applications (%) for different strategies to trigger the first fungicide application (based on expert elicitation or on observed dates of disease onset) and different treatment frequencies compared to current farmers' practices according the IFV survey (in blue) and SSP survey (in red). Horizontal lines represent 95% confidence intervals in both panels. ....121

Figure 6.3: Levels of reduction of operator exposure to 14 fungicide molecules for various operator protection scenarios. Each point represents the reduction of exposure to one molecule. Vertical lines indicate the median decrease in exposure achieved by different control strategies, specified above each line (D (1) = first application delayed until disease onset estimated by survival analysis + treatment applied every week; D (1/2) = same delay + treatment applied every two weeks; Eli (1/2) = first application delayed until disease onset estimated by probabilistic expert elicitation + treatment applied every two weeks). ....123

Figure 6.4: Additional reduction of operator exposure resulting from delayed first anti-GDM treatment combined with various operator protection scenarios, according to different GDM control strategies (D (1) = first application delayed until disease onset estimated by survival analysis + treatment applied every week; D (1/2) = same delay + treatment applied every two weeks; Eli (1/2) = first application delayed until disease onset estimated by probabilistic expert elicitation + treatment applied every two weeks).....124

|   |     |
|---|-----|
| Figure 7.1: Grape downy mildew (GDM) severity data on leaves after bunch closing (A) and imputed disease onset dates (B) in 151 untreated plots. Median contamination levels and median disease onset date are represented by vertical dotted lines. ....   | 140 |
| Figure 7.2: Mean monthly rainfall amount (A) and temperature (B) in March, April, May and June during the 2010 - 2018 period in the 151 untreated monitored plots. ....   | 141 |
| Figure 7.3: Illustration of the modeling framework implemented in this study. ....  | 144 |
| Figure 7.4: Area under the ROC curve (AUC) of several models used to predict occurrence of high level of GDM incidence and severity on leaves and bunches. ....   | 145 |
| Figure 7.5: Importance of the inputs used in random forest and gradient boosting models predicting the risk of high GDM severity on leaves at bunch closing stage. Models presented in A and B include all inputs (date and climate) and models presented in C and D include climate inputs only. The importance metric reflects the gain in the model performance resulting from the use of each input. ....   | 146 |
| Figure 7.6: Probability of high severity on leaves computed with gradient boosting according to different precipitation variations and to different levels of temperature increase. The median probability obtained with the initial precipitation and temperature is indicated by a dotted line. Each graphic shows the effect of precipitation change (from -15% to +15%) in a given month for a fixed level of temperature increase during the same month, while keeping all other climate variables unchanged. Each boxplot represents the distribution of the probability values over the vineyard plots of our dataset. ....  | 147 |
| Figure 7.7: Partial dependency plots of the four most important climate variables of gradient boosting (for severity on leaves).....  | 148 |
| Figure 7.8: Response of probability of high severity on leaves to date of disease onset estimated with the GLM and its 95% confidence interval (in green), and partial dependence plot obtained with the gradient boosting algorithm including climate inputs and date of disease onset (in red). Median, minimum, 1st and 3rd quartiles, and maximum of observed onset dates are represented by a dot and four crosses, respectively. ....   | 149 |
| Figure 7.9: Number of fungicide treatments applied to control GDM in Bordeaux vineyards as a function of a predefined triggering probability threshold (probability of high GDM severity on leaves). The black curve indicates the average numbers of fungicide treatments in the vineyard plots of our dataset computed while assuming that the first treatment is triggered only when the GLM probability of high severity exceeds the value given in the x-axis. Blue line represents the number of treatments for threshold = 0, i.e. when the first treatment is applied in all plots as soon as GDM symptoms are detected. Red and orange lines correspond to the average numbers of treatments recorded by the SSP in 2013 and 2010, respectively..... | 150 |
| Figure 7.10 : Représentation des données censurées simulées et des données imputées pour un site. La date non censurée du site est représentée par le point noir. Pour une taille d'intervalle donnée et un type de censure donnée, l'intervalle censuré est représenté par le trait noir horizontal. La date imputée est représentée par un point de couleur. ....   | 155 |
| Figure 7.11 : Erreur d'imputation (RMSE) de différentes méthodes d'imputation estimée pour plusieurs types de censure et plusieurs taille d'intervalle censuré.....   | 156 |
| Figure 8.1 : Proportion de parcelles saines (parcelles sans symptômes sur ceps) au cours de la saison estimée par analyse de survie en moyenne entre 2010 et 2017 (A) et pour les   |     |

|  |     |
|--|-----|
| millésimes 2011 et 2015 (B). Les courbes de survie estimées pour chaque millésime sont présentées en Annexe Q.....   | 161 |
| Figure 8.2 : Réduction d'exposition des opérateurs aux 14 molécules anti-mildiou les plus utilisées dans le Bordelais (Table 6.1). La réduction d'exposition est calculée en fonction des EPI portés, de la date du premier traitement anti-mildiou et de la fréquence de traitement (indiquée en semaine). La ligne verticale représente la réduction moyenne d'exposition (71 %). .....  | 163 |
| Figure 8.3 : Réduction du nombre de traitements anti-mildiou induit par l'application de la règle de décision étudiée dans le chapitre 4 de la thèse en fonction de la valeur du seuil de déclenchement du traitement (probabilité d'une incidence ou sévérité supérieure à la médiane en fin de saison). La réduction est calculée pour chaque type de dégât (incidence et sévérité sur feuilles et grappes, représentées par les différentes courbes d'une même couleur) par rapport au nombre de traitements induit par le seul report de la date du premier traitement à la date d'apparition (courbes grises) et par rapport au nombre de traitements anti-mildiou épandus dans le Bordelais en 2010 (bleu clair) et en 2013 (bleu foncé) (SSP, 2015a)..... | 167 |
| Figure 8.4 : Relation entre les dates estimées (axe des ordonnées) lors du premier et du dernier pronostic de chaque expert et les dates d'apparition observées sur le terrain (axe des abscisses) pour l'ensemble des experts du Bordelais élicités entre 2017 et 2019. Les croix matérialisent, pour l'ensemble des experts et des observations du terrain, les dates auxquelles le mildiou est apparu dans 10 (étoile de gauche), 50 (milieu) et 90 % (droite) des parcelles, respectivement. Les résultats par année sont présentés en Annexe T.....   | 169 |
| Figure 8.5 : Schéma d'un système d'assurance indicielle s'appuyant sur la prévision de la probabilité de forte attaque de mildiou estimée par les modèles présentés dans le Chapitre 7.....  | 171 |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1.1 : Facteurs climatiques influençant le cycle de développement de <i>Plasmopara viticola</i> .....   | 33 |
| Tableau 1.2 : Familles chimiques de fongicides anti-mildiou. Les molécules en italique peuvent être utilisées en biocontrôle (ACTA, 2018). Le nombre entre parenthèse après un nom de molécule indique le rang d'utilisation de la molécule en 2013 dans le Bordelais (sources : SSP, 2016). Les molécules en gras sont celles pour lesquelles un lien entre exposition et développement de certaines maladies est supposé (sources : INSERM, 2013). ..... | 36 |
| Tableau 1.3 : Tableau récapitulatif des différents modes d'action des fongicides anti-mildiou autorisés actuellement en viticulture en France (Association Technique Viticole 49, 2017 ; Chambre d'Agriculture du Tarn et al., 2019 ; « Mildiou », n.d.) .....   | 37 |
| Tableau 3.1 : Type d'observations par organe réalisées sur le réseau de TNT par l'IFV et ses partenaires afin de suivre l'évolution du développement des principales maladies cryptogamiques de la vigne. ....   | 61 |
| Tableau 3.2 : Tableau récapitulatif des différents types de données utilisés pour répondre aux différentes questions de recherche et du chapitre correspondant. ....   | 66 |

|  |     |
|--|-----|
| Table 4.1: Estimated parameters, exponential values for estimates, standard errors, and p values for each of the years surveyed (2010 to 2017) for the Cox model. Each estimate corresponds to difference in the rate of GDM appearance on vines or bunches of grapes between years, relative to 2010.....   | 83  |
| Table 4.2: Estimated parameters, exponential values for estimates, standard errors, and p values for each of the years surveyed (2010 to 2017) for parametric models (log-normal models). Each estimate corresponds to the difference in the rate of GDM appearance on vines or bunches between years relative to 2010.....  | 83  |
| Table 5.1: Probability ranges associated with the five risk levels of the qualitative systems 1 and 2. The score associated with an expert's elicitation corresponds to the probability range in which the expert median.....  | 101 |
| Table 5.2 : Quantiles 5, 25, 50, 50, 75 and 95% of the distribution of median appearance dates from experts' first and last elicitation and from the distribution of observed appearance dates. The quantiles reflect the variability of the expert opinions at first and last elicitation. Differences, in days, between estimated and observed quantiles are indicated in brackets. In 2017, budburst and flowering stages were observed on 5th April and May 30th (Chambre d'Agriculture de Gironde, 2017), respectively. In 2018, budburst and flowering were observed on April 5th and June 5th, respectively (Chambre d'agriculture de Gironde, 2018b). Date format: Month-Day. .... | 106 |
| Table 6.1: Main active substances, their associated fungicide products and maximum authorized sprayed quantity of each active substance used in each product used in the Bordeaux region to control GDM. The maximum permitted doses of pesticide were considered to compute the amounts of active substance used by an operator. ....   | 131 |
| Table 6.2: Operator protection scenarios involving PPE use and a closed tractor cabin. ....  | 132 |
| Tableau 8.1 Dates d'apparition des premiers symptômes de mildiou dans le réseau de témoins non traités suivis dans le cadre de la rédaction du BSV entre 2010 et 2018. La semaine correspondant à chaque date est indiquée entre parenthèse (source : Chambre d'Agriculture de Gironde, 2018a).....  | 160 |

## Liste des annexes

|  |     |
|--|-----|
| Annexe A : Annexe III de la directive 2009/128/CE - Principes généraux de la lutte intégrée des cultures. Par soucis de commodité, le titre de chaque principe a été abrégé. Tableau tiré de Barzman et al. (2015). ....   | 204 |
| Annexe B : Bulletin de Santé du Végétal Nouvelle Aquitaine Edition Nord Aquitaine n° 6 édité le 30 avril 2019 (source : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt Nouvelle Aquitaine).....  | 206 |
| Annexe C : Bulletin d'information n° 5 de la semaine n° 18 (29 avril au 6 mai 2019) édité hebdomadairement par l'IFV avec le soutien du CIVB (source : plateforme Epicure de l'IFV). ....  | 216 |
| Annexe D : Protocole de suivi d'une parcelle témoin dans le cadre de la surveillance biologique du Territoire pour la rédaction du BSV Vigne en Aquitaine et du suivi du réseau de témoins non traités déployé par l'IFV sur la façade atlantique (source : IFV). .... | 224 |

|  |     |
|--|-----|
| Annexe E : Notice d'utilisation de l'outil d'éllicitation probabiliste L-i-cite, utilisé par les experts élicités lors de la campagne d'éllicitation 2019 pour réaliser leur pronostic. Cette notice est disponible en ligne.....  | 229 |
| Annexe F : Bulletin d'information édité le 26 avril 2019 à partir des pronostics des experts sollicités lors de la campagne d'éllicitation 2019.....   | 241 |
| Annexe G: Supplementary data for Chapter 5.....  | 260 |
| Annexe H: Supplementary data for Chapter 6.....  | 261 |
| Annexe I: Levels of reduction of operator exposure to 14 fungicide molecules for various operator protection scenarios. Vertical lines indicate the median decrease in exposure achieved by different control strategies. Each cell represents results for different date of the first application and the color of the line indicates treatment frequency.....  | 262 |
| Annexe J : Additional reduction of operator exposure resulting from delayed first anti-GDM treatment combined with various operator protection scenarios, according to different GDM control strategies. Each cell represents results for different date of the first application and the color of the boxplots indicates treatment frequency. ....  | 263 |
| Annexe K: Supplementary data for Chapter 7.....  | 264 |
| Annexe L: Importance of the inputs used in random forest and gradient boosting models predicting the risk of high GDM incidence on leaves at bunch closing stage. Models presented in A and B include all inputs (date and climate) and models presented in C and D include climate inputs only. The importance metric reflects the gain in the model performance resulting from the use of each input. ....   | 265 |
| Annexe M: Importance of the inputs used in random forest and gradient boosting models predicting the risk of high GDM incidence on bunches at bunch closing stage. Models presented in A and B include all inputs (date and climate) and models presented in C and D include climate inputs only. The importance metric reflects the gain in the model performance resulting from the use of each input. ....  | 266 |
| Annexe N: Importance of the inputs used in random forest and gradient boosting models predicting the risk of high GDM severity on bunches at bunch closing stage. Models presented in A and B include all inputs (date and climate) and models presented in C and D include climate inputs only. The importance metric reflects the gain in the model performance resulting from the use of each input. ....   | 267 |
| Annexe O: Response of probability of high incidence or severity on leaves or on bunches to date of disease onset estimated with the GLM and its 95% confidence interval (in green), and partial dependence plot obtained with the gradient boosting algorithm including climate inputs and date of disease onset (in red). Median, minimum, 1st and 3rd quartiles, and maximum of observed onset dates are represented by a dot and four crosses, respectively.....  | 268 |
| Annexe P: Number of fungicide treatments applied to control GDM in Bordeaux vineyards as a function of a predefined triggering probability threshold (probability of high GDM incidence or severity on leaves or on bunches). The black curve indicates the average numbers of fungicide treatments in the vineyard plots of our dataset computed while assuming that the first treatment is triggered only when the GLM probability of high severity exceeds the value given in the x-axis. Blue line represents the number of treatments for threshold = 0, i.e. when the first treatment is applied in all plots as soon as |     |

|   |     |
|---|-----|
| GDM symptoms are detected. Red and orange lines correspond to the average numbers of treatments recorded by the SSP in 2013 and 2010, respectively.....   | 269 |
| Annexe Q : Proportion de parcelles saines (parcelles sans symptômes sur ceps) par millésime entre 2010 et 2017 estimée par analyses de survie non paramétrique (NPMLÉ, courbes bleues) et paramétrique (modèle log-normal, courbes grises). Les points bleus et gris à la base du graphique indiquent les dates estimées auxquelles la proportion de parcelles saines atteint 90, 50 et 10 % pour les analyses non paramétriques et paramétriques, respectivement. Les courbes en pointillés représentent les intervalles de confiance à 95%. .....                               | 270 |
| Annexe R : Comparison of the median elicited date of appearance of the first symptoms of grape downy mildew estimated at the beginning (first elicitation) and end (last elicitation) of the season by each expert, in 2017, 2018 and 2019. The difference between the median dates estimated at the first and last elicitation is represented as a function of the median date estimated at the first elicitation of each expert. The relationship between the median deviation and the estimated median early season date is shown for 2017, 2018, 2019 and for all years. .... | 271 |
| Annexe S: Experts' elicitation uncertainty levels in the first and last elicitation in 2017, 2018, 2019. The uncertainty levels of the first (x-axis) and the last elicitation (y-axis) are compared for each expert elicited each year and for all years.....  | 272 |
| Annexe T: Relation entre les dates estimées (axe des Y) lors du premier et du dernier pronostic de chaque expert et les dates d'apparition observées sur le terrain (axe des X) pour l'ensemble des experts du Bordelais élicités à chaque campagne d'élicitation menées entre 2017 et 2019.....  | 273 |





PARTIE I

—

INTRODUCTION

## Chapitre 1. Introduction générale

### 1.1. Les pesticides : une assurance pour la production, un problème pour l'environnement et la santé humaine

Les « pesticides », ou produits phytosanitaires, désignent un ensemble large de produits regroupant les produits phytopharmaceutiques (herbicides, insecticides, fongicides), certains biocides et certains médicaments vétérinaires (ANSES, 2014). L'utilisation des pesticides est majoritairement orientée vers la lutte contre les bioagresseurs des cultures, qui sont à l'origine de pertes de récolte directes et indirectes (Zadoks et Schein, 1979). A l'échelle mondiale, on estime que les pertes de rendement dues aux ravageurs et aux maladies atteignent entre 17 et 30 % en moyenne (Savary et al., 2019).

Entre 1990 et 2016, la production et les ventes de pesticides ont augmenté de 80 % dans le monde (Figure 1.1), permettant notamment d'augmenter les rendements, de stabiliser la production agricole mondiale et d'améliorer la qualité des récoltes et des aliments (Cooper et Dobson, 2007 ; Oerke et Dehne, 2004). Cependant, l'usage intensif de produits phytosanitaires affecte leur efficacité et est associé à des effets indésirables sur l'environnement et la santé humaine.

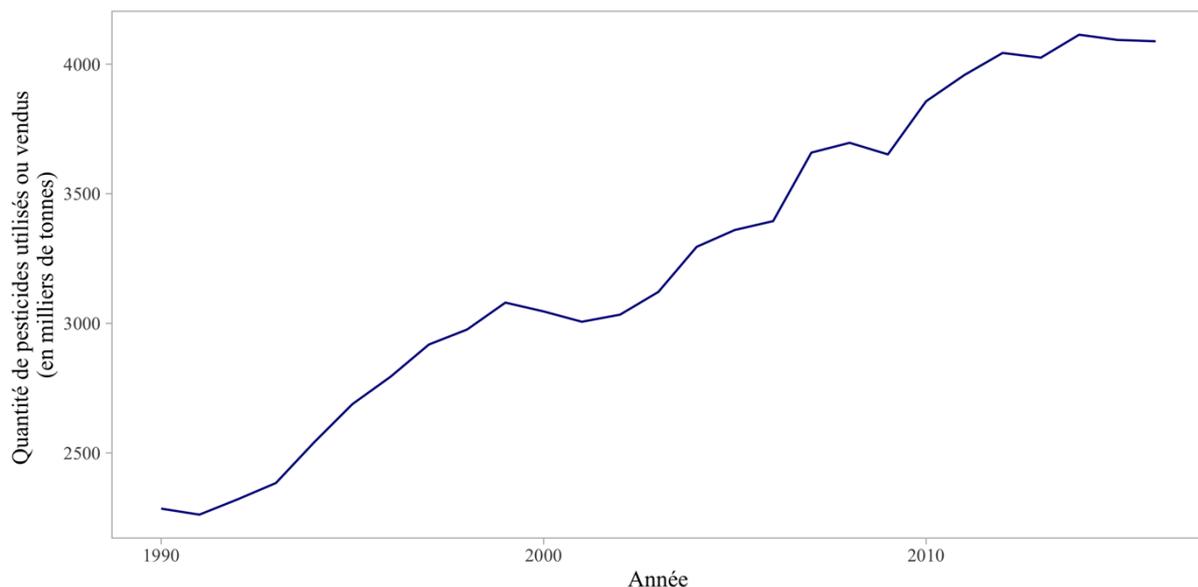


Figure 1.1 : Quantité de pesticides (substances insecticides, herbicides, fongicides, biocides) utilisés et vendus dans le monde entre 1990 et 2016 ([données FAO](#)).

Le recours aux produits phytosanitaires, au détriment de stratégies de lutte plus complexes, a permis de simplifier les systèmes de cultures. Cependant, cette simplification, associée à une utilisation répétée de certaines substances actives a abouti à l'apparition de phénomènes de résistance, notamment aux herbicides (Busi et al., 2013), aux insecticides (Jensen, 2000) et aux fongicides (Lucas et al., 2015). En France, les résistances aux pesticides concernent aujourd'hui une majorité des bioagresseurs clés des cultures fruitières, certains bioagresseurs

de la vigne et en grandes cultures (Fungicide Resistant Action Committee, 2019 ; « Statut des résistances en France » – R4P).

Ces adaptations biologiques conduisent à des pertes d'efficacité, à l'augmentation globale des quantités de produits appliqués et, à terme, à l'abandon de certaines molécules pouvant conduire à des impasses phytosanitaires. Le nombre de molécules disponibles sur le marché (Jensen, 2015) et le nombre de substances actives en cours de développement diminuent (McDougall, 2013). Ainsi, l'utilisation durable des produits phytosanitaires est déterminante pour préserver l'efficacité des substances actives disponibles.

De plus, l'utilisation massive des pesticides est responsable de la contamination de l'ensemble des milieux naturels par de nombreuses substances actives. Aujourd'hui, ces molécules se retrouvent dans l'eau (Sánchez-Bayo et al., 2016), l'air (Shunthirasingham et al., 2010) et les sols (Goulson, 2013). Elles impactent directement la survie, la croissance et la reproduction d'organismes vivants non cibles (Arena et Sgolastra, 2014 ; Brittain et al., 2010 ; DeLorenzo et al., 2001 ; Mineau, 2005 ; Pelosi et al., 2014), entraînent une réduction de la diversité d'espèces et de leurs populations (Beketov et al., 2013) et altèrent les services écosystémiques qui en découlent (Geiger et al., 2010 ; McMahan et al., 2012).

De nombreuses études épidémiologiques (Mostafalou et Abdollahi, 2017) mettent en évidence une relation entre santé humaine et exposition aux pesticides, c'est-à-dire le « contact entre une personne et un contaminant à concentration donnée pendant une période de temps donnée » (ANSES, 2014). L'impact sur le développement de maladies malignes (Chen et al., 2015 ; Liang et al., 2016), neurodégénératives (Moisan et al., 2015 ; Pezzoli and Cereda, 2013), reproductives (Skakkebaek et al., 2016), développementales (Schmidt et al., 2017), respiratoires (Mamane et al., 2015) et métaboliques (Le Magueresse-Battistoni et al., 2017 ; Maqbool et al., 2016) a été démontré avec des niveaux de preuves inégaux (INSERM, 2013 ; Kim et al., 2017).

L'exposition aux pesticides peut se faire par ingestion, inhalation ou encore par absorption cutanée (ANSES, 2014). Certaines personnes sont exposées aux pesticides dans le cadre professionnel. A l'échelle mondiale, on estime qu'environ 1,8 milliard de personnes travaillent dans l'agriculture et que la grande majorité utilise des pesticides pour protéger les aliments et les produits commerciaux (Alavanja, 2009). En France, l'exposition professionnelle touche une part significative de la population. Le recensement agricole dénombrait plus d'un million de personnes travaillant dans le secteur agricole en 2010, auxquelles s'ajoutent plusieurs dizaines de milliers de travailleurs occasionnels (ANSES, 2014).

Les personnes en charge de l'entretien des voiries et voies ferrées, des espaces communaux, des terrains de sports et de loisirs, de la désinsectisation des locaux, de l'hygiène publique et des soins vétérinaires, les jardiniers et les paysagistes, ou encore les personnes intervenant dans le traitement des bois ou dans la manipulation de bois traités peuvent également être exposés dans le cadre professionnel (INSERM, 2013). L'exposition non professionnelle touche une part encore plus importante de la population française. Elle provient de l'usage de pesticides par des particuliers lors de différentes activités (jardinage, bricolage, traitement vétérinaire des animaux domestiques), mais également de la contamination de

l'environnement (air extérieur et intérieur, sols ou poussières intérieures) et de l'alimentation (INSERM, 2013).

Parmi les personnes confrontées à l'exposition non alimentaire aux pesticides, les opérateurs (voir encadré ci-dessous) font partie des personnes pour lesquelles le risque de développer des maladies liées à l'exposition aux produits phytosanitaires est le plus important (OMS, 2018). Par exemple, le risque de développer certains cancers (Viel et Challier, 1995), la maladie de Parkinson (Kab et al., 2018) et certains problèmes neurologiques (Baldi et al., 2001) est plus important chez les travailleurs viticoles que chez la population générale.

Les quatre classes de populations confrontées à l'exposition non alimentaires aux pesticides définies par l'EFSA (European Food Safety Authority, 2014a) :

**Les opérateurs (*operators*) :**

désigne les personnes impliquées dans des activités liées à l'application des pesticides (le mélange/chargement du produit dans la machine d'application, le fonctionnement de la machine d'application, la réparation de la machine d'application pendant qu'elle contient le produit, la vidange et le nettoyage des machines et conteneurs après utilisation). Les opérateurs peuvent être des professionnels, comme les travailleurs agricoles et les agriculteurs, ou des utilisateurs amateurs.

**Les travailleurs (*workers*) :**

sont les personnes qui, de par leur emploi, pénètrent dans une zone qui a été traitée avec un produit phytosanitaire ou qui manipulent une culture qui a été traitée. En viticulture, c'est le cas notamment des vendangeurs.

**Les résidents (*residents*) :**

sont les personnes qui vivent, travaillent ou fréquentent une institution adjacente à une zone qui est ou a été traitée avec un produit phytosanitaire (exposition sur une longue durée).

**Les passants (*bystanders*) :**

sont les personnes qui pourraient se trouver à l'intérieur ou à proximité immédiate de la zone où l'application du produit est en cours ou a été récemment terminée (exposition sur une courte durée).

Pour limiter leur exposition aux pesticides, le port d'équipement de protection individuelle (EPI) pendant les phases de travail est recommandé par les autorités sanitaires et par les

industriels<sup>1</sup>. Or, plusieurs études ont montré que l'usage de ces équipements, présentant des niveaux de confort (Akbar-Khanzadeh et al., 1995 ; de Almeida et al., 2012) et d'efficacité (MacFarlane et al., 2013) variables, ne garantit pas toujours une protection optimale des opérateurs, notamment en viticulture (Baldi et al., 2012 ; Grillet et al., 2004). Il a également été montré que les EPI ne sont pas toujours portés ou utilisés correctement par les opérateurs durant les phases de travail (ANSES, 2014 ; Damalas et Abdollahzadeh, 2016).

En outre, ces équipements ne réduisent pas l'exposition des autres populations, comme les résidents ou les passants, qui sont également exposés aux pesticides (Falette et al., 2018), et pour qui le risque de développer certaines maladies est plus important que dans la population générale. Il a été montré, par exemple, que le risque de développer la maladie de Parkinson (Kab et al., 2017) et certains cancers (Seidler et al., 2008) est plus important chez les populations habitant dans des régions viticoles que chez les populations de régions non viticoles. Les résultats de Raheison et al. (2019) suggèrent un lien probable entre l'exposition aux pesticides et certains symptômes respiratoires et allergiques comme la rhinite chez les enfants vivant dans les régions viticoles.

La réduction de l'usage des produits phytosanitaires est devenue une attente sociétale forte en Europe<sup>2</sup> et notamment en France<sup>3</sup>, deuxième pays consommateur de pesticides en Europe et septième au niveau mondial ([données FAO](#), 2019). Afin de réduire la dépendance des Etats Membres aux pesticides, la directive européenne 2009/128 spécifie un cadre réglementaire à partir duquel les États doivent définir un plan d'action national en vue de réduire leur dépendance à l'égard de l'utilisation des pesticides (Journal officiel de l'Union européenne, 2009).

En France, cette directive s'est traduite sous la forme du plan Ecophyto I, initié en 2008. L'objectif de ce plan d'action national était de réduire de moitié l'utilisation des produits phytopharmaceutiques dans un délai de dix ans, si possible (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2008). La mise en place de ce plan national n'a cependant pas eu d'impact significatif sur l'usage de pesticides (Hossard et al., 2017). La consommation de pesticides a en effet augmenté de 13 %, passant de 64 000 à 72 000 tonnes vendues entre 2009 et 2016 (données FAO, 2019). Le Nombre de doses unité (NODU) a également

---

<sup>1</sup> Il est systématiquement demandé aux industriels de fournir dans leur dossier de demande d'autorisation de mise sur le marché d'un produit phytopharmaceutique des éléments précis sur les types d'EPI et de vêtements de travail qu'ils estiment appropriés pour la protection des travailleurs et des opérateurs. Le port d'EPI constitue ainsi une des conditions d'autorisation de mise sur le marché des produits phytosanitaires (ANSES, 2014).

<sup>2</sup> Plusieurs initiatives de citoyens européens ont été menées afin de demander à la Commission Européenne de limiter l'usage des pesticides dans les pays membres (« European Citizens' Initiative: Commission registers 'Save the bees!' initiative », 2019).

<sup>3</sup> Le mouvement « Nous voulons des coquelicots », initié en 2018 en France, demande au gouvernement l'interdiction de l'usage des pesticides.

augmenté de 10,5 % sur la même période (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt and Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018).

Face à ce constat, le ministère en charge de l'agriculture a proposé un nouveau plan d'action, baptisé Ecophyto 2+. Initié en 2015 puis renforcé en 2018, ce second plan repousse l'objectif de réduire de 50 % l'usage des pesticides à horizon 2025 (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2018a, 2015). Il prévoit notamment l'accélération du retrait des substances les plus à risque, le renforcement des connaissances relatives aux impacts des pesticides sur la santé humaine et sur l'environnement, le soutien de la recherche et du développement d'alternatives aux produits phytosanitaires et leur mise en œuvre par les agriculteurs.

## **1.2. La viticulture, une filière agricole consommatrice de pesticides en France**

La viticulture est une filière incontournable de l'agriculture française. Réparties dans 66 départements, les 10 bassins viticoles français s'étendent sur 786 000 ha (SSP, 2012, 2018). D'après l'Organisation Internationale du Vin, 17 % du vin produit dans le monde était produit en France en 2019, faisant ainsi de l'Hexagone le deuxième producteur mondial de vin, derrière l'Italie (Organisation Internationale du Vin, 2019).

Cette filière est caractérisée par une forte consommation de pesticides, notamment en France (Commission européenne, 2007) où fait partie des filières les plus intensives en termes d'utilisation de pesticides (Urruty et al., 2016). Entre 2010 et 2016, l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT)<sup>1</sup> moyen des parcelles viticoles a augmenté de 21 %, passant de 12,8 à 15,5. La pression phytosanitaire exercée sur les parcelles viticoles est 3,9 fois plus importante que dans les parcelles de blé tendre (SSP, 2016a).

Cette forte valeur d'IFT s'explique en partie par un nombre important de traitements<sup>2</sup> appliqués dans les vignobles. En moyenne, 20,1 traitements ont été appliqués dans les vignobles français en 2016, avec des variations entre les bassins viticoles (SSP, 2019a). Cette année-là, certains vignobles (Bouches-du-Rhône, PACA et Pyrénées-Orientales) ont reçu en moyenne une douzaine de traitements tandis que les vignobles du Gers, de Champagne et de Cahors ont reçu en moyenne 26,1, 25,6 et 24,9 traitements, respectivement.

Ravageurs aériens et souterrains, maladies cryptogamiques, bactériennes ou virales, les bioagresseurs de la vigne sont nombreux et sont notamment à l'origine de pertes de quantité

---

<sup>1</sup> L'Indice Fréquence de Traitement (IFT) est un indicateur de suivi de la pression phytosanitaire exercée sur la production agricole. Il résulte du nombre de traitements et au rapport entre d'une part la dose appliquée sur la surface traitée, pondérée par la part de surface traitée sur la parcelle, et d'autre part la dose homologuée pour la cible du traitement.

<sup>2</sup> La définition du service de la statistique et de la prospection (SSP) du ministère en charge de l'agriculture est utilisée ici pour désigner un traitement phytosanitaire. Il s'agit de l'application d'un produit lors d'un passage. Ainsi, un même produit appliqué en deux fois compte ainsi pour deux traitements. Un mélange de deux produits appliqués lors d'un même passage compte également pour deux traitements (SSP, 2015a).

et de qualité (Clerjeau, 2005). Ces pertes peuvent représenter un manque à gagner important pour les viticulteurs. En viticulture, les pesticides sont fréquemment utilisés afin de mettre en place un environnement défavorable à l'installation de ces bioagresseurs, notamment le mildiou (*Plasmopara viticola*) et l'oïdium (*Erysiphe necator*), deux maladies cryptogamiques de la vigne (SSP, 2015a, 2012). En effet, les traitements contre ces deux maladies représentaient en moyenne 40 % et 36 % des traitements phytosanitaires épandus dans une parcelle viticole en 2010 et 2013, respectivement (SSP, 2015a).

Les charges en pesticides représentent une faible part dans le résultat d'une exploitation viticole. L'utilisation des pesticides en viticulture coûtait, en 2002, 398 euros par ha et par an en moyenne, soit 3,8 % du résultat brut d'exploitation, contre 9,8 % en grandes cultures (Aubertot et al., 2005). Ces faibles charges n'incitent pas les viticulteurs à réduire l'utilisation de produits phytosanitaires, en regard du risque que cela représenterait pour leur récolte (Aubertot et al., 2005). De plus, la production de vin, en comparaison d'autres secteurs agricoles, est caractérisée par une forte valeur ajoutée, qui varie selon les bassins viticoles. Par exemple, le résultat courant avant impôts (RCAI) des exploitations viticoles françaises s'élevait à 52 700 euros en moyenne en 2017, soit 14 400 euros de plus que le RCAI moyen des exploitations agricoles (SSP, 2018). Ainsi, l'utilisation de pesticides est considérée comme une garantie peu coûteuse et peu risquée, qui permet d'assurer la récolte et le revenu associé (Aubertot et al., 2005).

Avec un climat océanique particulièrement favorable au développement des maladies cryptogamiques (Dubos, 2002) et des vignobles parmi les plus exportés dans le monde (FranceAgriMer, 2019), Bordeaux fait partie des régions viticoles recevant plus de traitements phytosanitaires que la moyenne (Figure 1.2). Parmi ces interventions, 43 % ont été réalisées dans le but de lutter contre le mildiou de la vigne (SSP, 2015a).

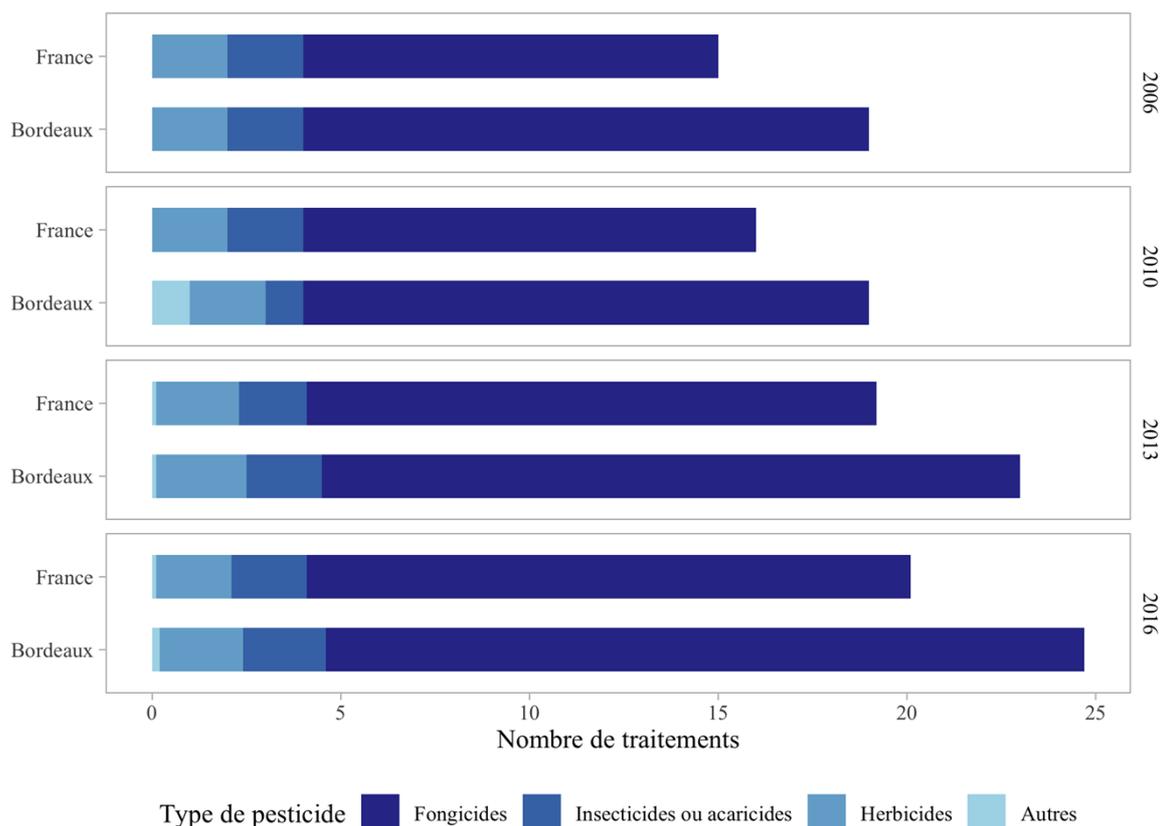


Figure 1.2 : Nombre moyen de traitements pour les différentes familles de pesticides appliqués dans une parcelle de vigne dans l'ensemble des bassins viticoles français et dans la région de Bordeaux durant les campagnes 2006, 2010, 2013 et 2016 (SSP, 2019a, 2015a, 2012, 2009). Un traitement désigne l'application d'un produit lors d'un passage (définition SSP).

### 1.3. Le mildiou, bioagresseur responsable de 43 % des interventions dans le Bordelais

Le mildiou est considéré comme l'un des bioagresseurs les plus importants de la vigne. *Plasmopara viticola* (Bert and Curt) Berl. et de Toni, le pathogène à l'origine de cette maladie cryptogamique, est originaire d'Amérique du Nord. Il fut introduit en Europe vraisemblablement au moment de l'importation massive de ceps américains pour palier la destruction des vignobles français par le phylloxera (*Daktulosphaira vitifoliae*). Observé et décrit pour la première fois en Europe en 1878 dans le Libournais, le mildiou de la vigne fut très vite repéré les années suivantes dans différents vignobles de France et fut considéré dès lors comme un problème majeur pour la viticulture en Europe.

#### 1.3.1. Cycle de développement

Le cycle de développement du pathogène comprend une phase de reproduction asexuée et une phase de reproduction sexuée. La phase de reproduction sexuée s'effectue par hétérothallisme, c'est-à-dire par croisement des filaments mycéliens (Wong et al., 2001). Cette phase va permettre au champignon de recombinaison son ADN avec un partenaire compatible et de se conserver durant l'hiver pour servir de source d'inoculum au printemps suivant. L'expansion du pathogène est assurée par la phase de reproduction asexuée (Gessler et al., 2011). Chaque phase permet au pathogène de produire différents types de spores. Les

spores issues de la phase de reproduction sexuée sont à l'origine des contaminations primaires, tandis que celles issues de la reproduction asexuée sont responsables des contaminations secondaires (Figure 1.3).

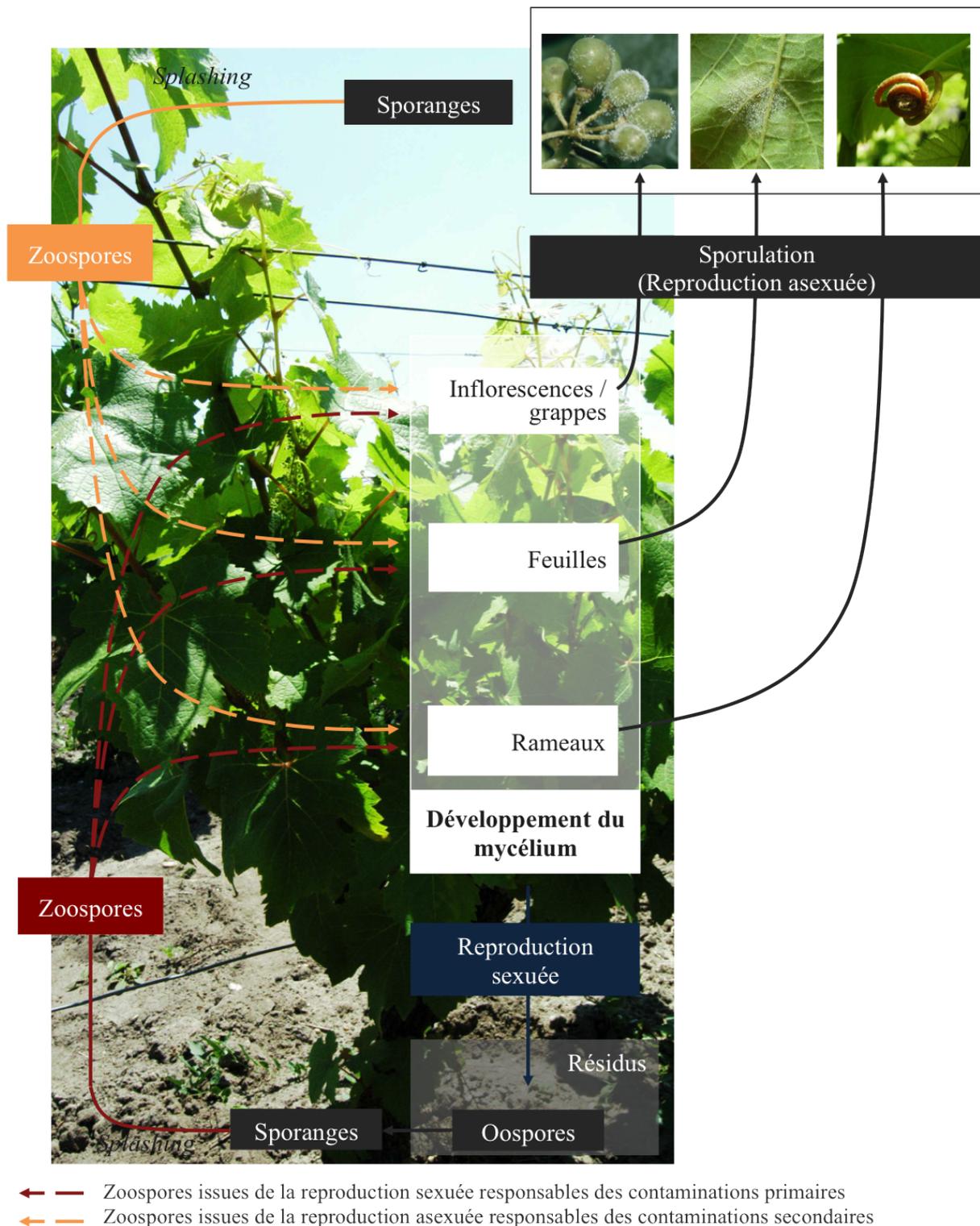


Figure 1.3 : Schéma du cycle de contaminations primaires et secondaires de *Plasmopara viticola*, pathogène responsable du mildiou de la vigne.

Durant l'hiver, le pathogène se conserve sous la forme d'oospores dans la litière de feuilles ou enterré dans le sol. Les oospores sont des spores issues de la reproduction sexuée de

*Plamopara viticola* (Wong et al., 2001). Résistantes à des températures pouvant descendre jusqu'à -26 °C pendant 5 jours et à la sécheresse (Galet, 1977), ces spores vont permettre d'assurer la survie du pathogène jusqu'au printemps suivant. Une part de l'inoculum contaminera le vignoble en cas de conditions météorologiques favorables et une part assurera la pérennité du pathogène en se conservant plusieurs années consécutives – au moins 3 ans d'après les observations faites par les services de la protection des végétaux.

A la fin de l'hiver, les oospores deviennent matures ; leur paroi s'amincit (maturité morphologique) et leur organisation cellulaire change (maturité physiologique) (Vercesi et al., 1999). Cette étape est indispensable car seules les oospores matures pourront germer et servir de source d'inoculum au printemps (Gessler et al., 2011). Une fois sorties de la dormance, les oospores matures germent et produisent des sporanges, dans lesquelles se forment des zoospores.

Au printemps, les sporanges issus de la germination des oospores libèrent les zoospores qu'elles contiennent et qui sont à l'origine des contaminations primaires. Les zoospores libérées sont projetées depuis le sol grâce aux éclaboussures provoquées par la chute des gouttes de pluie (« *splashing* »). Après leur dissémination sur les organes verts de la plante (feuilles, inflorescences, jeunes baies ou jeunes rameaux), les zoospores, pourvues de deux flagelles, se déplacent dans le milieu liquide jusqu'aux stomates de la plante. Elles s'enkystent à proximité des stomates (Kiefer et al., 2002) ; elles perdent leurs flagelles et émettent un promycélium qui pénètre l'épiderme par l'intermédiaire des stomates. Dans les jours suivant la contamination, de nombreux hyphes mycéliens se déploient dans les tissus internes de la plante. Ils s'alimentent à travers des suçoirs, qui pénètrent les parois des cellules végétales et y pompent les nutriments et l'eau qu'elles contiennent. La phase d'incubation, colonisation interne des tissus par le mycélium, peut durer de quatre à neuf jours.

A l'issue de cette période d'incubation, les premiers symptômes de mildiou apparaissent. Le plus souvent, ils se manifestent sur la face supérieure des feuilles par l'apparition d'une tache translucide, appelée « tache d'huile », qui va petit à petit jaunir en raison de la perte de pigments (Figure 1.4.a), puis se nécroser (Figure 1.4.b). Peu après l'apparition des symptômes « taches d'huile », des sporangiophores (ou conidiophores), porteurs de sporanges, se forment à partir des stomates infectés. Sur la face inférieure des feuilles, un duvet blanc plus ou moins dense se forme sur les zones contaminées (Figure 1.4.c). Les sporangiophores peuvent également se développer sur tous les tissus jeunes et en croissance infectés, tels que les inflorescences, les jeunes baies ou sarments, ou encore les vrilles.

Les efflorescences, formées d'aspects grisâtres, sont à l'origine du faciès « rot gris » (Figure 1.4.d). Les sporanges émettent à leur tour des zoospores qui sont dispersées par *splashing* sur d'autres organes du cep, de manière à infecter les organes sains de la plante, ou sur d'autres pieds de vigne. Les contaminations réalisées par cette nouvelle génération de zoospores, issues de la reproduction asexuée de *P. viticola*, sont appelées « contaminations secondaires ». Dans le cas où les baies sont affectées moins précocement, des taches violacées à noirâtres se développent sur les baies, qui prennent un aspect déprimé (« en coup de pouce ») et sont non fructifères. Ce type de symptôme est appelé faciès « rot brun » (Figure 1.4.e) et dans ce cas, il n'y a pas de sporulation.

Dans le cas où les conditions ne sont pas favorables à la sporulation, notamment en conditions de sécheresse ou lors de la senescence des feuilles à l'automne, la production d'oospores est favorisée (Grünzel, 1961, cité par Gessler et al., 2011). Produites dans les feuilles atteintes plus tardivement par le mildiou (faciès « mosaïque », Figure 1.4.f), les oospores sont issues d'un croisement hétérothallique (Wong et al., 2001). Cette phase constitue le stade sexué du développement du pathogène et représente la seule source d'inoculum des infections primaires de mildiou de la vigne pour la saison à venir (Zachos, 1959, cité par Gessler et al., 2011).

L'extension de la maladie est assurée par les contaminations primaires et secondaires. Des travaux récents montrent que les contaminations primaires jouent un rôle au moins aussi important que les contaminations secondaires voire plus dans la gravité des épidémies de mildiou (Gobbin et al., 2005).

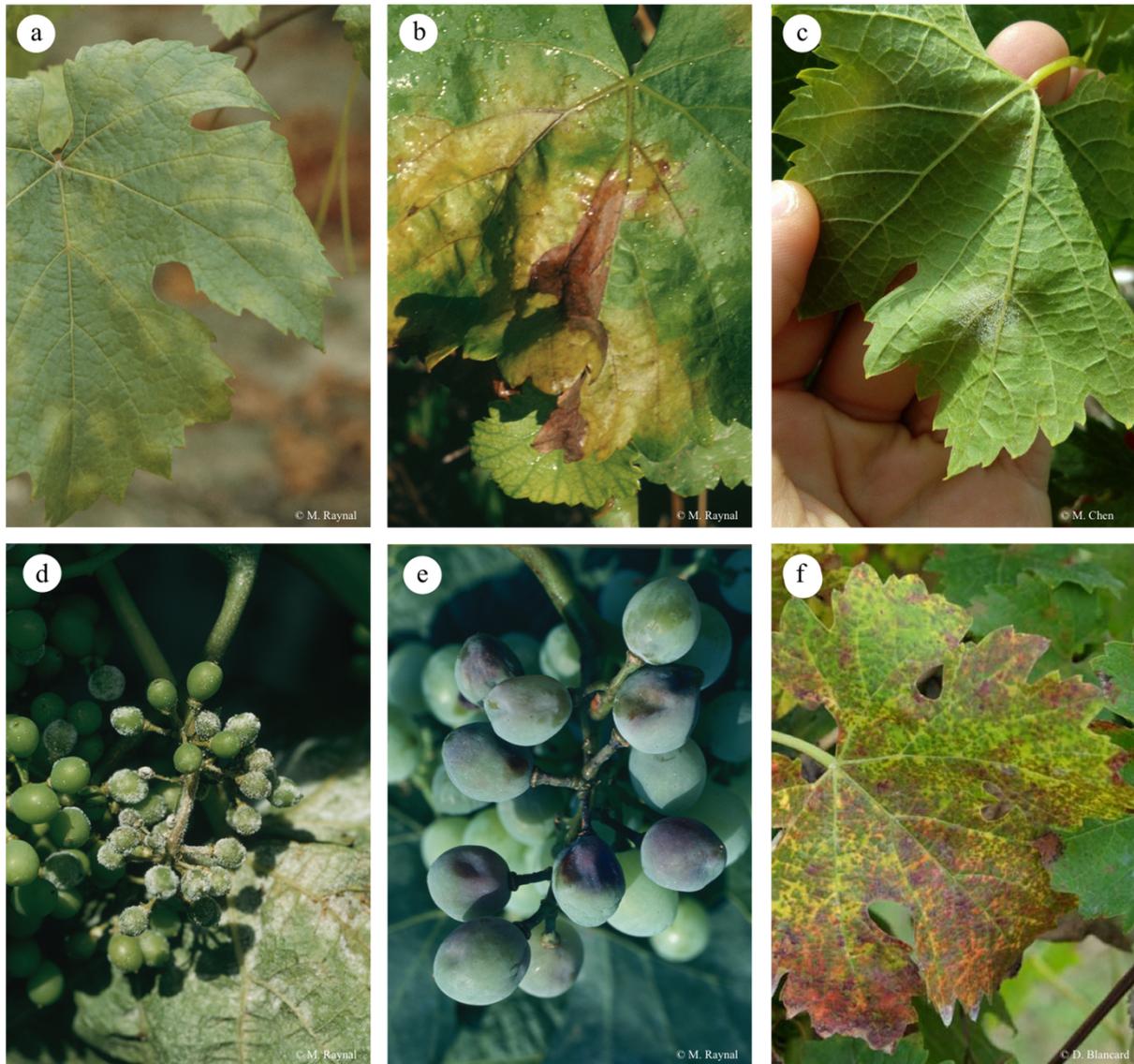


Figure 1.4 : Symptômes de mildiou de la vigne sur feuilles et grappes. (a) : Symptôme « tache d'huile ». (b) : Tissus nécrosés à l'emplacement d'une ancienne « tache d'huile ». (c) : Sporulation du pathogène sur la face inférieure de la feuille infectée. (d) : Sporulation du pathogène sur baies de raisin (« rot gris »). (e) : Symptôme de « rot brun » sur grappe, avec taches brunes sur baies (baies « en coup de pouce », non fructifères). (f) : Symptômes de mildiou « mosaïque ». Source : M. Raynal (IFV) pour (a), (b), (d), et (e), D. Blancard, (INRA) pour (f).

### 1.3.2. Variabilité des épidémies de mildiou et dégâts provoqués par la maladie

Le développement de *P. viticola* dépend de nombreux paramètres environnementaux.

Les conditions climatiques, notamment l'humidité, jouent un rôle déterminant dans la plupart des phases du cycle de développement du pathogène (Tableau 1.1).

| <b>Facteur</b>                           | <b>Période</b>  | <b>Effet</b> | <b>Spores</b>          | <b>Références</b>  |
|--|-----------------|--------------|------------------------|--|
| Augmentation des précipitations          | Automne         | +            | Oospores               | Tran Manh Sung et al. (1990)   |
| Baisse des températures                  | Automne         | +            | Oospores               | Rouzet et Jacquin (2003)   |
| Baisse des températures                  | Printemps       | -            | Oospores               | Rouzet et Jacquin (2003)   |
| Léger gel                                | Hiver           | +            | Oospores               | Gessler et al. (2011)  |
| Humidité                                 | Printemps       | +            | Oospores               | Rossi et Caffi (2007)  |
| Sécheresse                               | Printemps       | -            | Oospores               | Rouzet et Jacquin (2003) ; Rossi et al. (2002)                             |
| Température du sol inférieure à 12-13 °C | Printemps       | -            | Oospores               | Gessler et al. (2011)  |
| Températures comprises entre 11 et 30 °C | Printemps – été | +            | Oospores               | Park et al. (1997) ; Blouin (2007)   |
| Pluies                                   | Printemps – été | +            | Sporanges et zoospores | Rossi et al. (2012)  |
| Absence d'eau libre                      | Printemps – été | -            | Oospores               | Dubos (2002) ; Gessler et al. (2011)                                       |
| Sécheresse                               | Été – automne   | +            | Oospores               | Grünzel, (1961), cité par Gessler et al. (2011) ; Rouzet et Jacquin (2003) |
| Températures                             | Été – automne   | 0            | Oospores               |  |

Tableau 1.1 : Facteurs climatiques influençant le cycle de développement de *Plasmopara viticola*

La maturation des oospores dépend des conditions climatiques à l'automne et au printemps. Des précipitations suffisantes durant l'automne permettent d'accélérer la maturation des oospores (Tran Manh Sung et al., 1990). Si de faibles températures entre septembre et novembre accélèrent la maturation, de faibles températures au printemps la retarderont (Rouzet et Jacquin, 2003). Les oospores matures germent d'autant mieux que leurs parois externes sont rompues, phénomène provoqué par un léger gel (Gessler et al., 2011) et par une humidité suffisante (Rossi et Caffi, 2007).

La germination des oospores est influencée par les conditions climatiques, notamment par la température, la pluie et l'humidité (Caffi et al., 2009 ; Hill, 2000 ; Rossi et al., 2008a). Une humidité élevée est cruciale pour la germination (Rossi et Caffi, 2007), qui sera au contraire défavorisée par de longues périodes de sécheresse (Rouzet et Jacquin, 2003). La germination des oospores requiert également que la température au sol atteigne au moins 12 ou 13 °C (Gessler et al., 2011). Elle est inhibée lorsque les températures sont trop faibles, c'est-à-dire inférieures à 11 °C (Park et al., 1997), ou trop fortes, soit supérieures à 30 °C (Blouin, 2007).

Le déplacement des zoospores et leur survie dépendent de la présence d'un mince film d'eau à la surface de l'organe atteint (Dubos, 2002; Gessler et al., 2011). Une fois que la contamination a eu lieu, la phase d'incubation, colonisation interne des tissus par le mycélium, peut durer de quatre à neuf jours, selon la température, l'humidité relative et la sensibilité des tissus de la vigne (Kennelly et al., 2007 ; Orlandini et al., 1993 ; Rosa et al., 1995).

Les longues périodes de sécheresse et de froid retardent l'apparition des premières contaminations (Rossi et al., 2002). La contamination de la vigne par les zoospores dépend également du stade phénologique de la plante au moment de l'infection. En effet, la sensibilité de la vigne au mildiou diminue au-delà du stade véraison. Cette résistance ontogénique est due à la transformation des stomates en lenticelles, ce qui limite la pénétration du champignon dans les tissus (Kennelly et al., 2005).

La sporulation dépend de certains paramètres environnementaux : le pathogène nécessite une forte humidité, au moins quatre heures d'humidité et une température minimale de 13 °C (Gessler et al., 2011). La température optimale de sporulation est de 19 °C (Gessler et al., 2011). La productivité des zones infectées, c'est-à-dire le nombre de sporanges produits par lésion, ne décline pas en l'absence de conditions climatiques favorables à la sporulation. En revanche, elle diminue rapidement après plusieurs cycles de sporulation (Kennelly et al., 2007).

Dans le cas où les conditions ne sont pas favorables à la sporulation, notamment en cas de sécheresse ou lors de la senescence des feuilles à l'automne, la production d'oospores est favorisée (Grünzel, 1961, cité par Gessler et al., 2011).

En cas de conditions climatiques favorables, sous l'effet d'une multitude de contaminations primaires, le mildiou peut se développer rapidement et attaquer de nombreux ceps, d'abord répartis en foyers avant que la parcelle soit entièrement touchée. Le développement de mildiou sur les inflorescences peut provoquer la destruction des futures baies, ce qui entraîne une baisse de production. Au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, alors que des méthodes efficaces de lutte

n'existaient encore pas ou ne pouvaient pas être utilisées, la maladie fut responsable d'importants dégâts en Europe. En France, le mildiou causa la destruction de 70 % du rendement en 1915 et induisit une perte de vingt millions d'hectolitres de vin en 1930.

La pénurie de cuivre qui eut lieu durant la Seconde Guerre mondiale pénalisa la lutte contre la maladie, ce qui entraîna des dégâts importants (Gessler et al., 2011). Dans les vignobles de l'ouest de l'Australie, les pertes cumulées depuis l'établissement de la maladie en 1998 sont estimées à 140 millions de dollars australiens<sup>1</sup> (Taylor et Cook, 2018). Les dégâts de la maladie sur les feuilles sont responsables d'une réduction de la teneur en sucre des baies, ce qui induit une baisse de la qualité du raisin (Jermini et al., 2010).

Avec une pluviométrie régulière et des températures douces liées à la proximité avec l'océan Atlantique, le mildiou trouve dans les vignobles bordelais des conditions très favorables à son développement. En effet, l'absence de moyens de contrôle pourrait entraîner des pertes moyennes de rendement pouvant atteindre 60 % dans les vignobles bordelais (Leroy et al., 2013).

## 1.4. Moyens de lutte contre le mildiou de la vigne

### 1.4.1. Produits phytopharmaceutiques

En viticulture conventionnelle, la pharmacopée utilisable pour lutter contre le mildiou compte onze familles chimiques. Ces groupes de molécules impactent différentes cibles cellulaires ou processus physiologiques de *P. viticola*, ce qui permet de limiter son implantation ou son développement (Tableau 1.2). Ces produits sont caractérisés par leur mode d'action (contact, pénétrant ou systémique) (Tableau 1.3) et par leur effet sur le développement de la maladie (préventif, curatif, anti-sporulant). Ils possèdent une durée d'action limitée dans le temps, allant de huit à dix jours pour certains produits de contact jusqu'à douze à quatorze jours en moyenne pour les produits systémiques (Tableau 1.3).

---

<sup>1</sup> Soit l'équivalent de 85 millions d'euros.

Tableau 1.2 : Familles chimiques de fongicides anti-mildiou. Les molécules en italique peuvent être utilisées en biocontrôle (ACTA, 2018). Le nombre entre parenthèse après un nom de molécule indique le rang d'utilisation de la molécule en 2013 dans le Bordelais (sources : SSP, 2016). Les molécules en gras sont celles pour lesquelles un lien entre exposition et développement de certaines maladies est supposé (sources : INSERM, 2013).

| Famille chimique                                     | Exemples de molécules  | Processus ou organes ciblés par le fongicide <sup>1</sup> | Présence de résistances avérées sur vigne <sup>1</sup> |
|--|--|---|--|
| Cyano-oximes   | Cymoxanil (6)  | Inconnu   | Oui  |
| Benzamides   | Zoxamide, fluopicolides  | Cytosquelette et protéines motrices                       | Oui  |
| Carboxamid Acid Amines                               | Diméthomorphe, mandipropamid, valifénalate, benthiavalicarbe, iprovalicarbe                              | Biosynthèse de la paroi cellulaire                        | Oui  |
| Quinone Outside Inhibitors                           | Azoxystrobine, famoxadone, pyraclostrobine   | Respiration mitochondriale                                | Oui  |
| Quinone Inside Inhibitors                            | Cyazofamide  | Respiration mitochondriale                                | Oui  |
| Quinone outside Inhibitor, stigmatellin binding type | Amétoctradine (7)  | Respiration mitochondriale                                | Oui  |
| Anilides   | Benalaxyl, benalaxyl-M, mefenoxam  | Métabolisme des acides nucléiques                         | Oui  |
| Fongicides organiques de synthèse (FOS)              | <b>Folpel</b> (2), métirame (4), <b>mancozèbe</b> (5), dithianon   | Multi-sites   | Non  |
| Cuivres  | Cuivre toutes formes (1) : Sulfate de cuivre, hydroxyde de cuivre, oxychlorure de cuivre, oxyde cuivreux | Multi-sites   | Non  |
| Phosphonates   | Fosétyl-Aluminium (3), <i>phosphonates de potassium, disodium phosphonates</i>                           | Induction de défense des plantes hôtes                    | Non  |
| Extraits de citrus                                   | <i>Huile essentielle d'orange douce</i>  | Déshydratation des structures externes                    | Non  |

<sup>1</sup> D'après la classification du Fungicide Resistance Action Committee (FRAC, 2019), sauf pour les extraits de citrus (ACTA, 2018).

Tableau 1.3 : Tableau récapitulatif des différents modes d'action des fongicides anti-mildiou autorisés actuellement en viticulture en France (Association Technique Viticole 49, 2017 ; Chambre d'Agriculture du Tarn et al., 2019 ; « Mildiou », n.d.).

|                              |  | Produits de contact   | Produits pénétrants   | Produits systémiques  |
|------------------------------|--|---|---|---|
| Renouvellement du produit    | Mode d'action  | Action locale, à l'endroit où ils ont été appliqués lors du traitement. Comme ils ne pénètrent pas à l'intérieur de la plante, il est nécessaire que le produit soit appliqué sur tous les organes ciblés, ce qui peut générer des dérives importantes. | Pénétration dans les tissus internes de la plante. Peuvent traverser la feuille (produits « translaminaires ») ou ne pas se diffuser (produits à « fixation cuticulaire »). | Pénétration dans les tissus internes et diffusion dans d'autres parties de la plante via la sève. |
|                              | Principales molécules  | Cuivre, mancozèbe, folpel, métirame et soufre.  | <i>Translaminaires</i> : cymoxanil ou CAA.<br><i>Fixation cuticulaire</i> : zoxamide, cyazofamide et amétoctradine.   | Phosphonates, fosétyl-Al ou anilides.   |
|                              | Après une pluie > 20 mm  | Oui : Produits lessivables.<br>De plus, certains produits sont photosensibles.  | Non <sup>1</sup>  | Non <sup>5</sup>  |
|                              | Après 15 cm de pousse  | Oui : les pousses formées après le traitement ne sont pas protégées si le produit est utilisé seul.   | Oui <sup>5</sup>  | Non   |
| Au delà de la durée d'action | Oui : 8 à 10 jours (durée supérieure en absence de lessivage pour les produits non photosensible, comme le cuivre) | Oui : 10 à 12 jours   | Oui : 12 à 14 jours   |   |

Parmi les molécules anti-mildiou, le cuivre est la seule substance active utilisable en viticulture conventionnelle et en viticulture biologique. Son utilisation est maintenant limitée à 4 kg/ha et par an lissé sur 7 ans (Association Technique Viticole 49, 2017) à cause de son effet sur l'environnement (Arena et al., 2018). Certaines molécules utilisées pour lutter contre le mildiou sont suspectées d'avoir un impact néfaste sur la santé humaine. Par exemple, l'exposition au mancozèbe est jugée susceptible d'augmenter le risque de développement

<sup>1</sup> Valable si le produit est utilisé seul.

certaines cancers (leucémie, mélanome) et de la maladie de Parkinson (INSERM, 2013). Des cas de résistance ont également été constatés pour certaines de ces molécules (FRAC, 2019).

Une alternative aux fongicides de synthèse est l'emploi de produits de biocontrôle. Ces produits peuvent être utilisés seuls ou associés à d'autres moyens de lutte. Les produits de biocontrôle se classent en quatre familles :

- Les macro-organismes auxiliaires sont des invertébrés, insectes, acariens ou nématodes utilisés de façon raisonnée pour protéger les cultures contre les attaques des bioagresseurs.
- Les micro-organismes sont des champignons, bactéries et virus utilisés pour protéger les cultures contre les ravageurs et les maladies.
- Les médiateurs chimiques comprennent les phéromones d'insectes et les kairomones. Ils permettent le suivi des vols et le contrôle des populations d'insectes ravageurs par les méthodes de piégeage et de confusion sexuelle.
- Les substances naturelles utilisées comme produits de biocontrôle sont composées de substances présentes dans le milieu naturel et peuvent être d'origine végétale, animale ou minérale.

Les produits de biocontrôle actuellement disponibles pour lutter contre le mildiou de la vigne appartiennent en majorité à la dernière catégorie (Aveline, 2019). Ces produits agissent directement sur le pathogène, en inhibant son développement ou en entraînant par exemple la dessiccation de ses structures externes. Les « stimulateur de défense des plantes », ne faisant pas partie des catégories présentées, stimulent les défenses naturelles des plantes-hôtes en activant certains mécanismes de défense afin de renforcer leur résistance en prévision d'infection.

Par leurs modes d'action, ces produits peuvent être utilisés de manière préventive ou curative. Cependant, leur efficacité est en pratique limitée et variable (Dagostin et al., 2011). L'emploi des produits de biocontrôle reste marginal : en 2016, il représentait 14 % de l'IFT fongicide dans l'ensemble des bassins viticoles français et 15 % dans le Bordelais (Service de la Statistique et de la Prospection, 2019a).

#### **1.4.2. Variétés résistantes**

La résistance génétique aux bioagresseurs est un levier majeur de lutte contre les maladies fongiques en agriculture (Lamichhane et al., 2015). En France, la recherche en sélection variétale est au cœur de la recherche viticole depuis les travaux d'Alain Bouquet concernant la résistance « monogénique » (Montaigne et al., 2016). Ce type de résistance fut obtenu à partir du croisement de *Vitis vinifera* et d'une vigne sauvage américaine, suivi par plusieurs autres croisements avec des variétés cultivées (Bouquet, 1980). Une trentaine de variétés, totalement résistantes à l'oïdium et fortement résistantes au mildiou, ont été obtenues suite à ces travaux.

Ces variétés ont ensuite été croisées avec d'autres cépages résistants développés en Allemagne dans le cadre du programme de recherche ResDur de l'INRA (Schneider et al., 2014). Les variétés issues du croisement entre les variétés françaises et allemandes sont des

variétés à résistance « polygénique ». Elles possèdent deux ou trois facteurs de résistance à chaque maladie, soit un à deux facteurs de résistance en plus par rapport aux variétés Bouquet. Au-delà des variétés issues de la recherche française, onze variétés résistantes allemandes et une variété résistante italienne sont actuellement disponibles sur le marché. Elles ont obtenu leur classement définitif le 19 avril 2017 et ont été intégrées au Catalogue national.

### 1.4.3. Prophylaxie

La prophylaxie consiste en l'adoption de mesures permettant de prévenir l'arrivée ou la propagation d'un bioagresseur<sup>1</sup>. Dans le cas du mildiou de la vigne, les mesures recommandées visent à réduire l'inoculum, réduire le risque de contamination et diminuer la sensibilité de la vigne. La plupart de ces actions sont centralisées sur le portail INRA EPHYTIA<sup>2</sup>.

La source principale d'inoculum au début de la saison sont les oospores, qui se conservent tout l'hiver dans les débris végétaux infectés de l'année précédente. Il est donc par exemple recommandé d'éliminer les résidus de culture, comme les feuilles mortes ou les vignes abandonnées, et de veiller à les incorporer tôt au sol lors de la saison précédente. Cela permet de favoriser au maximum la destruction dans le sol des oospores formées dans les feuilles tombées au sol.

D'autres actions sont menées afin de limiter les contaminations. Une fois la germination des oospores terminée, les zoospores responsables des contaminations primaires sont projetées sur les organes sensibles de la vigne par *splashing*. La suppression des pousses basses et des rejets permet d'augmenter la hauteur entre le sol, où se trouvent majoritairement les oospores en début de saison, et les tissus sensibles. Limiter l'humidité dans la parcelle en évitant la stagnation d'eau ou en améliorant l'aération de la végétation contribue également à réduire le risque de contamination.

L'un des leviers de la lutte prophylactique contre le mildiou de la vigne est la maîtrise de la vigueur de la plante. En effet, il a été montré que les vignes les plus vigoureuses, gorgées d'eau, étaient plus sensibles à la maladie (Raynal et al., 2015). Les pratiques agronomiques permettant de diminuer la sensibilité de la plante au mildiou se rapportent au choix du porte-greffe et à la maîtrise de la fertilisation.

## 1.5. Réduire l'utilisation de fongicides pour lutter contre le mildiou de la vigne

L'utilisation de produits phytosanitaires est actuellement le principal moyen de limiter le développement du mildiou. Cette dépendance à l'égard des produits fongicides est associée à des effets indésirables sur l'environnement, la santé et la durabilité de leur efficacité. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de protection des cultures moins dépendantes à l'usage des pesticides, sans remettre en cause la rentabilité économique des exploitations.

---

<sup>1</sup> Voir cette définition sur le [site](#) d'EcophytoPIC.

<sup>2</sup> Portail accessible en ligne : [www.ephytia.inra.fr](http://www.ephytia.inra.fr)

La protection intégrée (PI) des cultures contribue à répondre à cet enjeu. Elle consiste en une combinaison rationnelle de toutes les méthodes de lutttes existantes – méthodes de lutte biologiques, culturelles, génétiques, mécaniques, physiques et enfin, chimiques (Lamichhane et al., 2015) – dans laquelle l’emploi de pesticides est limité au strict nécessaire pour maintenir la présence des organismes nuisibles en dessous du seuil à partir duquel apparaissent des dommages ou une perte économiquement inacceptable (Directive 91/414/CEE). La PI des cultures repose sur huit grands principes, qui sont implémentés à travers différentes actions (Annexe A). En viticulture, la PI contre le mildiou de la vigne s’appuie sur l’emploi de mesures préventives, le raisonnement des traitements et le recours à des produits ayant un moindre impact sur l’environnement et la santé (Davy et al., 2015).

La prophylaxie et la plantation de variétés résistantes font partie des mesures préventives de la PI contre le mildiou de la vigne. Couramment appliquées dans la plupart des bassins viticoles, le but des mesures prophylactiques est de réduire l'inoculum, de limiter le risque de contamination et de diminuer la sensibilité de la vigne. Leur efficacité est cependant limitée.

En France, 46 et 28 % des vins produits bénéficient d’une appellation d’origine contrôlée<sup>1</sup> ou indication géographique protégée<sup>2</sup>, respectivement (Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt, 2018b). Dans le Bordelais, 93 % des vins produits sont des vins bénéficiant d’une appellation d’origine protégée (SSP, 2017). Pour obtenir ces appellations, la production de ces vins doit suivre un cahier des charges délimitant l'aire géographique de production, la ou les variétés pouvant être utilisées pour la fabrication du vin, les méthodes de vinification spécifiques, le rendement maximal par ha et les caractéristiques analytiques et organoleptiques des vins respectifs (INAO, 2016). Ce cadre réglementaire permet notamment de garantir au consommateur une certaine qualité du produit fini et de protéger le producteur d’un marché international de plus en plus compétitif (Libery and Kneafsey, 1998).

Le choix des variétés cultivées dans ces régions est donc motivé par le respect de ce cahier des charges et non par la résistance ou la tolérance aux bioagresseurs. La plupart de ces variétés présentent des caractéristiques biochimiques particulières, différentes des variétés traditionnelles (Pedneault and Provost, 2016), pouvant être associées à des vins de moins bonne qualité (Espinoza et al., 2018). Le cadre réglementaire actuel et l’image des variétés résistantes auprès des viticulteurs et des consommateurs ne favorisent pas la plantation

---

<sup>1</sup> L’appellation d’origine contrôlée (AOC) désigne un produit dont toutes les étapes de production sont réalisées selon un savoir-faire reconnu dans une même aire géographique, qui donne ses caractéristiques au produit. L’équivalent au niveau européen est l’appellation d’origine protégée (AOP). Voir le site de l’[INAO](#).

<sup>2</sup> L’indication géographique protégée (IGP) identifie un produit agricole, brut ou transformé, dont la qualité, la réputation ou d’autres caractéristiques sont liées à son origine géographique. Voir le site de l’[INAO](#).

d'autres variétés que celles déjà actuellement cultivées, qui possèdent des caractéristiques agronomiques et œnologiques intéressantes, mais ne sont pas résistantes au mildiou.

Les produits de biocontrôle ont un faible impact sur l'environnement et la santé des applicateurs et peuvent représenter une alternative aux produits chimiques de synthèse. Cependant, l'usage de ces produits montre des efficacités faibles et variables, en comparaison de fongicides chimiques (Dagostin et al., 2011). De nombreuses recherches ont été menées afin de contrôler le développement de *P. viticola* en le mettant en compétition avec différents micro-organismes (Ghule et al., 2018 ; Liang et al., 2016 ; Zhang et al., 2017), mais la plupart d'entre eux n'ont pas encore été mis sur le marché (Pertot et al., 2017).

Ainsi, le raisonnement des traitements fongicides est actuellement le principal levier de réduction de l'usage des pesticides pour lutter contre le mildiou de la vigne. Le raisonnement des traitements peut s'effectuer à travers différentes actions : l'amélioration de la qualité de pulvérisation, la modulation de la dose appliquée et l'amélioration du positionnement des traitements (Launès et al., 2015).

Lors des traitements, seule une partie des pesticides épandus atteint réellement la cible visée. L'importance de cette perte de produit dépend notamment du matériel de pulvérisation utilisé (Sinfort et al., 2009) et de son réglage (Bonicelli et al., 2010). L'utilisation de matériel performant, bien réglé et assurant une répartition homogène de la pulvérisation, permet d'améliorer l'efficacité et la qualité de pulvérisation tout en réduisant les pertes. En Bourgogne, les travaux de l'Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV) ont montré que l'utilisation de ce type de matériel, accompagné d'une réduction de 30 % des doses appliquées, permettait de maintenir une protection satisfaisante du vignoble contre le mildiou et l'oïdium (Mézière et al., 2009).

La dose de fongicide appliquée peut également être ajustée en fonction de différents facteurs, comme le stade végétatif de la vigne ou la pression parasitaire. Cette pratique est couramment utilisée dans les bassins viticoles français (Service de la Statistique et de la Prospection, 2019a, 2015a). Par exemple, le dosage des traitements a progressivement augmenté entre le début de la campagne en 2016 et le mois de juin puis a diminué pendant l'été dans les vignobles bordelais (SSP, 2019a). En 2006 et 2010, 75 % des surfaces viticoles traitées recevaient en moyenne des traitements appliqués à  $0,9 \pm 0,2$  fois la dose homologuée (Mailly et al., 2017).

L'utilisation d'outils d'aide à la décision (OAD) optimisant cette dose contribue à réduire l'usage des pesticides tout en garantissant une protection satisfaisante du vignoble. Pellegrini et al. (Pellegrini et al., 2010) ont développé une procédure basée sur le traitement des vignes avec une dose variable de cuivre lorsqu'il y a risque d'infection et que la végétation n'est pas suffisamment protégée par les traitements précédents. L'outil Optidose<sup>®</sup>, proposé par l'IFV sur la plateforme Epicure<sup>1</sup>, permet de diminuer l'IFT de 30 à 50 % en fonction de la pression des millésimes et d'économiser 50 % des quantités de fongicides utilisés dans la lutte contre

---

<sup>1</sup> Plateforme accessible en ligne : <https://www.vignevin-epicure.com>

le mildiou et l'oïdium en conditions expérimentales (Davy, 2008). L'utilisation de cette approche, bien qu'en forte croissance dans les réseaux DEPHY-Ferme ou autres groupements de lutte raisonnée, ne permet pas de compenser l'augmentation du nombre de traitements observée ces dernières années (SSP, 2016b). A l'échelle de la France, d'autres études montrent que cette méthode ne permet pas de diminuer significativement l'emploi des pesticides en viticulture (Mailly et al., 2017).

En raison de la variabilité des épidémies de mildiou, de nombreux scientifiques recommandent d'adapter les pratiques fongicides aux conditions environnementales locales et annuelles (Caffi et al., 2014). L'enjeu de cette approche est de « traiter mieux pour, si possible, traiter moins » (IFV, n.d.). Dans cette optique, l'amélioration du positionnement des traitements est une troisième piste de réduction de l'usage des produits fongicides. Elle fait appel à différentes sources d'information, des indicateurs de risque et des observations couplées à des seuils que les viticulteurs utilisent comme un « proxy » pour estimer le risque de mildiou et prendre la décision de traiter ou non.

Cette pratique peut notamment être appliquée au premier traitement anti-mildiou de la saison. En effet, il a été montré que déclencher le premier traitement au plus près de la période d'infection du mildiou de la vigne permettait de réduire le nombre de traitements fongicides tout en gardant un niveau de protection satisfaisant (Caffi et al., 2010). Cependant, le déclenchement de la lutte contre le mildiou est une étape déterminante pour la protection de la vigne ; un premier traitement trop précoce pourrait entraîner une augmentation inutile du nombre de traitements fongicides, tandis qu'un démarrage trop tardif peut causer l'échec de la protection. Afin d'appliquer le premier traitement au meilleur moment, les producteurs peuvent s'appuyer sur différentes sources d'information (Figure 1.5).

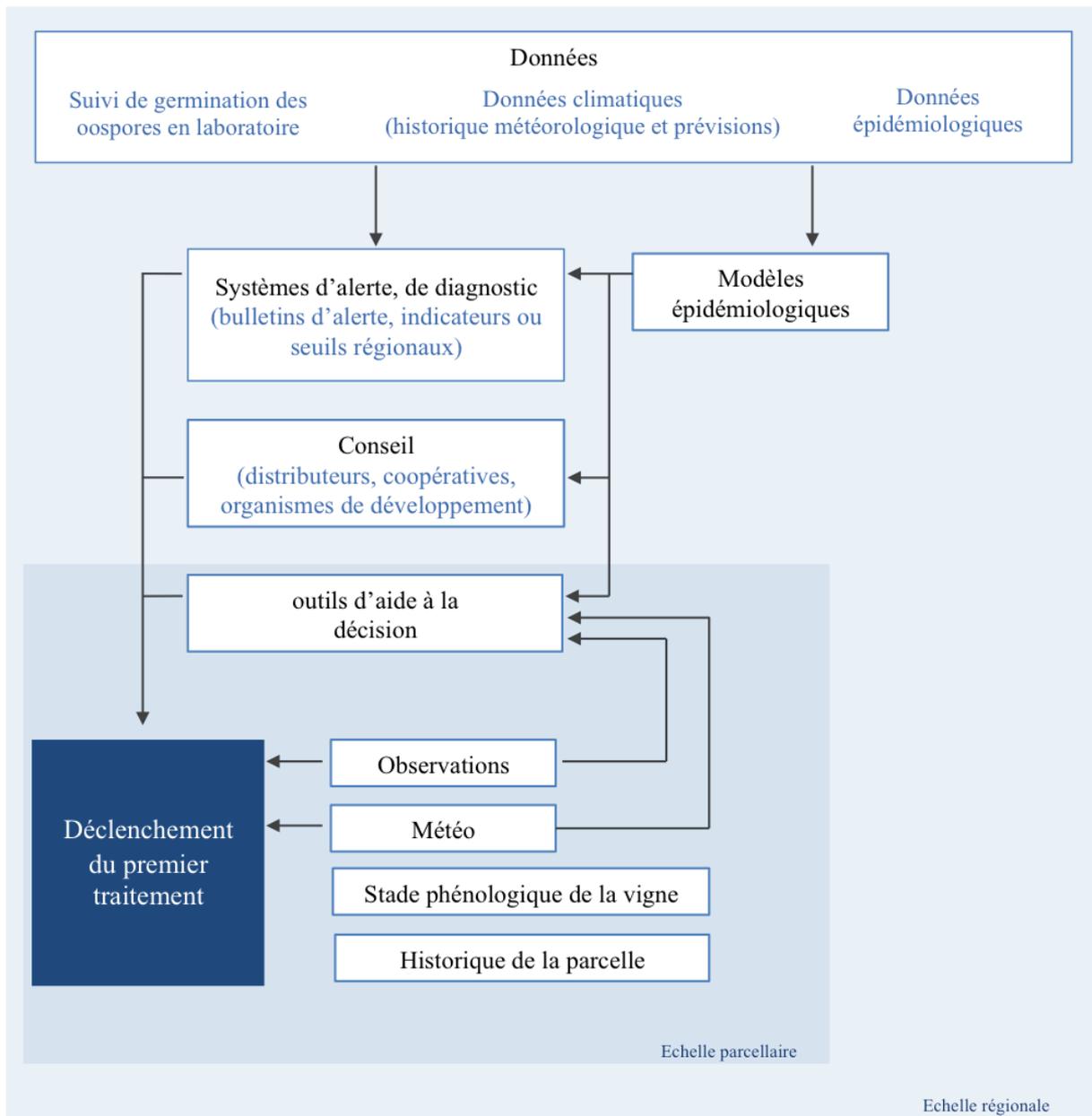


Figure 1.5 : Schéma récapitulatif des différentes sources d'information mobilisables par les viticulteurs pour le raisonnement du premier traitement fongicide anti-mildiou.

En premier lieu, les viticulteurs s'appuient sur les observations du terrain : observations épidémiologiques, suivi du développement de la vigne. Le suivi des conditions météorologiques, passées et prévisionnelles, est également fréquemment utilisé. Ces informations permettent au producteur d'estimer le risque de contamination primaire, qui conditionne le déclenchement de la protection. Sa connaissance des spécificités du parcellaire lui permet de distinguer les parcelles les plus sensibles de celles les plus tardives.

Certaines règles de décisions sont associées aux observations réalisées par les producteurs, dont la valeur détermine le déclenchement ou non du traitement. Par exemple, la règle des « trois 10 » stipule que les infections primaires ont lieu lorsque les rameaux de la vigne atteignent 10 cm, que la température de l'air est d'au moins 10 °C et qu'il a plu au moins 10

mm de pluie dans les deux derniers jours (Baldacci, 1947, cité par Gessler et al., 2011). La procédure proposée par Kennelly et al. (2007) s'appuie également sur de simples indicateurs climatiques et phénologiques afin de prédire la période d'infection du mildiou. L'approche Mildium<sup>®</sup>, mise au point par Delière et al. (2015), mobilise des indicateurs climatiques, phénologiques, agronomiques et des observations en champs afin de déterminer l'utilité d'un traitement anti-mildiou ou anti-oïdium.

L'utilisation de systèmes d'alerte peut également être utilisée pour surveiller l'évolution de la maladie au niveau régional. En France, plusieurs systèmes d'alerte concernant le mildiou de la vigne existent. Les bulletins de santé du végétal (BSV) « Vigne » fournissent hebdomadairement une description de l'état sanitaire des vignobles et une analyse du risque des principaux organismes nuisibles à l'échelle régionale<sup>1</sup>, que les viticulteurs peuvent pondérer selon la sensibilité de leurs parcelles. A partir de différentes sources d'information, les BSV fournissent des indications sur le risque lié à certains bioagresseur au cours de la saison.

Par exemple, dans le BSV Vigne Edition Nord Aquitaine, le risque de mildiou de la vigne est représenté par un score de risque qualitatif estimé par rédacteurs allant de « faible » à « très élevé » (Figure 1.6.a). Cette notation repose sur les prévisions de modèles épidémiologiques, l'observation de l'état sanitaire des réseaux de témoins non traités, les suivis biologiques en laboratoire et sur l'expertise. Elle est actualisée chaque semaine en fonction des nouvelles informations disponibles.

Dans le Bordelais, l'IFV et le conseil interprofessionnel des vins de Bordeaux (CIVB) assurent la publication hebdomadaire d'un bulletin d'alerte dans lequel le risque épidémique des principales bioagresseurs de la vigne est estimé à partir de différentes prévisions épidémiques. Dans ces bulletins, le risque épidémique est traduit par différentes variables (risque potentiel d'infection et fréquence théorique d'attaque) ; les estimations de ces variables sont décrites par un résumé et des cartes des prévisions (Figure 1.6.b). Ces bulletins sont disponibles sur la plateforme Epicure<sup>2</sup> de l'IFV.

D'autres systèmes d'alerte permettent d'informer les viticulteurs de l'arrivée de la maladie en temps réel grâce à une démarche participative. C'est le cas de Web Alerte Vigne, un système collaboratif de surveillance mis en place par l'IFV dans le Bordelais dès 2009. Cet outil repose sur un réseau d'acteurs de terrain volontaires, qui enregistrent des informations et des observations – maladies, dont le mildiou, ravageurs ou accidents climatiques tels que la grêle – via l'outil, disponible en ligne<sup>3</sup>. Ces observations sont traitées et restituées à l'ensemble de la communauté technique via la plateforme Epicure sous la forme d'une carte de l'état sanitaire du vignoble (Debord et al., 2017).

---

<sup>1</sup> Voir la page dédiée au BSV sur le [site](#) du Ministère de l'agriculture et sur le site d'[EcophytoPIC](#)

<sup>2</sup> Bulletins disponibles en ligne : <https://www.vignevin-epicure.com>

<sup>3</sup> Outil disponible à cette adresse : <http://www.webalertevigne.com/>

(a)

**Evaluation du risque 2019 :**

Suite à des conditions exceptionnelles liées aux orages du 23 et 24/04, le modèle a détecté des contaminations dites « atypiques ». Des éventuelles taches pourraient sortir d'ici début de semaine prochaine.

**Selon le modèle, des contaminations pré-épidémiques sont annoncées en cas de petites pluies (< à 2mm) sauf pour la moitié du sud médoc où il s'agirait de faibles contaminations épidémiques. Cependant, en cas de pluies un peu plus importantes, les premières contaminations épidémiques pourront se généraliser sur le vignoble.**

La réceptivité de la vigne est atteinte.

A ce jour, un temps instable est annoncé Vendredi prochain pour cette semaine (prévisions météo incertaines). **Vérifiez bien les prévisions météo sur votre secteur.**

**Situation globale**



▲ **Risque faible (contaminations pré-épidémiques) pouvant devenir favorable (contaminations épidémiques) en cas de pluies plus importantes**

**Situation sur vignoble situé sur la moitié du Sud Médoc**



▲ **Risque favorable (contaminations épidémiques) en cas de pluies**

(b)

### Informations des modèles Potentiel Système version 2019

#### Mildiou

##### Risque potentiel d'infection:

Les hauteurs de pluie enregistrées sont très proches des prévisions de mardi dernier. Cela s'est donc traduit par l'installation d'un risque potentiel fort sur le vignoble médocain, des Graves-Sauternais, du Libournais et des vignobles limitrophes. La quasi absence de précipitations cette semaine devrait favoriser une baisse du niveau de risque potentiel qui passera de fort à faible. Seuls le Sud Est du Bordelais, le centre du Médoc, le Libournais et "sa grande couronne" resteront à un niveau fort lundi prochain. En cas de pluies plus abondantes et proches de H3, le risque potentiel s'aggraverait partout en passant à un niveau fort voire très fort à l'exception de l'Est Entre Deux Mers où il serait encore faible.

##### Carte de représentation du risque d'épidémie de mildiou établie à partir de l'EPI, modèle Potentiel Système version 2019

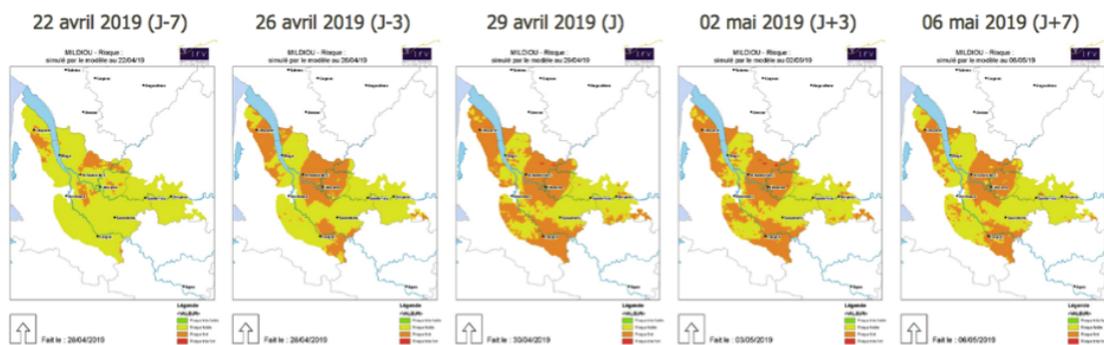


Figure 1.6 : Descriptions du risque d'attaque de mildiou dans le Bordelais extraites de deux bulletins d'alerte :

(a) description du risque extraite du Bulletin de Santé du Végétal Vigne n° 6 du 30 avril 2019 (édition Nord Aquitaine comprenant la Dordogne, la Gironde et le Lot-et-Garonne) et disponible en ligne sur le site de la DRAAF Nouvelle Aquitaine. Cette description est complétée de résultats de modélisation et de rapports d'observation (Annexe B).

(b) Résumé et carte représentant le risque d'épidémie de mildiou. Ces deux éléments sont dérivés des prévisions des modèles épidémiques de l'IFV et extraits du bulletin n° 5 de la semaine du 29 avril au 6 mai 2019 édité par l'IFV et disponibles sur la plateforme Epicure. Cette carte représente le risque d'épidémie de mildiou établi à partir des prévisions des modèles Potentiel Système de l'IFV. Cette carte est complétée d'un résumé et d'autres cartes (Annexe C).

Les producteurs peuvent également se référer aux recommandations de conseillers viticoles travaillant pour les distributeurs, les coopératives ou les organismes de développement, comme les instituts techniques et les chambres d'agriculture. Ces derniers connaissent la situation phytosanitaire dans plusieurs vignobles et se basent eux-mêmes sur plusieurs sources d'information pour apporter leur expertise. Certains organismes ont leur propre système de prévision afin de suivre la dynamique de l'épidémie en cours de saison. C'est notamment le cas de l'IFV, qui s'appuie sur les prévisions de modèles épidémiques pour détecter les périodes de contaminations primaires massives dans plusieurs vignobles français (IFV, n.d.).

Les prédictions de modèles épidémiologiques sont également utilisées dans le raisonnement du premier traitement. Plusieurs modèles ont été développés en France, en Suisse, en Australie, en Allemagne et en Italie notamment, afin d'identifier les périodes favorables au développement de la maladie (infection ou sporulation), et pour assister les viticulteurs dans leur décision (Pertot et al., 2017). En France, Tran Manh Sung et al. (1990) ont développé le modèle POM afin d'estimer la date à laquelle les oospores sont prêts à germer. Le modèle MILVIT estime un indice de risque basé sur le nombre d'évènements climatiques favorables aux contaminations (Magnien et al., 1991).

Dans le Bordelais, les modèles Potentiels Systèmes (Strizyk, 1994) évaluent le risque potentiel de contamination à partir de l'écart entre les relevés météorologiques actuels du millésime et les conditions climatiques passées. Les prévisions des modèles sont ensuite validées sur le terrain par le suivi de témoins non traités. L'IFV de Bordeaux travaille essentiellement avec ces derniers modèles pour piloter l'ensemble de ses travaux, assurer la parution du bulletin hebdomadaire pour le CIVB et assister le comité de rédaction du BSV dans son évaluation des risques épidémiques (IFV, n.d.).

Il a été démontré que l'utilisation de modèles épidémiologiques dans le raisonnement des traitements pouvait entraîner une réduction significative du nombre d'applications de fongicides par rapport aux pratiques actuelles, tout en limitant le développement du mildiou (Caffi et al., 2010 ; Madden et al., 2000 ; Menesatti et al., 2015). Par exemple, le modèle de Rossi et al. (2008) permet d'identifier les périodes durant lesquelles le risque d'infection oosporique est élevé. Caffi et al. (2010) montrent qu'entre 33 et 86 % des traitements n'étaient pas appliqués lorsque la lutte chimique était déclenchée à partir des prévisions du modèle de Rossi et al. (2008). Menesatti et al. (2015) ont reporté des résultats similaires lorsque le premier traitement était appliqué à la date d'apparition prédite. Dans la pratique, peu d'entre eux ont été mis en application à cause de l'absence d'équipement technique dans les plus petites exploitations ou en raison du manque de précision des mesures météorologiques (Dalla Marta et al., 2005b).

Certains de ces modèles ont toutefois été utilisés pour développer des OAD. La majorité des viticulteurs établissent leurs stratégies d'intervention selon les informations issues de ces outils, qu'ils utilisent soit directement, soit par le biais des organismes de conseil. Dans le Bordelais, les modèles Potentiels Systèmes sont intégrés dans la plateforme Epicure de l'IFV. Cette plateforme fournit aux viticulteurs une estimation du risque d'infection semaine après semaine à partir des prédictions du modèle, alimenté par des données et prévisions météorologiques ; ces résultats de simulations sont validés en permanence tout au long de la

saison par confrontation aux observations collectées dans un réseau de parcelles non traitées (Raynal et al., 2012). En Italie, l'OAD vite.net<sup>®</sup> a été développé dans le but de raisonner l'usage des pesticides en viticulture et notamment des fongicides anti-mildiou (Rossi et al., 2014). L'OAD fait appel aux estimations d'un modèle mécaniste développé par Rossi et al. (Rossi et al., 2008b), prédisant les périodes d'infections oosporiques en début de campagne à partir de données environnementales. Les estimations du modèle sont notamment utilisées pour déclencher le premier traitement anti-mildiou de la saison. Cette approche a conduit les expérimentateurs à débiter les traitements plus tardivement que les viticulteurs et a permis d'obtenir une réduction médiane de 54 % du nombre d'applications fongicides pour lutter contre le mildiou (Caffi et al., 2010).

## **Chapitre 2. Problématique et organisation du manuscrit**

### **2.1. Problématique et cas d'étude**

Supprimer les premiers traitement anti-mildiou inutiles en reportant le déclenchement de la lutte chimique contre le mildiou constitue une méthode prometteuse pour réduire le nombre d'interventions. Le report du premier traitement peut se baser sur différents indicateurs, dont la valeur déterminera l'éventuelle nécessité de traiter. Cette stratégie permet d'économiser une part substantielle des traitements fongicides, tout en maintenant un niveau de protection satisfaisant contre la maladie. Dans les exemples mentionnés, le premier traitement est déclenché avant ou au moment de l'infection de la vigne par le pathogène, c'est-à-dire avant la date d'apparition des premiers symptômes.

L'hypothèse générale proposée dans cette thèse est que le report de la date du premier traitement à la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou permettrait de réduire l'usage des fongicides dans les vignobles. Cette stratégie peut être perçue comme risquée par certains viticulteurs car la maladie progresse parfois rapidement après son apparition en cas de conditions climatiques favorables à son développement. Or, il a été démontré que cette situation n'était pas toujours observée dans les vignobles, du fait de la variabilité des épidémies de mildiou.

Les résultats de Caffi et al. (2014) prouvent que le mildiou n'apparaît pas systématiquement d'une année sur l'autre sur un même site. Caffi et al. (2010) rapportent l'absence de la maladie dans certaines parcelles au cours d'expérimentations menées en Italie entre 2006 et 2008. De plus, la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou est suspectée d'avoir un impact sur le développement du pathogène durant la saison. En effet, du fait de la multitude de cycles de la maladie, une infection précoce risque de conduire à une plus forte sévérité (Dubos, 2002). Il a aussi été montré que les parcelles infectées tardivement présentent des niveaux plus faibles d'incidence et de sévérité (Kennelly et al., 2007). Cela peut s'expliquer par le fait que le mildiou de la vigne est une maladie polycyclique, ce qui signifie qu'une première infection précoce augmente le nombre de cycles asexués ainsi que les taux d'infection au cours de la saison. Ces éléments nous amènent donc à formuler la problématique générale de la thèse :

**La date d'apparition du mildiou de la vigne est-elle un indicateur utilisable pour réduire le nombre de traitements fongicides et pour anticiper l'état sanitaire de la parcelle en fin de saison ?**

Afin de répondre à cette problématique nous avons choisi de nous appuyer sur le cas des vignobles bordelais. Le Bordelais est l'un des bassins viticoles les plus prestigieux en France.

L'exportation de ces vins est très importante, notamment vers les Etats-Unis et la Chine (FranceAgriMer, 2019), et a généré près de 2,07 milliards d'euros en 2018<sup>1</sup>.

Situés sur la côte atlantique, ces vignobles sont sujets à des conditions climatiques très favorables au développement du mildiou de la vigne (Dubos, 2002). Le Bordelais fait partie des régions viticoles ayant reçu le plus de traitements phytosanitaires en 2016 avec 24,7 traitements (Service de la Statistique et de la Prospection, 2019a). En 2013 et 2010, 10,1 et 7,9 traitements fongicides ont été appliqués pour lutter contre le mildiou de la vigne, représentant 44 et 41 % de l'ensemble des traitements phytosanitaires dans les vignobles bordelais (Service de la Statistique et de la Prospection, 2015a). Dans une démarche de mise en place des programmes de réduction des traitements, les instituts de conseil et de recherche viticoles implantés dans la région ont mis en place un réseau de témoins non traités dans lequel les principaux bioagresseurs de la vigne sont suivis hebdomadairement par des observateurs. Les données issues de ces observations alimentent au fur et à mesure de l'année les modèles épidémiologiques, notamment les modèles Potentiel Système de l'IFV. Elles sont également utilisées par les rédacteurs des BSV Nord Aquitaine, en complément du suivi d'oospores en laboratoire et de prévisions météorologiques et épidémiques, afin de fournir une estimation du risque phytosanitaire en cours de saison.

Par conséquent, le Bordelais est aussi l'une des régions dans lesquelles le développement du mildiou est le mieux documenté. Les travaux des organismes de conseil et de développement ont permis de mettre en évidence la variabilité des épidémies de mildiou dans les vignobles bordelais. La date d'apparition des premières taches de mildiou dans le réseau de témoins non traités suivis dans le cadre du BSV est fournie dans les bilans de campagne associés. Entre 2010 et 2018, les premiers symptômes de mildiou ont été, selon les années, détectés entre le 29 avril et le 8 juin (Chambre d'Agriculture de Gironde, 2018a). Des résultats similaires ont été observés par Savary et al. (2009) en 2006 et 2007. Cependant, peu d'éléments concernant la distribution moyenne des dates d'apparition sur l'ensemble du réseau de témoins non traités sont disponibles à l'heure actuelle dans le Bordelais. Par ailleurs, le suivi des épidémies de mildiou dans le réseau de témoins non traités suivis par l'IFV entre 1993 et 1997 a permis de montrer que, certaines années, les dégâts liés au mildiou de la vigne pouvaient être plus faibles, voire nuls. Par exemple, en 1995, il a été estimé qu'en moyenne l'incidence et la sévérité de la maladie étaient de 2 et 0,2 %, respectivement, sur feuilles et grappes (Raynal and Coulon, n.d.). Delière et al. (2013) montrent par ailleurs que le niveau de contamination varie entre les différentes parcelles d'une même exploitation au cours d'un même millésime. Cependant, la probabilité que les attaques de mildiou restent limitées n'a jamais été estimée dans cette région.

Plusieurs études ont été menées pour mesurer l'exposition des viticulteurs du Bordelais à différents fongicides et pour estimer l'impact de cette exposition sur la santé. Ces études ont montré que l'exposition des travailleurs viticoles de Gironde aux pesticides favorisait le

---

<sup>1</sup> Voir l'article de Capital « Record des vins et spiritueux à l'export malgré la Chine », disponible via ce [lien](#).

développement de la maladie de Parkinson et de certaines maladies neurodégénératives (Baldi et al., 2011, 2003a, 2003b, 2001; Provost et al., 2007). Or, l'impact du raisonnement des traitements phytosanitaires sur l'exposition des opérateurs n'a jamais été étudié.

## **2.2. Questions de recherche et organisation du manuscrit**

Afin de pouvoir répondre à la problématique, cette dernière a été décomposée en plusieurs questions.

Les épidémies de mildiou varient d'un site à l'autre et d'une année sur l'autre. En raison de cette variabilité et afin de limiter les traitements non nécessaires, il est recommandé d'adapter l'usage de fongicides en fonction des conditions environnementales locales et annuelles. Une stratégie de lutte recommandée consiste à déclencher le premier traitement fongicide après la fin de la période d'incubation de la première infection primaire, correspondant à la date à laquelle les premiers symptômes apparaissent.

Ainsi, la date d'apparition des premiers symptômes est déterminante pour la protection du vignoble. Cette date détermine en partie le nombre de traitements fongicides qui seront appliqués pendant la saison et doit donc être estimée avec précision chaque année. En effet, une estimation inexacte de cette date pourrait entraîner une augmentation non nécessaire du nombre de traitements fongicides. En revanche, si la date d'apparition des symptômes est estimée trop tard, le risque d'attaque du mildiou peut être sous-estimé et la protection des vignes peut s'avérer insuffisante. Cette situation peut entraîner des pertes de rendement et de qualité tout en contribuant à augmenter le nombre de traitements si des interventions de rattrapages s'avèrent nécessaires pour limiter le développement de maladies.

Si les dates d'apparition des premières taches de mildiou au niveau de la région sont documentées dans la littérature technique, peu d'éléments existent concernant la variabilité des dates d'apparition à l'échelle du parcellaire. Ainsi, la date d'apparition des premiers symptômes reste difficile à estimer à l'échelle d'un secteur géographique d'appellation ou du parcellaire d'une exploitation. De ces constats découle notre première question de recherche :

**Question n° 1 : Comment se positionnent en pratique les dates des premiers traitements réalisés par les viticulteurs par rapport aux dates d'apparition du mildiou dans le Bordelais ?**

Pour répondre à cette question, nous avons d'abord défini la distribution des dates d'apparition des premiers symptômes de mildiou dans le Bordelais (question n° 1.1). Cette question fait l'objet du **Chapitre 4** de la thèse.

Dans un second temps, nous avons défini la distribution des dates de la première application fongicide anti-mildiou dans les vignobles bordelais (question n° 1.2). Cette question sera traitée dans le **Chapitre 6**.

La comparaison des dates de premiers traitements et des dates d'apparition des premiers symptômes de mildiou sera ensuite traitée dans le **Chapitre 6**.

Afin de connaître le risque d'apparition des premiers symptômes et de déclencher les traitements, les viticulteurs se fient à plusieurs sources d'informations, l'une d'elles étant les conditions climatiques au cours de la saison. En effet, le climat affecte différentes étapes du cycle de vie du pathogène. En particulier, la température et les précipitations jouent un rôle structurant dans la maturation et la germination des oospores, la sporulation, la dispersion et la survie des zoospores. Or, ces étapes sont déterminantes dans l'apparition des premiers symptômes de mildiou. Ces éléments nous amènent à énoncer la seconde question de la thèse :

**Question n° 2 : Les conditions climatiques impactent-elles la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou dans un parcellaire du bordelais ?**

Cette question sera abordée dans le **Chapitre 4**.

Les connaissances expertes font partie des informations sur lesquelles les viticulteurs s'appuient pour déclencher le premier traitement. L'expertise est notamment utilisée dans les bulletins d'alerte phytosanitaires afin d'estimer le risque d'apparition des premiers symptômes au cours de la saison. Dans ces bulletins, les connaissances des conseillers, techniciens et ingénieurs viticoles sont présentées de manière qualitative, par exemple, au moyen d'une échelle de risque. Cette procédure présente plusieurs avantages. D'une part, elle intègre de nombreuses informations qui peuvent difficilement être utilisées ensemble pour obtenir une prévision. Cependant, elle présente aussi certains inconvénients, notamment concernant l'absence d'information relative à l'incertitude de la prévision de l'expert.

L'élicitation probabiliste d'expert est une méthode qui permet de quantifier le jugement d'un expert au moyen d'une distribution de probabilité, ce qui permet de décrire l'incertitude de l'expert relative à la quantité estimée. Cette approche a déjà été utilisée dans divers domaines, dont l'analyse des risques pour la santé et les sciences environnementales. A notre connaissance, l'élicitation probabiliste n'a à ce jour jamais été utilisée pour estimer les dates d'apparition des symptômes d'une maladie des plantes. Ces différents éléments nous conduisent à formuler une troisième question de recherche :

**Question n° 3 : L'élicitation probabiliste d'expert permet-elle d'estimer la date d'apparition du mildiou et le démarrage de l'épidémie à l'échelle du vignoble ?**

Cette question fait l'objet du **Chapitre 5**.

A l'heure actuelle, plusieurs études montrent que le report de la date de la première application fongicide réduit le nombre d'interventions. L'utilisation de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou pour déclencher le premier traitement n'a cependant jamais été étudiée. Si cette stratégie permet de réduire le nombre de traitements, il est possible qu'elle ait également un impact sur l'exposition des viticulteurs aux fongicides anti-mildiou.

Or, l'impact d'une réduction du nombre de traitements sur l'exposition des opérateurs aux pesticides n'a à ce jour jamais été estimé. De ces différents constats découle la quatrième question de recherche de la thèse :

**Question n° 4 : Quel est l'impact de la date de la première application fongicide anti-mildiou sur le nombre total de traitements fongicides et sur l'exposition des opérateurs ?**

Pour répondre à cette question, nous avons d'abord estimé, dans les vignobles bordelais, la réduction du nombre de traitements fongicides induite par un report de la date de la première intervention jusqu'à la date d'apparition des premiers symptômes.

Dans cette région, nous avons ensuite calculé la réduction d'exposition des opérateurs résultant de cette stratégie, pour les principales molécules fongicides utilisées pour lutter contre le mildiou.

Cette question fera l'objet du **Chapitre 6** de la thèse.

La variabilité des épidémies de mildiou de la vigne se traduit également par une variabilité de l'état sanitaire des parcelles de vignes en fin de saison. Il a en effet été montré que certaines années, le niveau de dégâts sur feuilles et grappes en fin de saison restait très faible, comme ce fut par exemple le cas en 1995 dans le dispositif de témoins non traités de l'IFV. Plusieurs modèles épidémiologiques existent aujourd'hui dans la région de Bordeaux. Ces modèles fournissent aux viticulteurs une prévision du développement du mildiou à l'horizon d'une voire deux semaines, mais ne produisent aucune prévision pour la fin de la saison. La prévision d'une forte ou d'une faible attaque permettrait aux viticulteurs de moduler l'utilisation des produits fongicides en fonction du risque, limitant ainsi les pulvérisations inutiles.

Le développement du mildiou de la vigne étant étroitement lié aux conditions climatiques, il est possible que ces dernières impactent l'état sanitaire d'un vignoble en fin de saison. Par ailleurs, le mildiou étant une maladie polycyclique, une infection précoce pourrait conduire à un plus grand nombre de cycles de contaminations et donc à un risque élevé de forte contamination. Ces éléments nous amènent à formuler la dernière question de recherche :

**Question n° 5 : Peut-on estimer le risque que le niveau de dégâts causés par le mildiou soit élevé en fin de saison à partir de la date d'apparition des premiers symptômes et de variables climatiques ?**

Cette question fait l'objet du **Chapitre 7** de la thèse.





# PARTIE II

—

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

## Chapitre 3. Matériel et méthodes

Ce chapitre vise à présenter la démarche générale de la thèse et ses différentes étapes. Chaque étape s'appuie sur des données, qui sont décrites dans ce chapitre, et des méthodes d'analyse spécifiques. Une description plus détaillée des méthodes d'analyse de données sera effectuée dans les quatre chapitres suivants.

### 3.1. Démarche globale et schéma conceptuel de la thèse

L'objectif de la thèse est d'estimer les conséquences de l'utilisation de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne sur l'usage de fongicides et sur l'anticipation de l'état sanitaire en fin de saison d'une parcelle atteinte par le mildiou.

Nos travaux se sont déroulés en trois temps :

- i. Tout d'abord, nous avons estimé la distribution des dates probables d'apparition du mildiou dans le Bordelais à partir de deux sources d'informations disponibles : une base de données régionale d'épidémiologie d'une part et le jugement de plusieurs experts d'autre part. Les questions de recherche associées sont les questions n° 1.1 et n° 3. Elles sont respectivement traitées dans le Chapitre 4 et le Chapitre 5. Dans le Chapitre 4, nous avons également évalué l'impact de plusieurs variables climatiques sur nos estimations, ce qui nous a permis d'aborder la question de recherche n° 2.
- ii. Les distributions des dates d'apparition ont été utilisées pour estimer le nombre de traitements anti-mildiou induits par un report du premier traitement à l'apparition des premiers symptômes. Ces estimations ont été comparées à celles issues de la distribution des dates de premier traitement actuellement observée dans le Bordelais, que nous avons estimée grâce aux données d'enquêtes « Pratiques culturelles ». En comparant ces deux résultats, nous avons évalué l'impact de l'utilisation de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou sur le nombre de traitements et sur l'exposition des opérateurs dans cette région. Cette étape correspond au Chapitre 6 de la thèse, dans lequel les questions n° 1.2, n° 1 et n° 4 sont traitées.
- iii. Dans un dernier temps, nous avons estimé l'effet de la date d'apparition des premiers symptômes sur le risque d'atteindre un fort niveau de contamination de mildiou en fin de saison. L'impact de plusieurs variables climatiques a également été étudié. Cette dernière étape fait l'objet du Chapitre 7 de la thèse et permet de répondre à la question n° 5.

Chaque étape de cette démarche s'appuie sur l'analyse de différents jeux de données.

### 3.2. Données

#### 3.2.1. Données issues d'observations

Afin de suivre le développement des différentes maladies cryptogamiques de la vigne et alimenter les modèles épidémiologiques, des mesures de fréquence et d'intensité sont réalisées chaque année par l'IFV et ses partenaires (FREDON, Chambres d'Agriculture, châteaux) selon le protocole présenté en Annexe D. Le suivi est effectué sur un réseau de

parcelles couvrant toute la façade atlantique, notamment dans la région de Bordeaux (Figure 3.1). Entre 2010 et 2017, près de 543 parcelles ont été observées au moins une fois, représentant 1 282 sites-années. Dans le Bordelais, le nombre de parcelles observées et le nombre de sites-années sont de 122 et 258, respectivement. Dans cette région, le nombre de sites-années suivis chaque année varie de 23 à 53 entre 2012 et 2017 (Figure 3.2).

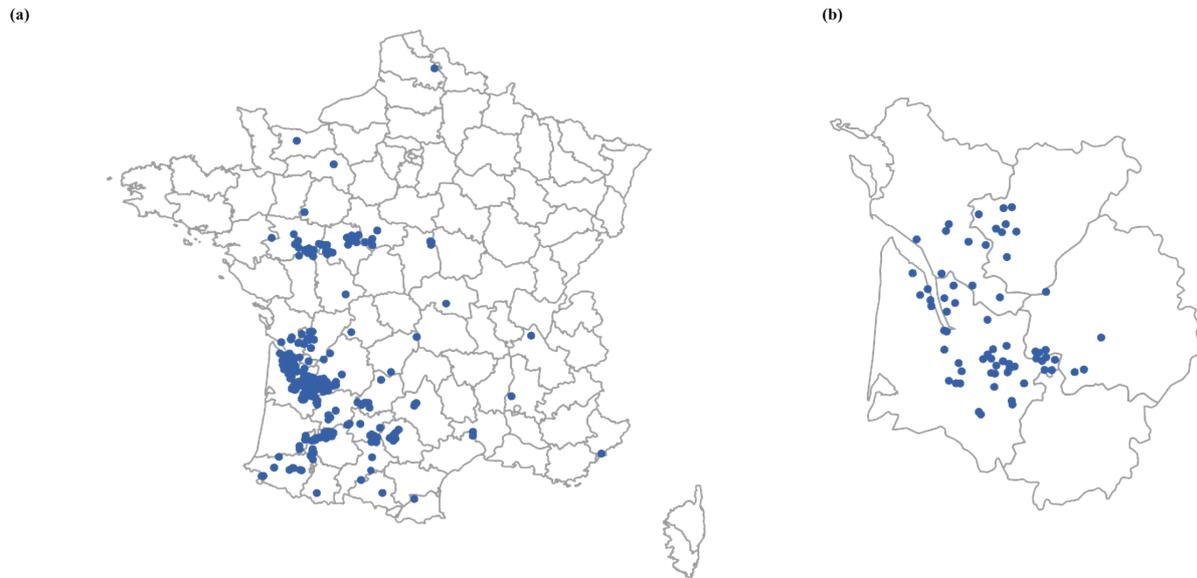


Figure 3.1 : Carte représentant les communes dans lesquelles se trouvent les témoin non traités suivis entre 2010 et 2017 par l'IFV et ses partenaires (a) sur la façade atlantique ( $n = 543$ ) et (b) dans la région de Bordeaux ( $n = 258$ ).

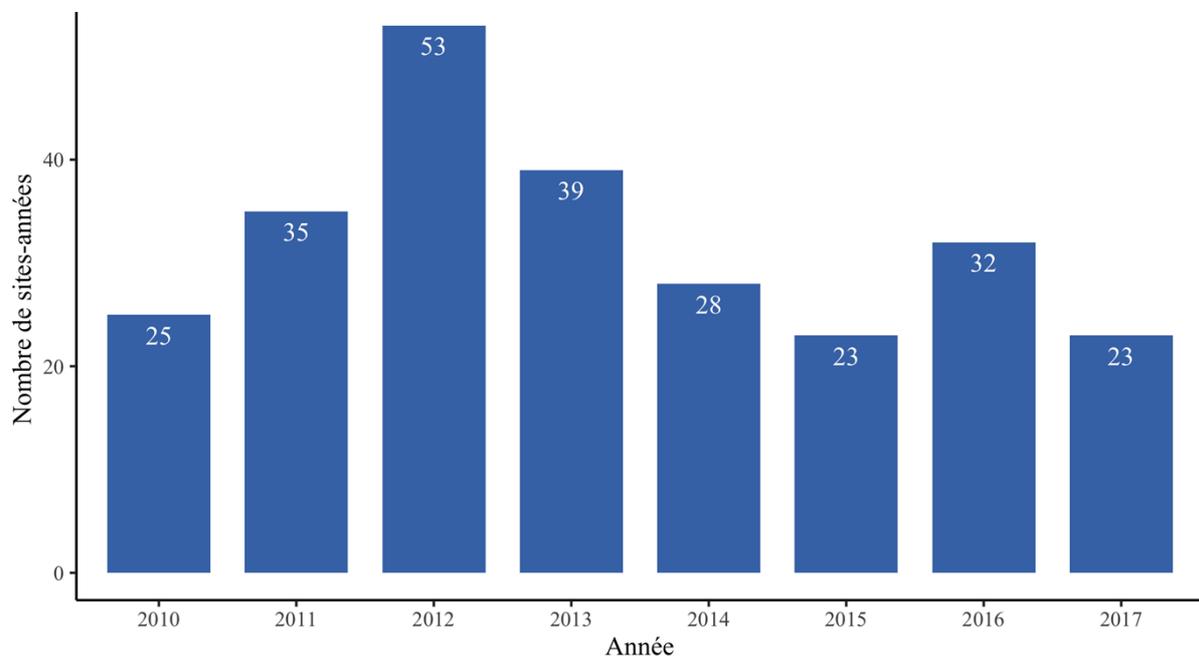


Figure 3.2 : Nombre de sites-années suivis par année dans le Bordelais par l'IFV et ses partenaires entre 2010 et 2017.

Les observations sont réalisées hebdomadairement sur des ceps qui ne reçoivent pas de pesticides en saison. Pour répondre à cette condition, les observateurs définissent avec les

viticulteurs un témoin non traité (TNT) par parcelle. Un TNT représente un rang de ceps se trouvant idéalement en bordure de parcelle et en amont des vents dominants afin d'éviter les dérives de produits phytosanitaires. Ce rang non traité est entouré par deux voire trois rangs de garde pour mieux l'isoler des traitements du reste de la parcelle et ainsi limiter les effets de bordure (Figure 3.3 et Figure 3.4.a).

Dès la première observation de la campagne, deux placettes dites « fixes », F1 et F2, sont positionnées sur le rang observé. Composées de trois ceps chacune, leur emplacement est défini systématiquement dans chaque TNT à une piqueté de ceps (soit environ cinq ceps) des deux extrémités du rang observé (Figure 3.3 et Figure 3.4.b). Ces placettes, parce qu'elles sont positionnées a priori avant l'apparition des foyers, sont représentatives du vignoble dans son ensemble.

La taille des échantillons observés étant faible, et afin de suivre le plus précisément possible l'évolution de chaque maladie dans le TNT, l'observateur fixe une placette dite « mobile » par maladie étudiée (M : placette mildiou, O : placette oïdium et B : placette black rot). L'emplacement d'une placette mobile est défini lorsque les premiers foyers de cette maladie se déclarent dans le TNT. Ces placettes englobent les deux ceps entourant celui sur lequel apparaissent les premiers foyers d'une maladie (Figure 3.3).

Les ceps n'étant inclus dans aucune placette sont regroupés et qualifiés sous l'appellation « hors-placette », notée HP dans les grilles de saisies de l'IFV. L'état sanitaire sur cet ensemble du reste du rang est évalué de manière globale et noté par l'observateur dans les interfaces de saisies comme s'il s'agissait d'une placette de trois ceps. L'objectif de cette évaluation d'ensemble est de pouvoir mentionner si l'ensemble du rang présente une tendance moyenne conforme aux observations effectuées sur les placettes ou si celles-ci présentent une tendance différente de l'ensemble de la zone non traitée (Figure 3.3).

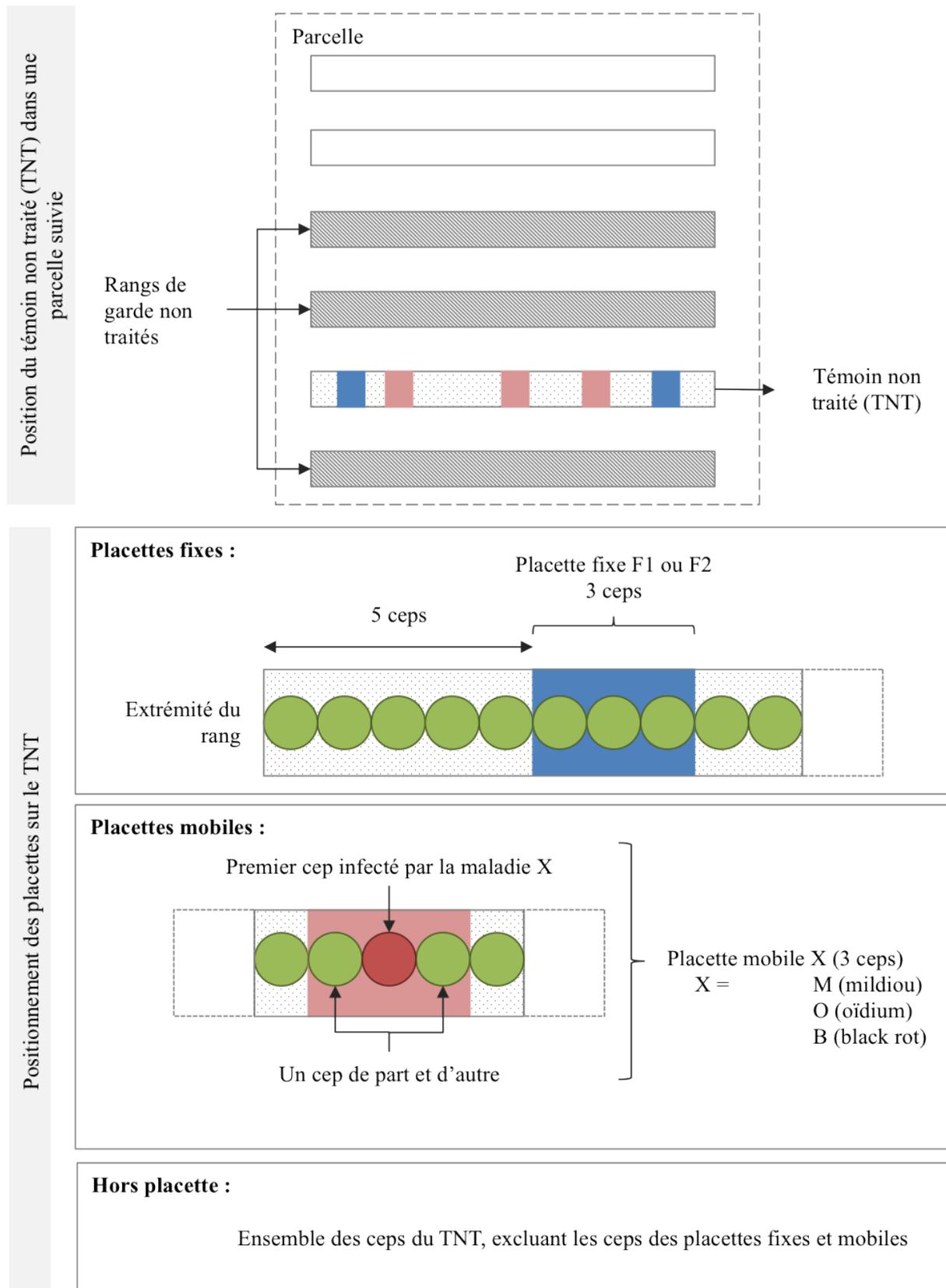


Figure 3.3 : Schéma expliquant le positionnement du TNT et des placettes d'observation sur le TNT (source : protocole IFV, Annexe D).



Figure 3.4 : Exemples de (a) témoin non traité et de (b) placette fixe suivis par l'Institut Français de la Vigne et du Vin et ses partenaires durant la campagne 2017 dans le Bordelais. Le rang constituant le témoin non traité, les rangs de garde et les ceps de la placette fixe sont signalés par des rubans (Photos : F. Brun et M. Chen).

Des observations épidémiologiques sont effectuées chaque semaine sur différents organes des vignes des TNT (Tableau 3.1). Elles correspondent à des mesures d'incidence (pourcentage d'organes touchés) ou de sévérité (pourcentage de la surface présentant des symptômes de la maladie) estimées à dire d'expert. Au début de la saison, les mesures sont réalisées sur l'ensemble du rang, c'est-à-dire le HP et les placettes fixes, les placettes mobiles n'étant pas encore positionnées. Durant la campagne, l'observateur peut donc disposer d'un rang entier et d'un nombre variable de placettes pour estimer hebdomadairement la fréquence et l'intensité

des attaques. Les observateurs sont invités à relever des indices leur permettant de rester cohérent<sup>1</sup> d'une semaine à l'autre dans une même parcelle. Par exemple, ils peuvent entourer les symptômes relevés sur les feuilles par un trait au marqueur, ou les repérer à l'aide d'agrafes par temps de pluie si la végétation est mouillée. Pour chaque TNT, le nombre de ceps total, le cépage et la commune sont également relevés. Le suivi s'interrompt lorsque les mesures d'incidence et de sévérité atteignent 100 %, ou au plus tard si ces valeurs extrêmes ne sont pas atteintes dans la seconde semaine d'août. Cette période marque habituellement l'arrivée au stade de la véraison et l'arrêt de sensibilité des grappes aux maladies. Dans la région de Bordeaux, 7 055 observations relatives au mildiou de la vigne ont été réalisées sur 274 sites-années entre 2010 et 2018.

Tableau 3.1 : Type d'observations par organe réalisées sur le réseau de TNT par l'IFV et ses partenaires afin de suivre l'évolution du développement des principales maladies cryptogamiques de la vigne.

| Mesure réalisée                         | Organe observé      |   |   |
|---|---------------------|---|---|
|   | Ceps <sup>(c)</sup> | Feuilles <sup>(d)</sup><br>(sur les deux faces) | Inflorescences/<br>Grappes <sup>(d)</sup> |
| Incidence (ou fréquence) <sup>(a)</sup> | ×                   | ×   | ×   |
| Sévérité (ou intensité) <sup>(b)</sup>  |                     | ×   | ×   |

<sup>(a)</sup> La fréquence, ou incidence, est le nombre d'organes touchés par une maladie particulière sur un nombre total d'organes observés dans la placette.

<sup>(b)</sup> L'intensité, ou sévérité, correspond à la proportion moyenne de la surface atteinte par la maladie sur l'ensemble des organes observés dans la placette.

<sup>(c)</sup> Observation effectuée sur la totalité des ceps du TNT, placettes et « hors-placette » inclus. Cette observation est essentiellement réalisée en début de saison, lorsqu'il y a peu de symptômes.

<sup>(d)</sup> Observations effectuées sur les placettes HP, F1 et F2 au début de la saison. Une fois que les placettes mobiles sont définies, le HP n'est plus suivi.

### 3.2.2. Variables environnementales

En l'absence de stations météorologiques systématiquement placées à proximité des parcelles suivies par l'IFV et ses partenaires, d'autres sources de données climatiques permettant

<sup>1</sup> Les mesures d'incidence et de sévérité ne sont pas censées diminuer d'une semaine à l'autre.

d'estimer les conditions météorologiques correspondantes à chaque parcelle suivie doivent être exploitées.

Le module d'analyse objective SAFRAN (Durand et al., 1999, 1993; Le Moigne, 2002), développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), est un système d'analyse atmosphérique à méso-échelle. Il calcule régulièrement des profils verticaux de température, d'humidité, de vitesse du vent, de couverture nuageuse, de précipitation et de rayonnement pour 615 zones climatiques homogènes couvrant la France. Pour cela, le module compile différentes sources d'information afin d'estimer chaque profil (Quintana Seguí et al., 2008; Vidal et al., 2010). Les variables atmosphériques sont finalement projetées sur une grille de 8 km de résolution. Pour ce faire, les profils verticaux estimés pour chaque zone climatique homogène sont utilisés pour évaluer les variables atmosphériques en fonction de l'altitude de chaque maille de la zone. Les données horaires sont ensuite estimées pour chaque point de la grille (Vidal et al., 2010).

Afin de pouvoir relier les observations réalisées dans les TNT de la région de Bordeaux, les données SAFRAN des grilles les plus proches de chaque site-année ont été collectées pour la période 2009 - 2018.

### **3.2.3. Expertise**

Trois campagnes de pronostic de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou ont été menées afin d'éliciter les connaissances expertes. Une campagne par an a été conduite dans plusieurs régions viticoles entre 2017 et 2019. La procédure générale de chaque campagne est détaillée ici. Une description plus fine des campagnes de 2017 et 2018 est réalisée dans le chapitre 2 de la thèse.

Les principales étapes d'une campagne sont les suivantes :

- **Définition de la quantité à estimer par les experts** : pour les trois campagnes d'élicitation menées durant la thèse, la quantité à estimer était le nombre de jours entre le 1<sup>er</sup> mars de l'année en cours et la date probable à laquelle serait atteint le seuil épidémiologique de 1 % de ceps malades dans une parcelle non traitée. Cette quantité permet de refléter la date probable d'apparition des premiers symptômes de mildiou dans une parcelle non traitée.
- **Identification des participants** : les personnes élicitées, qualifiées ci-après d'experts, doivent être capables d'estimer la quantité définie à l'étape précédente. Chaque année, un panel d'experts différent était mobilisé ; ces trois panels étaient constitués de conseillers techniciens viticoles d'instituts techniques, de conseillers de Chambres d'Agriculture Régionales, d'employés de châteaux, de chercheurs, de viticulteurs. Du fait de leur activité professionnelle, les participants ont une bonne connaissance des épidémies de mildiou dans leur zone d'activité. Selon les experts, cette zone s'étend de la parcelle au bassin de production.
- **Choix d'une méthode d'élicitation** : nous avons choisi d'utiliser l'élicitation probabiliste afin de formaliser le jugement des participants sous la forme d'une distribution de probabilité. Différentes méthodes d'élicitation existent (Morris et al., 2014). Dans notre étude, seule la méthode « Roulette » a été utilisée.

- **Choix d'un outil d'élicitation** : selon la campagne, l'outil d'élicitation utilisé était différent. L'outil MATCH Tool<sup>®</sup> (Morris et al., 2014) et l'outil L-i-cite ont été utilisés en 2017-2018 et en 2019, respectivement. Les deux outils sont disponibles en ligne<sup>1</sup>. Quel que soit l'outil choisi, la méthode de paramétrage de l'outil est restée identique et est décrite dans le chapitre 2 de la thèse.
- **Formation des experts à la méthode** : les experts ont été formés à l'utilisation de l'outil d'élicitation choisi pour chaque campagne. Dans un premier temps, la procédure d'élicitation a été présentée lors de réunions. Des démonstrations et des documents didactiques ont été mis à disposition des participants en complément. Parmi ces documents, une notice a été rédigée (Annexe E) et des tutoriels vidéo ont été mis en ligne.
- **Elicitation des experts** : entre 2017 et 2019, les experts ont été élicités durant le printemps. Chaque expert effectuait une première estimation, qu'il actualisait régulièrement jusqu'à l'apparition des premiers symptômes. Les pronostics des experts ont été confrontés aux dates d'apparition observées.
- **Retour des résultats aux experts** : les résultats des campagnes d'élicitation ont été restitués aux experts soit sous la forme d'une réunion annuelle, ayant lieu après la campagne d'élicitation, soit sous la forme de bulletins d'informations hebdomadaires, actualisés avec les nouveaux pronostics des experts. Ces bulletins permettaient aux experts de suivre l'évolution de leurs pronostics tout au long de la saison et de confronter leurs estimations à celles des autres experts (les pronostics étaient rendus anonymes) (Figure 3.5). Dans chaque région, les derniers pronostics de chaque expert étaient utilisés pour estimer une distribution des dates probables d'apparition des premiers symptômes de mildiou dans la région. Cette distribution était présentée aux experts et confrontée aux analyses statistiques des données issues d'observations des témoins non traités (Figure 3.6). Un exemple de bulletin est fourni en Annexe F.

---

<sup>1</sup> MATCH Tool<sup>®</sup> est en ligne via cette adresse :

<http://optics.eee.nottingham.ac.uk/match/uncertainty.php#> et L-i-cite est en ligne via cette adresse : <https://licite.arvalis-fr.com/licite/>

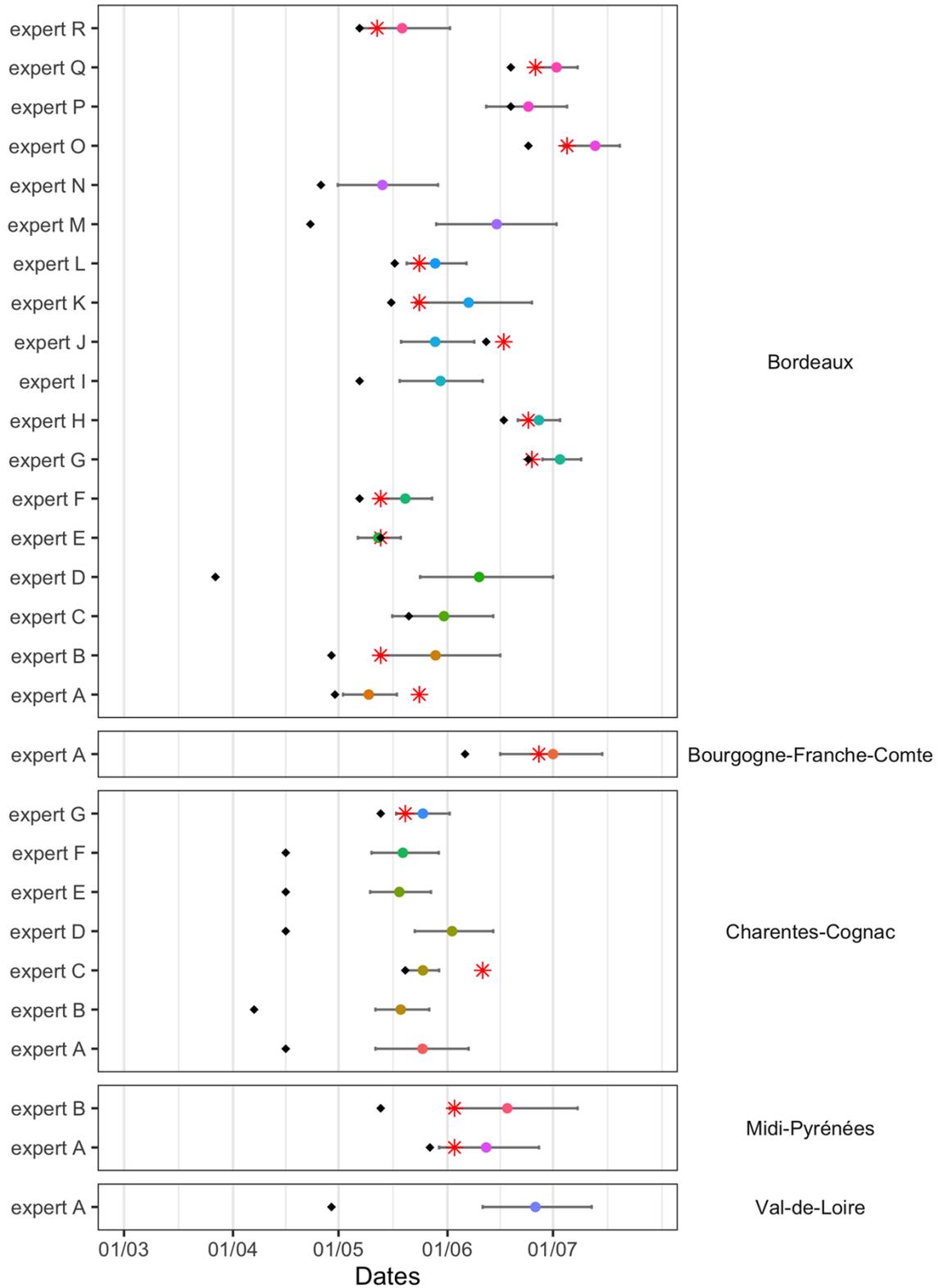


Figure 3.5 : Dernier pronostic de chaque expert au 18/06/2019 ; les participants sont regroupés par région (figure extraite du bulletin d'information édité le 18/06/2019). Le point de couleur représente la date médiane d'apparition du mildiou. Le trait horizontal gris correspond à l'intervalle de confiance à 90 %. Le losange noir représente la date à laquelle a été effectué le pronostic. Les pronostics sont anonymes ; chaque lettre correspond à un participant, réalisant son pronostic dans une seule région. L'étoile rouge correspond à la date d'apparition observée dans la parcelle de référence de l'expert.

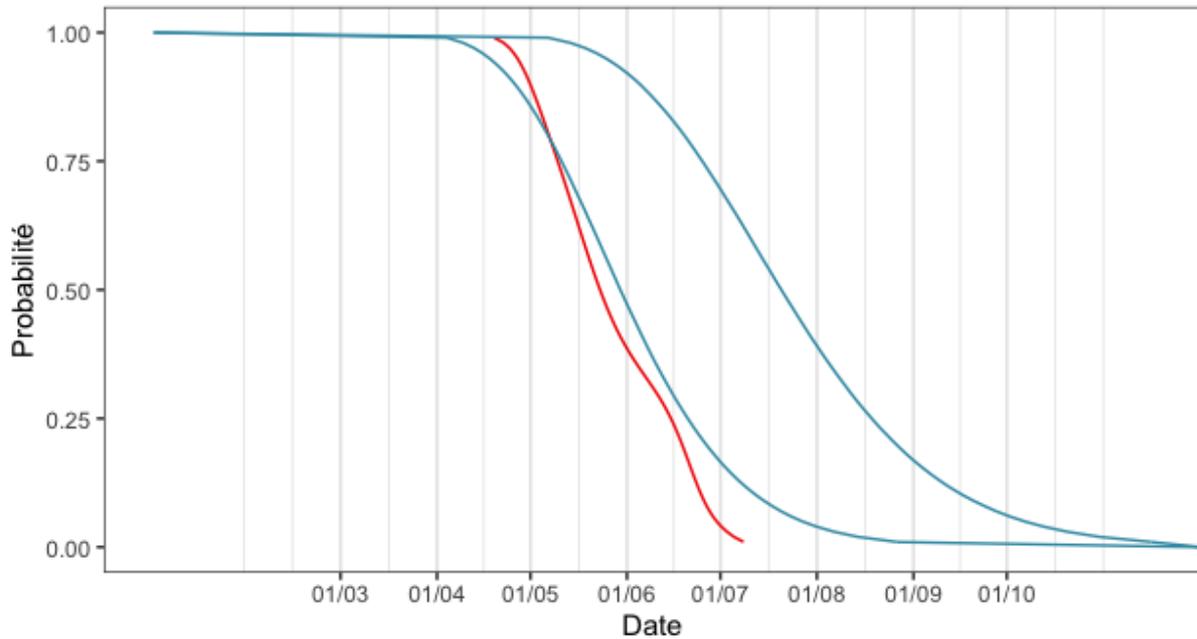


Figure 3.6 : Evolution de la probabilité qu'une parcelle reste saine au cours du temps dans la région de Bordeaux ; la couleur de la courbe représente la méthode d'estimation de la probabilité. La courbe rouge représente l'estimation issue de la moyenne des derniers pronostics des experts de la région de Bordeaux. Les courbes bleues représentent la probabilité issue des analyses des observations des témoins non traités réalisées en 2010 (courbe supérieure) et 2018 (courbe inférieure).

### 3.2.4. Pratiques culturales

En France, les enquêtes « Pratiques culturales viticulture » ont pour objectif de collecter des données détaillées sur les pratiques agricoles des exploitations viticoles, dont les pratiques phytosanitaires. L'objectif de ce dispositif est de décrire les pratiques phytosanitaires des viticulteurs et les raisonnements conduisant à déclencher les traitements sur les parcelles (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, n.d.). Quatre enquêtes sur les pratiques phytosanitaires en viticulture ont été réalisées en 2006, 2010, 2013 et 2016. A chaque campagne d'enquête, un questionnaire a été envoyé à un échantillon représentatif de viticulteurs de chaque bassin viticole. Les produits phytopharmaceutiques utilisés et les conditions de cette utilisation – date, raisonnement des interventions, modalités d'application, démarche de réduction des traitements et des doses, caractéristiques du pulvérisateur et pression parasitaire ressentie lors de la campagne étudiée – ont été répertoriés.

Dans le cadre de la thèse, seules les données concernant le Bordelais et les campagnes 2010, 2013 et 2016 ont été utilisées.

### 3.3. Utilisation des données disponibles

Les données présentées ci-avant sont utilisées dans différents chapitres afin de répondre aux questions de recherche formulées dans l'introduction (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Tableau récapitulatif des différents types de données utilisés pour répondre aux différentes questions de recherche et du chapitre correspondant.

| Question | Chapitre | Sources d'information |                   |                     |           |
|----------|----------|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------|
|          |          | Observations          | Données pratiques | Données climatiques | Expertise |
| n° 1.1   | 4        | ×                     |                   |                     |           |
| n° 1.2   | 6        |                       | ×                 |                     |           |
| n° 2     | 4        | ×                     |                   | ×                   |           |
| n° 3     | 5        |                       |                   |                     | ×         |
| n° 4     | 6        | ×                     | ×                 | ×                   | ×         |
| n° 5     | 7        | ×                     |                   | ×                   |           |

### 3.4. Schéma conceptuel de la thèse

Notre démarche repose sur un schéma conceptuel impliquant expertise, variables environnementales, variables épidémiologiques, pratiques agricoles et impact de ces pratiques sur l'exposition des opérateurs (Figure 3.7).

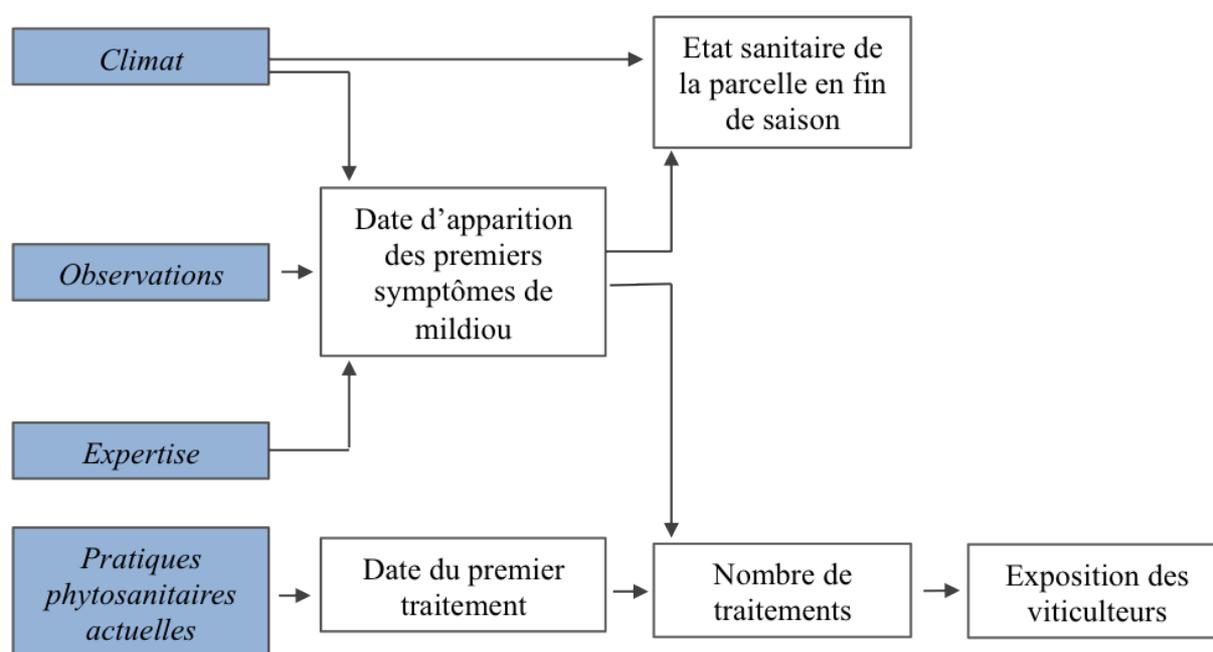


Figure 3.7 : Schéma conceptuel de la thèse. Les données utilisées pour répondre aux questions de recherche sont soulignées en bleu





PARTIE III

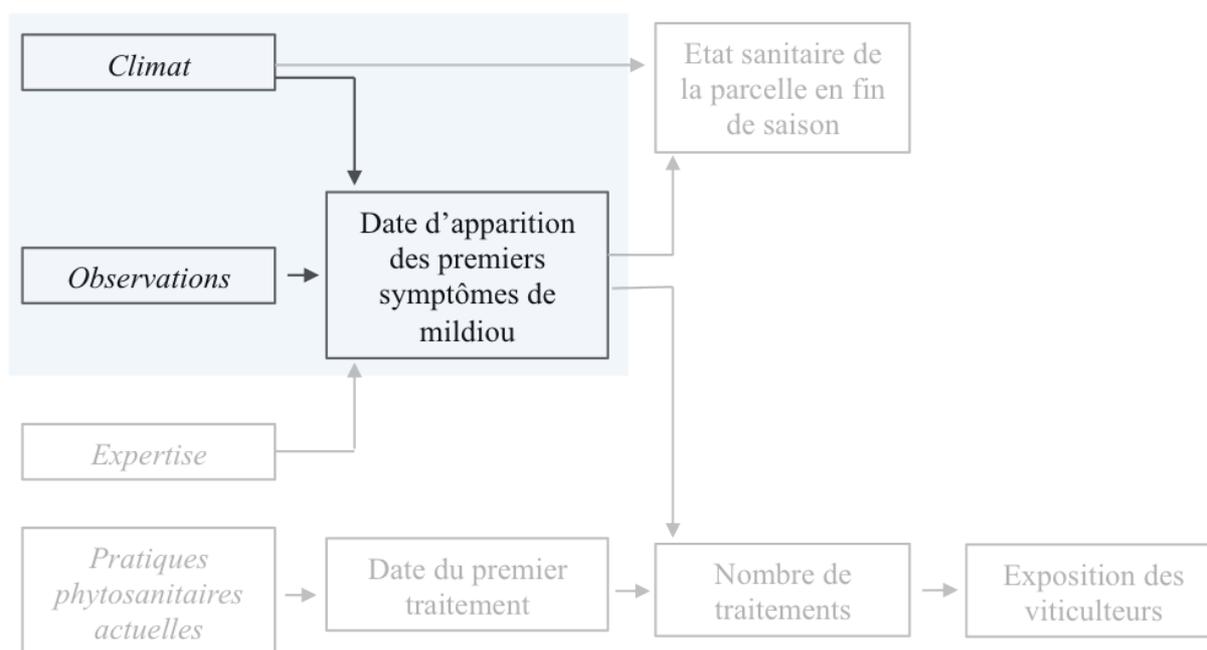
—

RÉSULTATS

## **Chapitre 4. Distribution des dates d'apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne dans le Bordelais**

Ce chapitre a été publié sous la forme d'un article scientifique dans la revue *Phytopathology* 109 (5), 787–795; [https://doi.org/ 10.1094/PHYTO-12-17-0412-R](https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-17-0412-R).

Il présente le développement d'une méthode d'estimation de la date d'apparition des premiers symptômes du mildiou de la vigne à partir de données issues d'observations et de données climatiques.



## **Résumé**

*Contexte* – Chaque année, le mildiou de la vigne est à l'origine de nombreux traitements fongicides, appliqués pour limiter son développement. La protection du vignoble contre cette maladie dépend fortement de la date d'apparition des premiers symptômes. Cette date est utilisée comme déclencheur du premier traitement de la saison.

*Questions de recherche* – Les questions traitées dans ce chapitre sont :

- Quelle est la distribution des dates d'apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne dans le Bordelais ?
- Peut-on estimer la date d'apparition de la maladie à partir de variables climatiques ?

*Matériel et méthodes* – La distribution des dates d'apparition des premiers symptômes de mildiou dans les vignobles bordelais a été estimée sur ceps et sur grappes grâce aux données épidémiologiques collectées par l'Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV) et ses partenaires dans 266 parcelles non traitées entre 2010 et 2017. Cette date pouvant être censurée, les techniques d'analyse de survie ont été utilisées pour traiter les données. Plusieurs modèles de survie ont été ajustés afin d'étudier l'impact de plusieurs variables climatiques sur l'apparition de la maladie sur les sites non traités.

*Résultats* – Entre 2010 et 2017, les premiers symptômes de mildiou de la vigne sont apparus à partir du début du mois de mai dans le Bordelais. La moitié des parcelles suivies présentaient des symptômes de mildiou entre la mi-mai et la mi-juin, selon les années. En moyenne, 29 % des parcelles ne présentaient pas de symptômes sur ceps à la fin du mois d'août et 42 % des parcelles ne présentaient pas de symptômes sur grappes à cette date. Nos résultats montrent un effet significatif de la hauteur des précipitations entre le mois de mars et juin sur la date d'apparition des symptômes. En outre, la date d'apparition des premiers symptômes sur ceps influence la date d'apparition sur grappes.

*Conclusion* – L'utilisation des techniques d'analyses de survie a permis d'analyser les données censurées et d'estimer l'impact de plusieurs facteurs sur la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou dans le Bordelais. Cette étude apporte de nouveaux éléments concernant la variabilité des épidémies de mildiou dans cette région.

**Mots clés** : Mildiou de la vigne, données censurées, analyses de survie.

## **Timing of grape downy mildew onset in Bordeaux vineyards**

### **Authors**

Mathilde Chen<sup>1,4</sup>, François Brun<sup>2</sup>, Marc Raynal<sup>3</sup>, David Makowski<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> ACTA, INRA, UMR Agronomie, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval Grignon, France

<sup>2</sup> ACTA, INRA, UMR AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France

<sup>3</sup> IFV, Bordeaux Nouvelle Aquitaine. UMT SEVEN, 71 Avenue E Bourlaux 33882 Villenave d'Ornon Cedex

<sup>4</sup> INRA, UMR Agronomie, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval Grignon, France

<sup>5</sup> CIRED, 45bis Avenue de la Belle Gabrielle, 94130 Nogent-sur-Marne, France

**Corresponding author:** M. Chen

**E-mail:** [mathilde.chen@acta.asso.fr](mailto:mathilde.chen@acta.asso.fr)

### **4.1. Abstract**

Grapevine downy mildew (GDM) is a severe disease of grapevines. Due to the lack of reliable information about the dates of GDM symptom onset, many vine-growers begin fungicide treatments early in the season. We evaluate the extent to which such preventive treatments are justified. Observational data for 266 untreated sites-years between 2010 and 2017 were used to estimate the timing of GDM onset on vines and bunches of grapes in South-West France (Bordeaux region), through survival analyses. The onset of GDM was not apparent on vines and bunches before early to mid-May, and the rate of GDM symptom appearance was highly variable across years. Depending on the year, 50% of the plots displayed symptoms between mid-May and late June for vines. For several years, our statistical analysis revealed that the proportion of plots with no symptoms was high in early August on vines (27.5% and 43.7% in 2013 and 2016) and on bunches (between 23 and 79% in 2011, 2013, and 2016). We found a significant effect of the amount of rainfall in spring on the date of symptom appearance. These results indicated that preventive fungicide application is unjustified in many vineyards, and that regional disease surveys should be used to adjust fungicide treatment dates according to local characteristics, in particular according to rainfall conditions in spring.

## **4.2. Introduction**

In France, grapevines (*Vitis vinifera* L.) are susceptible to several diseases, one of the most important being downy mildew. The disease is caused by *Plasmopara viticola*, which has a dimorphic life cycle. In autumn, sexual spores, called oospores (Wong et al., 2001), are produced. They overwinter above the vineyard ground (Dubos, 2002) and germinate in spring as macrosporangium, which releases zoospores (Dubos, 2002; Gessler et al., 2011). The latter generally spread with rain splashes to leaves, where it germinates and penetrates through stomata, causing primary infection after 7 to 10 days of incubation (Gessler et al., 2011). Sporangia, borne by sporangiophores, then emerge from affected host tissues. They are disseminated through wind and rain splashes to green parts of grapes, where they release asexual zoospores, which can then infect healthy tissues (secondary infection) and lead to yield losses (Dubos, 2002). Leaves damage are also responsible for a reduction in the sugar content, which induces a decline in the grapes quality (Jermini et al., 2010).

Given the deleterious effects of grape downy mildew (GDM) on vineyards, fungicides are almost systematically applied to control the disease. Currently, in the Bordeaux region, many vine growers begin applying fungicides early in spring, and spraying is then regularly repeated. This results in a large number of fungicide applications over the course of the growing season, with implications for the public and farmers' health and for the environment, and entailing greater production costs (Aubertot et al., 2005; Pimentel, 2005). In the Bordeaux vineyards, the mean number of fungicide applications on vines increased from 14.8 to 18.5 between 2010 and 2013, 52% of which were applied to control GDM (Service de la Statistique et de la Prospection, 2015a).

One widely recommended control strategy involves a first fungicide application after the end of the incubation period for the first primary infection, corresponding to the date on which the first symptoms appear. However, the lack of information on the appearance dates of GDM symptoms may contribute to the overapplication of chemicals in many situations. The dates on which GDM symptoms first appear on vines and bunches of grapes are not well known in France, particularly in the Bordeaux region. Vine growers and extension services need reliable information concerning these dates, which can indicate potential GDM severity. Indeed, the early occurrence of GDM symptoms on vines and on bunches is often associated with high disease severity (Dubos, 2002; Galet, 1977; Jermini et al., 2010). Accurate information about date on which GDM symptoms appear is also useful for determining the timing of the first fungicide application.

Typically, the observed dates of symptom onset correspond to time-to-event data. Particular care is required in their analysis, because symptom appearance dates are frequently censored. Plots displaying no observed symptoms during the surveyed period are considered to be right-censored, because they may develop disease symptoms at a later stage. Plots displaying symptoms before the start of the surveyed period are considered to be left-censored, because the precise date of symptom appearance is known to lie before the first observation date in such situations. Finally, on some plots, GDM symptoms may occur during a follow-up interruption, after the last observation date at which a negative result is obtained and before the first positive observation date. Such data are considered to be interval-censored.

Here, we analyzed a unique set of data including weekly monitoring of GDM symptoms on several vine leaves and bunches, collected from untreated plots in Bordeaux vineyards between 2010 and 2017. These data have never before been analyzed in details with a view to determining the most likely dates of GDM outbreaks. We used survival analysis methods to deal with both censored and uncensored data. Survival analysis is widely used in biomedical sciences, social sciences, engineering and ecology, but not in plant pathology, with a few exceptions (Copes and Thomson, 2008; Dallot et al., 2004; Esker et al., 2006; Ojiambo and Kang, 2013; Scherm and Ojiambo, 2004; Westra et al., 1994).

Based on our statistical analysis, we determined the most likely dates of GDM symptom occurrence on vines and bunches of grapes in Bordeaux vineyards. We analyzed the interannual variability of the date of symptom occurrence and estimated the proportion of sites remaining free from GDM symptom in the area studied. We compared the results obtained with parametric, semi-parametric, and non-parametric methods and we discussed the practical implications of our results in terms of timing of fungicide applications and for reducing the total number of applications.

### **4.3. Materials and Methods**

#### **4.3.1. Data**

GDM incidence data were collected from 2010 to 2017 by French Vine and Wine Institute (*Institut Français de la Vigne et du Vin, IFV*) on Bordeaux vineyards. In each vineyard, at least one non-treated row of vines stocks was monitored to detect GDM symptoms. The monitored rows were surrounded by two other non-treated rows, to ensure that the central rows were not unintentionally sprayed with fungicide. The mean number of stocks in the central rows was 53.1. In the monitored central rows, weekly visual inspections of vine stocks were conducted between week 12 (late March) and week 33 (end of August). The observations frequencies are shown in Figure 4.1. Vine stocks and bunches with GDM symptoms were recorded by visual inspection. Visual observations stopped when the proportion of infected vine stocks and bunches were close to 100%. Vine cultivar, local name of the vineyard, and geographic coordinates were recorded for each of the monitored plots.

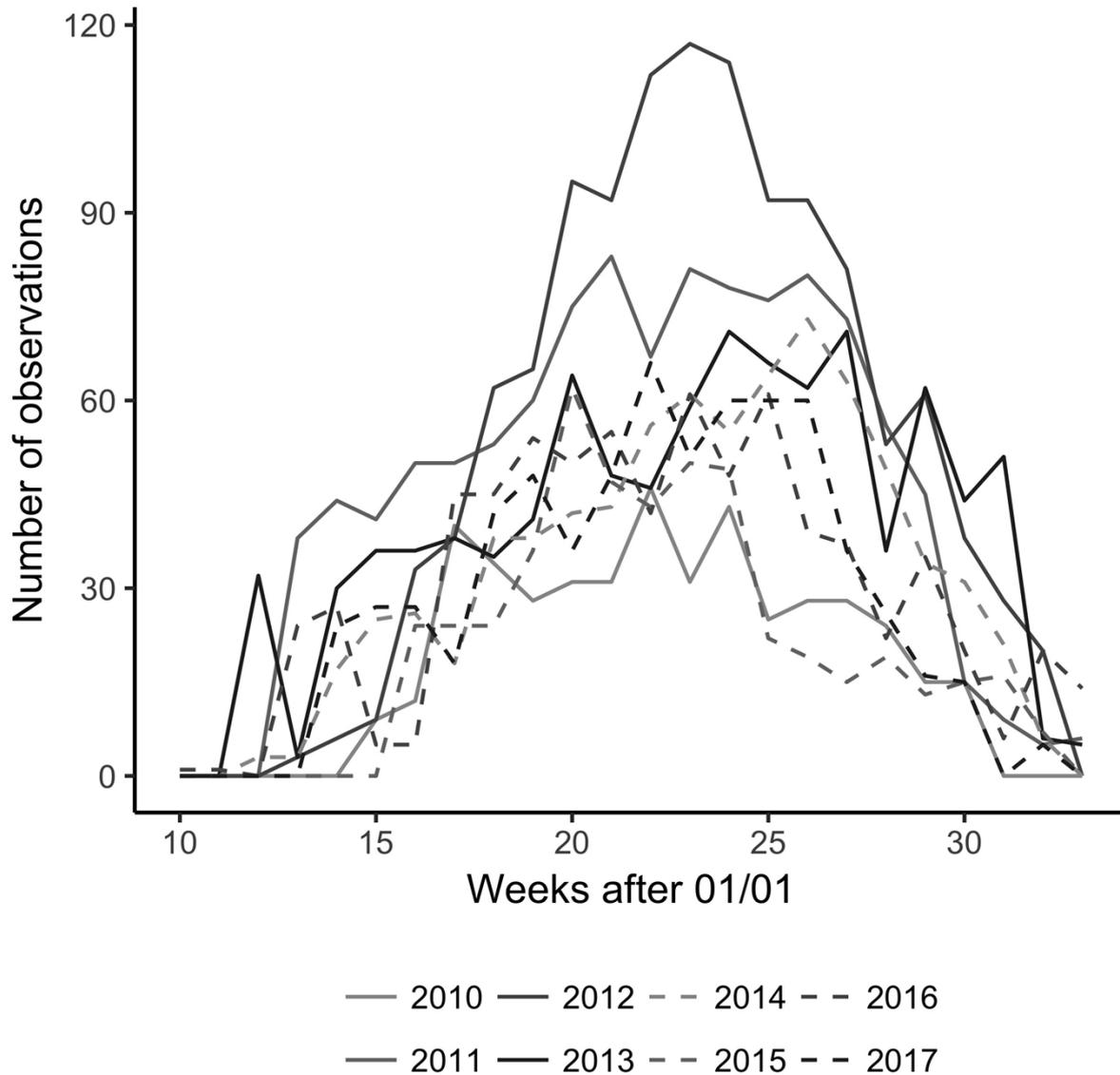


Figure 4.1: Number of observations collected per week and per year.

According to several previous studies (Caffi et al., 2009; Hill, 2000; Rossi et al., 2008b, 2008a; Rouzet and Jacquin, 2003; Tran Manh Sung et al., 1990), GDM is influenced by weather conditions. In order to study the effect of temperature and rainfall on the date of symptom appearance, daily average amount of rainfall (mm) and daily average temperature greater than 10°C (temperature -10, in Celsius degrees) were computed for each site-year over two periods, i.e., fall (September to November in year of harvest -1) and spring (March to June), from the SAFRAN database (Le Moigne, 2002) produced by Météo-France (*Centre National de Recherches Météorologiques*, CNRM). The eight years included in our study show contrasted weather characteristics. For example, the year 2011 was characterized by a warm (5.86°C above 10°C in average) and dry (1.51mm/day) spring, whereas spring was cold (3.91°C above 10°C in average) and wet (5.45 mm/day) in 2013.

For each plot, survival time was calculated as the number of weeks between the first week of the year and the week in which a certain epidemic threshold was attained. Note that the time origin (here, the first week of the year) has no influence on the results of our analysis. Two types of threshold were considered successively, giving two survival times for each site-year: 1% vines displaying symptoms, and 1% of bunches displaying symptoms. The survival times corresponding to these thresholds have different practical values. The date at which 1% vines display symptoms corresponds to the time at which GDM symptoms first appeared on vines for each plot. In practice, regional farm advisors use this date to predict subsequent GDM dynamic, as an early disease onset generally leads to more severe disease incidence (Kennelly et al., 2007) and severity (Dubos, 2002). In the Bordeaux region, the date at which 1% of bunches display symptoms in a plot is the latest date recommended for the first fungicide application, to prevent the irreversible losses that may occur if climatic conditions are favorable for pathogen development. Dates of bunch infection can also serve as indicator of subsequent damages. Later infections are usually less damaging because berries acquire an ontogenic resistance after the veraison stage (Kennelly et al., 2005). In total, survival times were analyzed for 266 monitored plots from week 12 to week 33.

Survival times were included in a time-to-event dataset. Each survival time was defined as a time interval characterized by a start date and an end date. This time interval was expressed in the form  $(-\infty, t]$  for left-censored data,  $[t, +\infty)$  for right-censored data,  $[t, t)$  for exact survival time, and  $(t1, t2]$  for interval-censored data. Interval-censored data occurs when the date of symptom appearance is observed two weeks or more after the last observation of absence of symptom. In right-censored time intervals, the infinity symbol was used to indicate that the threshold considered might have been reached after the last observation date. Left-censored data corresponded to site-years for which the threshold had already been reached before the start of the survey. For interval-censored data, the start and end dates of the interval correspond to the last observation at which the threshold was not reached and the first observation date at which incidence exceeded the threshold, respectively. The intervals of interval-censored data were assumed to be open on the left-hand side, and closed on the right.

For vines, the proportions of censored vs. uncensored data were 40.6% of right-censored data, 16.9% of left-censored data, 35.0% of uncensored data and 7.5% of interval-censored data. For bunches, we got 57.5% of right-censored data, 7.5% of left-censored data, 30.5% of uncensored data and 4.5% of interval-censored data.

#### **4.3.2. Statistical analyses**

Survival analysis is a collection of statistical methods for censored time-to-event data (Lee and Wenyu Wang 2003). One of the main purposes of survival analysis is to estimate survival functions and their dependence on explanatory variables. A survival function is defined as

$$S(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

where, in this case,  $T$  denotes a random variable representing the time to GDM symptom appearance on 1% of vines or bunches,  $P(T > t)$  is the probability that this time exceeds  $t$  in a plot, and  $F(t)$  is the probability distribution function of  $T$ . Survival analysis is also used to calculate a hazard function  $h(t)$  specifying the instantaneous rate of failure at time  $t$  (here, the

rate of symptom appearance at time  $t$ ) given that the individual (here, the vineyard plot) has survived to time  $t$ . This hazard function is defined as follows:

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (2)$$

where  $f(t)$  is the probability density function. Here, the survivor function  $S(t)$  is estimated separately for vines and bunches. We used and compared three inference methods: non-parametric, semi-parametric, and parametric. All the estimated survivor functions were used to identify the 10<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> (median), and 90<sup>th</sup> percentiles of time to symptom appearance.

The non-parametric approach is distribution-free, but is less efficient than the parametric approach when survival times follow a theoretical distribution. Here, we used the non-parametric maximum likelihood estimator (NPMLE), also known as Turnbull's estimator, for the non-parametric approach. This method is a generalization of the Kaplan-Meier method that allows for interval censoring (Anderson-Bergman, 2017a). We first applied this method to the whole dataset to obtain a global survival function for all years, and then we estimated yearly survival functions for vines and bunches, separately. Calculations were performed with the `ic_np` function of the 2.0.4 version of the package `icenReg` (Anderson-Bergman, 2017b) of R (R Core Team 2017, version 3.3).

The semi-parametric approach involved the fitting of a Cox proportional hazards model to the dataset. This model assumes that the hazard function is defined as follows:

$$h(t, X, \beta) = h_0(t) e^{X^T \beta} \quad (3)$$

where  $h_0(t)$  is a non-parametric baseline function,  $X$  is a set (vector) of covariates, and  $\beta$  is a set of parameters. We fitted the model (3) with year effects considered as covariates for vines and bunches, separately. We then introduced four climate input variables in model (3) to explain the between-year variability of dates of symptom appearance on vines and bunches; mean temperature above 10°C in fall (September to November in year of harvest -1), mean temperature above 10°C in spring (March to June), mean rainfall (in mm per day) in fall, and mean rainfall in spring. For bunches, we also then fitted a variant of model (3) in which the date of symptom appearance on the vine was included as a covariate (the covariate values were imputed from the vine survival model using the function `imputeCens` from `icenReg`). The model including year effects was used to assess whether survival functions differed significantly between years. Significant climatic variables ( $p < 0.05$ ) were used to quantify the effects of weather conditions on dates of symptom appearance. The model including the date of symptom appearance on the vine as covariate was used to determine whether the dates of GDM symptom appearance on bunches were related to the dates of GDM symptom appearance on vines. The significance of the effects of  $X$  was estimated by bootstrap resampling. Calculations were performed with the `ic_sp` function of the R package `icenReg`.

Finally, we fitted several parametric models based on exponential, Weibull, gamma, log-normal and log-logistic hazard functions. First, these models were fitted to the whole dataset without covariates, and the model with the lowest Akaike information criterion (AIC) was selected, for vines and bunches separately. Based on the AIC, the log-logistic distribution was

selected for both vines and bunches. The year effects ( $X$ ) were then incorporated into a parametric model defined as:

$$Y = \ln(T) = \beta_0 + X^T\beta + \sigma Z \quad (4)$$

where  $\beta_0$ ,  $\beta$ , and  $\sigma$  (scale) are parameters, and  $Z$  is a random variable defining the baseline hazard function. Several distributions were compared for  $Z$ , and the distribution resulting in the lowest AIC was selected (the log-normal model presented the lowest AIC for both vines and bunches). The four weather input variables mentioned above were introduced in model (4) to estimate the effect of weather conditions on dates of symptom appearance (the log-normal model presented the lowest AIC for vines and the log-logistic model presented the lowest AIC for bunches). Finally, for bunches, we fitted a variant of the parametric model (4) in which date of symptom appearance on the vine was included as a covariate. In this case, the log-normal model resulted in the lowest AIC. Calculations were performed with the `ic_par` function of the R package `icenReg`.

## 4.4. Results

### 4.4.1. Global survival analysis for the 2010-2017 period

In non-parametric survival analysis (NPLME model), GDM onset on vines did not become apparent until week 19 (early-mid May) (Figure 4.2.A). Thereafter, the proportion of plots with symptomless vines decreased steadily, to 90% in week 21 (mid-late May) and 50% in week 24 (mid-June). By week 32, at the end of follow-up period, the proportion of plots with symptomless vines had fallen to 29.3% (Figure 4.2.A).

According to the parametric model fitted (log-logistic) (Figure 4.2.A), the proportion of plots with no GDM on vines was close to 100% before week 15.1 (95%CI=[14.1, 16.2]) (mid-late April), but decreased to 90% in week 19.1 (95%CI=[18.2, 19.9]) (early-mid May), 50% in week 25.3 (95%CI=[24.5, 26.1]) (mid June), and 10% in week 33.6 (95%CI=[31.8, 35.5]) (mid-August).

According to the non-parametric model (NPLME model), GDM onset on bunches was not apparent before week 21 (late May). Bunches were symptomless in 90% of plots in week 23 (early June) and 50% of plots in week 27 (early July) (Figure 4.2.B). This proportion had fallen to 42.1% by week 29, (mid July) and did not decrease further. According to the log-logistic model estimates, the proportion of plots with symptomless bunches was close to 100% before week 17.9 (95%CI=[16.7, 19.1]) (late April, early May), and reached 90% in week 22.6 (95%CI=[21.8, 23.3]) (late May, early June), 50% in week 27.8 (95%CI=[27.2, 28.6]) (early-mid July), and 10% in week 34.4 (95%CI=[32.8, 36.3]) (mid-late August) (Figure 4.2.B).

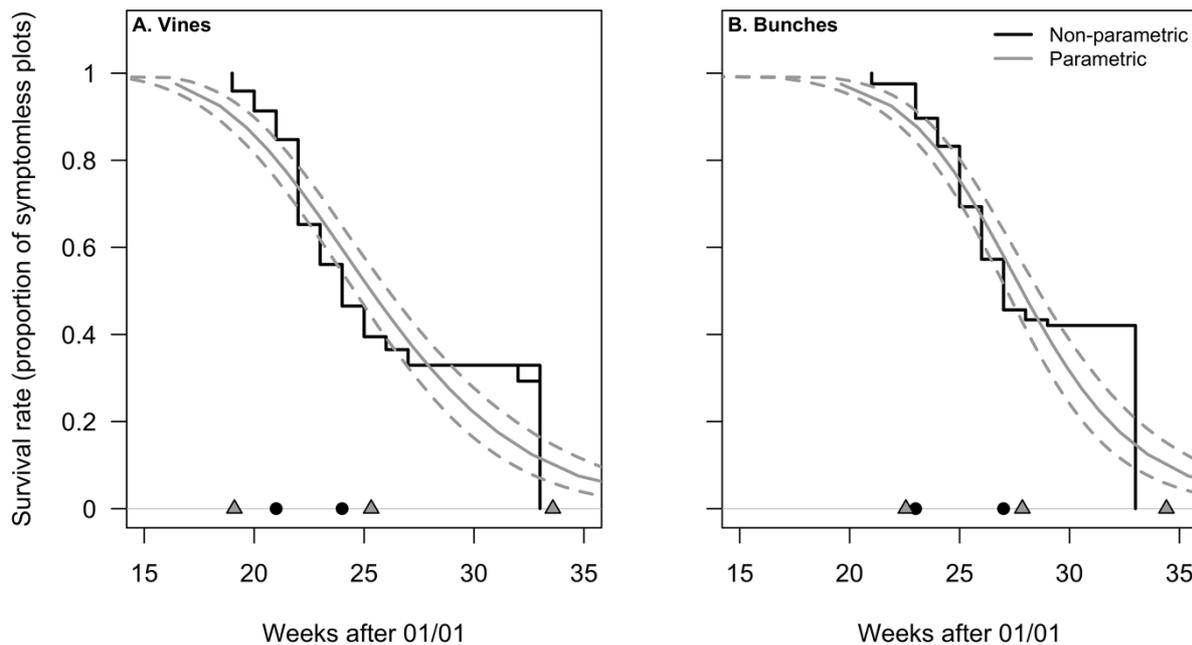


Figure 4.2: Proportions of plots with symptomless vines (A) and bunches (B) estimated by non-parametric and parametric (log-normal model) survival analysis methods, over the period 2010-2017. Black and gray circles at the base of the graph indicate the estimated dates at which the proportion of symptomless plots decreased to 90%, 50%, and 10%, for the NPLME and loglogistic models, respectively. With non-parametric methods (i.e., NPLME method), the 10% level was never reached. Dashed lines indicate 95% confidence intervals.

Thus, the proportion of symptomless plots estimated by both log-logistic and NPLME survival curves was close to 100% in mid May, except for log-logistic model for vines, where it was close to 100% until late April-early May. Survival curve subsequently decreasing rapidly to 50% in mid June for vines and early to early-mid July for bunches. However, there were marked differences between survival curves estimated with the two methods. The proportion of plots with no symptoms on vines and on bunches decreased more rapidly between weeks 20 and 22 for vines and between weeks 21 and 25 for bunches for the log-logistic than for the NPLME model. In addition, during the period in which survival decreased rapidly (from week 22-25 to week 27), the proportion of plots without symptoms estimated with the log-logistic model was higher than that estimated with the NPLME model, especially for vine. During this period, the maximum difference between the two methods reached 15%. Finally, the log-logistic curves tended to zero, whereas the NPLME curves reached a plateau after week 29, at 29.3% for plots with no symptoms on vines, and 42.1% for plots with no symptoms on bunches (Figure 4.2).

#### 4.4.2. Variability of the proportion of symptomless plots between years

The observed dates on which symptoms were first observed varied both within and between years (Figure 4.3, Figure 4.4). For example, in 2015, 10% of the plots reached a threshold of 1% of vines with GDM were recorded at week 19 (i.e., early May). 50% of the surveyed plots still had no symptoms at week 21 (i.e., late May). At week 27 (i.e. early July), 90% of the plots showed symptoms on vines. In 2011, the first plot reaching a threshold of 1% of vines with GDM symptoms was recorded at week 19 (i.e., mid-May). At week 21 (i.e. late-May),

*Distribution des dates d'apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne dans le Bordelais*

the threshold of 1% infected vines was reached in 10% of the plots in 2011, i.e., two weeks later than in 2015. GDM symptoms were recorded on 50 % of the plots at week 33 (i.e., mid-August) in 2011. The observed dates of disease onset were also highly variable for bunches of grapes (Figure 4.3).

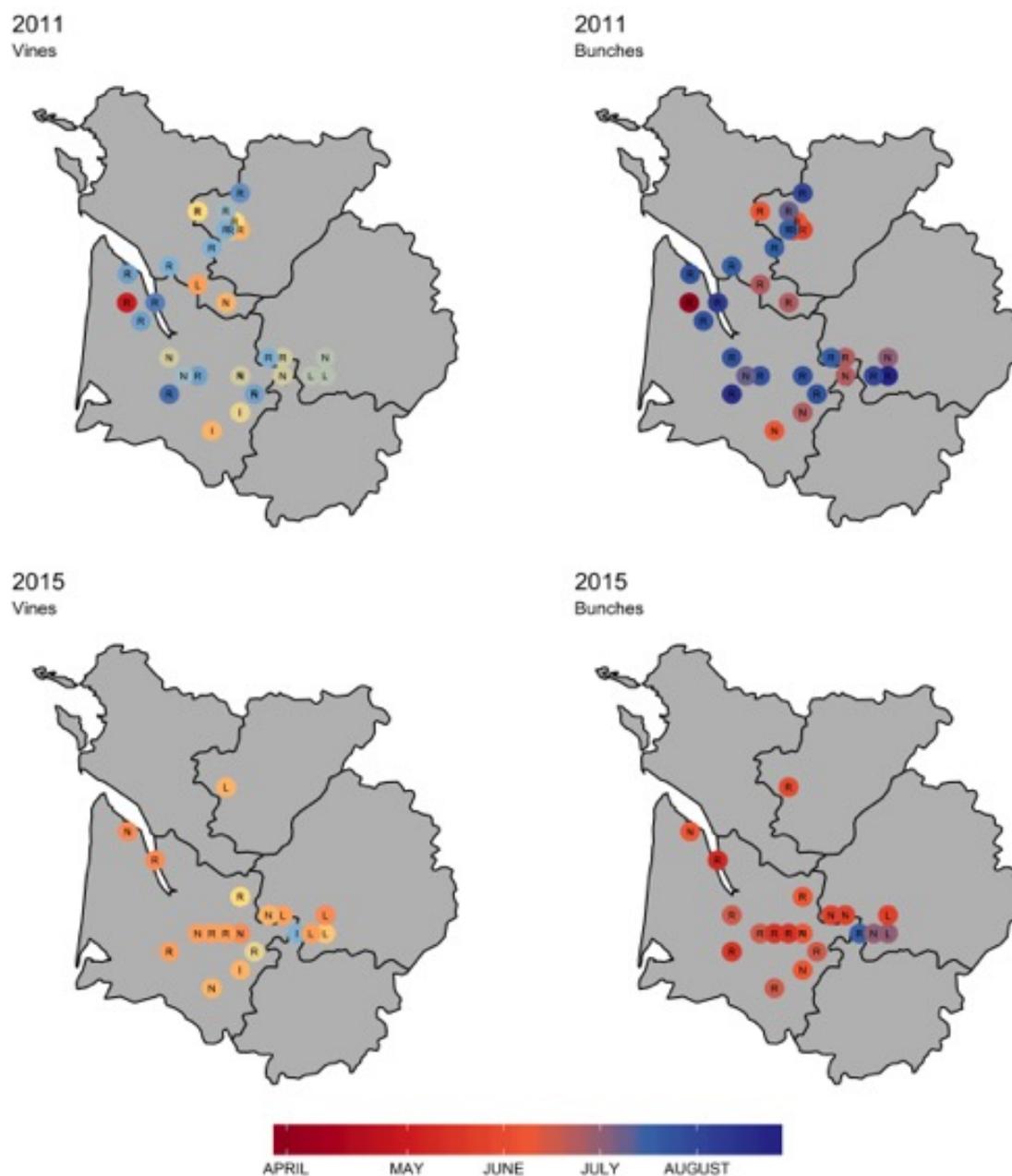


Figure 4.3: Examples of observed dates of GDM onset for two different years (2011 and 2015). Each point corresponds to a single untreated site in a Bordeaux vineyard. Recorded dates of symptom onset are represented by a palette of colors. Letters indicate censoring status as follows; N for non-censored data, R for right-censored data (the last recorded date is presented), L for left-censored data (the first recorded date is presented), I for interval-censored data (the first recorded date with an incidence of at least 1% of vines or bunches with symptoms is presented).

According to the semi-parametric estimations (Cox model), 2010 and 2011 were the first and second year with the latest dates of GDM onset on vines, and 2015 was the year showing the earliest symptom appearance dates (Table 4.1). In 2011, the estimated proportion of plots with symptomless vines was 100% until week 19 (early May), whereas the proportion of symptomless plots had already started to decrease two weeks earlier in 2015. On vines, the proportion of symptomless plots reached 50% in week 21 (late-May) in 2015, when in week 21 of 2011, 90% of the surveyed plots still had no symptoms. The 50% level was reached three weeks later in 2011, according to the Cox survival curve (Figure 4.4.C). Parametric estimates (log-normal model) (Table 4.2, Figure 4.4.E) confirmed that symptoms appeared on vines earlier in 2015 than in 2011. After week 25, the differences observed for log-normal estimates between 2011 and 2015 were smaller than the differences observed for Cox estimates.

According to the Cox model, the years with the latest and earliest dates of GDM onset on bunches were 2011 and 2015, respectively (Table 4.1). According to this model, 90% of plots had no symptoms on bunches in week 23 (early-June) and 50% had no symptoms in week 24 (early-mid June) in 2015 (Figure 4.4.D). The corresponding date for the 90% level in 2011 was weeks 25 (late June), and the 50% level was never reached in 2011, even in August. The results obtained with the NPLME and log-normal models (Figure 4.4.B and F) confirmed that the proportion of symptomless plots in summer was higher in 2011 than in 2015. As for disease on vines, the differences between years were smaller with the log-normal model than with the Cox model, after week 25. For example, at week 27 in 2011, the proportion of symptomless plots was 34.4% with the log-normal model but 55.7% with the NPLME method (Figure 4.4.B and F).

The contrasts between the different years surveyed are reflected in the estimated parameter values of the fitted Cox and log-normal models (Table 4.1 and Table 4.2). These parameter values reveal the differences in rates of GDM symptom appearance between years, relative to 2010. The Cox model suggested that the rate of GDM symptom appearance on vines was higher in 2012 ( $p = 0.050$ ), 2013 ( $p = 0.029$ ), 2014 ( $p < 0.001$ ), 2015 ( $p = 0.011$ ) and 2017 ( $p < 0.001$ ) than in 2010 (Table 4.1), and that the rate of GDM symptom appearance on bunches was higher in 2015 ( $p = 0.025$ ) than in 2010. No statistically significant difference was found for the other years.

The values estimated with the log-normal model confirmed that the rate of GDM symptom appearance on vines was higher in 2012 ( $p = 0.026$ ), 2013 ( $p = 0.016$ ), 2014 ( $p < 0.001$ ), 2015 ( $p < 0.001$ ) and 2017 ( $p = 0.002$ ). The rate of GDM symptom appearance on bunches was higher in 2014 ( $p = 0.020$ ) and in 2015 ( $p = 0.004$ ) than in 2010 (Table 4.2).

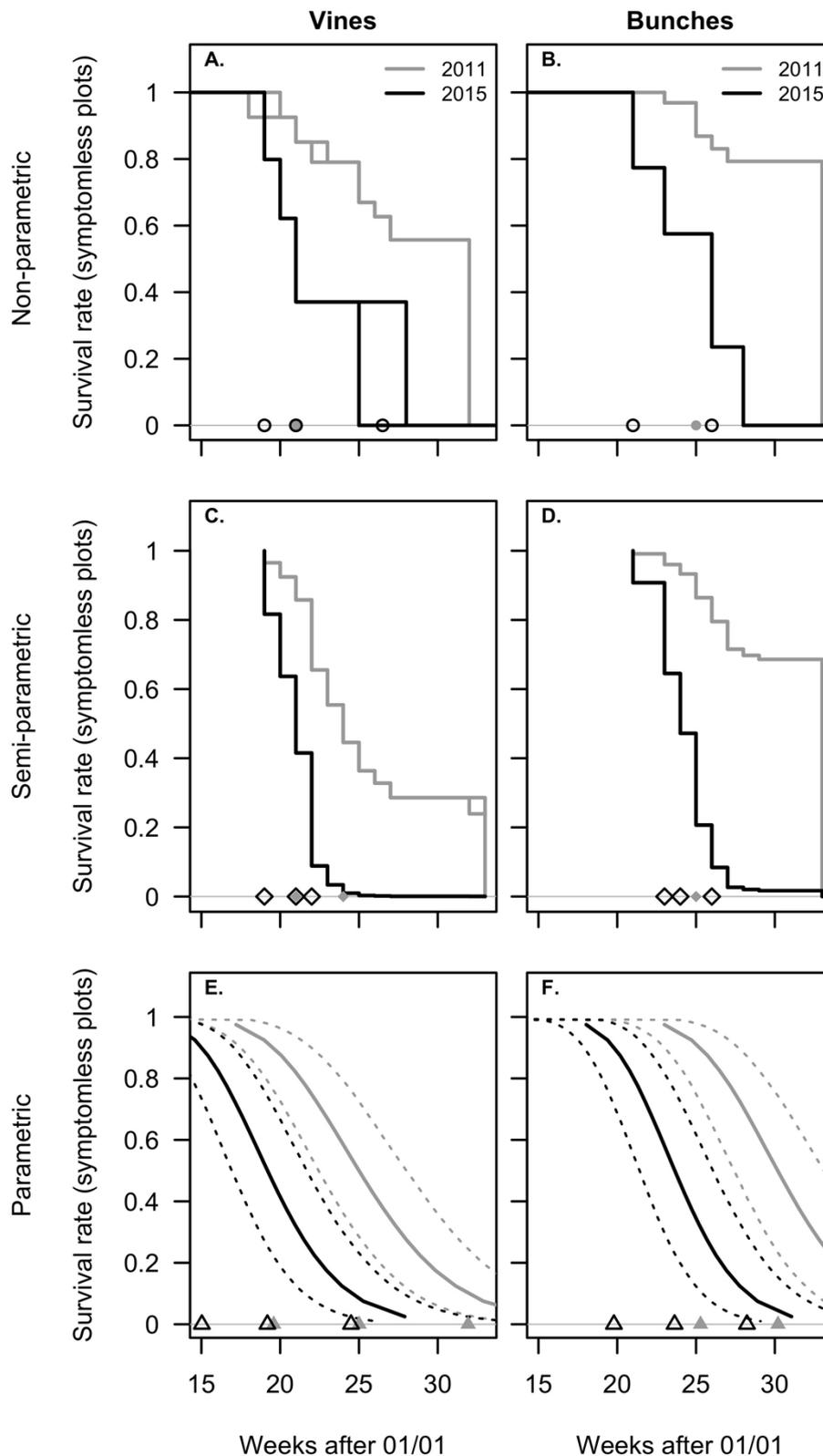


Figure 4.4: Proportions of plots with symptomless vines and bunches estimated by non-parametric (A, B), semi-parametric (Cox model, C, D), and parametric (log-normal model, E, F) survival analyses for 2011 (gray) and 2015 (black). Gray dots indicate the estimated dates by which the proportion of symptomless plots would decrease to 90%, 50%, and 10% in 2011, by method. Black dots indicate the estimated dates by which the proportion of symptomless plots would decrease to 90%, 50%, and 10% in 2015, by method. Dotted lines correspond to the 95% confidence interval estimated by log-normal model for each year.

*Table 4.1: Estimated parameters, exponential values for estimates, standard errors, and p values for each of the years surveyed (2010 to 2017) for the Cox model. Each estimate corresponds to difference in the rate of GDM appearance on vines or bunches of grapes between years, relative to 2010.*

|      | Vines    |          |       |                  | Bunches  |          |       |              |
|------|----------|----------|-------|------------------|----------|----------|-------|--------------|
|      | Estimate | Exp(Est) | SE    | p                | Estimate | Exp(Est) | SE    | p            |
| 2010 |          |          |       |                  |          |          |       |              |
| 2011 | 0.048    | 1.049    | 0.383 | 0.901            | -1.010   | 0.364    | 0.574 | 0.078        |
| 2012 | 0.763    | 2.144    | 0.389 | <b>0.050</b>     | 0.508    | 1.662    | 0.434 | 0.242        |
| 2013 | 0.850    | 2.340    | 0.391 | <b>0.029</b>     | 0.692    | 1.998    | 0.403 | 0.086        |
| 2014 | 1.685    | 5.395    | 0.448 | <b>&lt;0.001</b> | 0.757    | 2.132    | 0.482 | 0.116        |
| 2015 | 1.795    | 6.019    | 0.703 | <b>0.011</b>     | 1.370    | 3.935    | 0.609 | <b>0.025</b> |
| 2016 | 0.348    | 1.416    | 0.394 | 0.378            | -0.320   | 0.726    | 0.484 | 0.508        |
| 2017 | 1.279    | 3.591    | 0.326 | <b>&lt;0.001</b> | 0.382    | 1.465    | 0.375 | 0.309        |

*Table 4.2: Estimated parameters, exponential values for estimates, standard errors, and p values for each of the years surveyed (2010 to 2017) for parametric models (log-normal models). Each estimate corresponds to the difference in the rate of GDM appearance on vines or bunches between years relative to 2010.*

|       | Vines    |          |       |                  | Bunches  |          |       |              |
|-------|----------|----------|-------|------------------|----------|----------|-------|--------------|
|       | Estimate | Exp(Est) | SE    | p                | Estimate | Exp(Est) | SE    | p            |
| 2010  | 3.228    | 25.230   | 0.014 | 0                | 3.329    | 27.900   | 0.012 | 0            |
| 2011  | -0.010   | 0.990    | 0.063 | 0.870            | 0.092    | 1.096    | 0.052 | 0.078        |
| 2012  | -0.127   | 0.881    | 0.057 | <b>0.026</b>     | -0.059   | 0.942    | 0.044 | 0.180        |
| 2013  | -0.147   | 0.864    | 0.061 | <b>0.016</b>     | -0.081   | 0.922    | 0.047 | 0.086        |
| 2014  | -0.277   | 0.758    | 0.066 | <b>&lt;0.001</b> | -0.116   | 0.890    | 0.050 | <b>0.020</b> |
| 2015  | -0.275   | 0.759    | 0.066 | <b>&lt;0.001</b> | -0.154   | 0.858    | 0.053 | <b>0.004</b> |
| 2016  | -0.037   | 0.964    | 0.062 | 0.547            | 0.051    | 1.052    | 0.049 | 0.303        |
| 2017  | -0.203   | 0.816    | 0.066 | <b>0.002</b>     | -0.053   | 0.949    | 0.051 | 0.306        |
| Scale | -1.658   | 0.191    | 0.073 | 0                | -1.976   | 0.139    | 0.078 | 0            |

Weather conditions (temperature and rainfall) in fall and temperature in spring had no significant effect on symptom appearance on vines ( $p > 0.05$ ), but results obtained with the Cox and the log-normal models showed that rainfall between March and June had a significant effect on the date of first symptom appearance on vines ( $p < 0.01$ ). High amounts of rainfall in spring led to early dates of symptom appearance on vines. A significant effect of rainfall in spring was also found for bunch with both types of model ( $p < 0.001$ ).

The effect of rainfall in spring is illustrated on Figure 4.5 for two contrasted years with a dry (1.51mm/day in 2011) and a wet (5.45mm/day in 2013) spring, respectively. According to the semi-parametric (Cox) and parametric models, symptoms appeared later in wet conditions. According to the parametric log-normal model, the proportion of plots with symptomless vines reached 50% at week 24 (95%CI=[23.3, 25.1]) in 2013 (mid-June), but this level was only reached at week 27 (95%CI=[25.5, 29.4]) in 2011 (early July), i.e. about three weeks later. According to the parametric log-logistic model, the proportion of plots with symptomless bunches reached 50% at week 27 (95%CI= [26.4, 28.0]) in 2013 (early July), and this level was reached at week 31 (95%CI= [29.1, 33.1]) in 2011 (early August), i.e., about four weeks later. Large differences between 2011 and 2013 were also obtained with the Cox model (Figure 4.5).

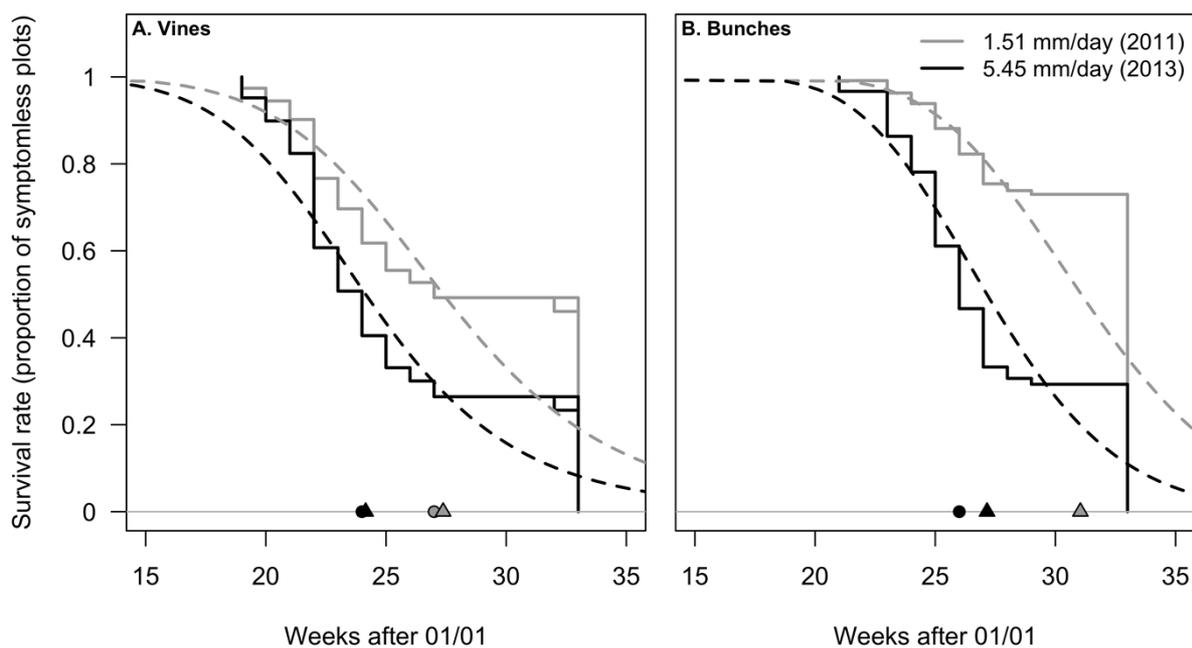


Figure 4.5: Proportion of plots with symptomless vines (A) and bunches (B) estimated by semi-parametric (Cox model) and parametric (log-normal or log-logistic model) survival analyses in function of the average spring rainfall measured in 2011 (1.51 mm/day, grey lines) and 2013 (5.45 mm/day, black lines). Plain lines represent estimation for Cox models. Dotted lines represent the estimation of log-normal model for vines and log-logistic for bunches, respectively. Dots indicate the dates where the proportion of plots with symptomless vines or bunches reached 50% for each model. Grey dots represent the estimations for 2011 and black dots represent the estimations for 2013. Circle dots represent the estimations of Cox models and triangle dots represent the estimations of log-normal model for vines and log-logistic for bunches, respectively.

Figure 4.6 compares the annual estimates of the proportion of symptomless plots obtained with the log-normal, Cox, and NPLME models. Comparisons were performed at three

different dates: weeks 22, 26, and 31 (early June, early July, early August). Relative to the Cox model, the log-normal model tended to estimate higher proportions of symptomless vines and bunches at week 26, and lower proportions at week 31 (Figure 4.6.C et E). For bunches, higher proportions of symptomless plots were obtained with the log-normal model than with the Cox model at week 22, but lower proportions of symptomless plots were obtained with the log-normal model for vines (Figure 4.6.A). The correlations between NPLME and log-normal estimates were weaker (Figure 4.6.B, D et E). The proportions of symptomless plots estimated with the log-normal method were frequently lower than those estimated with the NPLME method, especially at weeks 22 and 31 (Figure 4.6.B et D).

*Distribution des dates d'apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne dans le Bordelais*

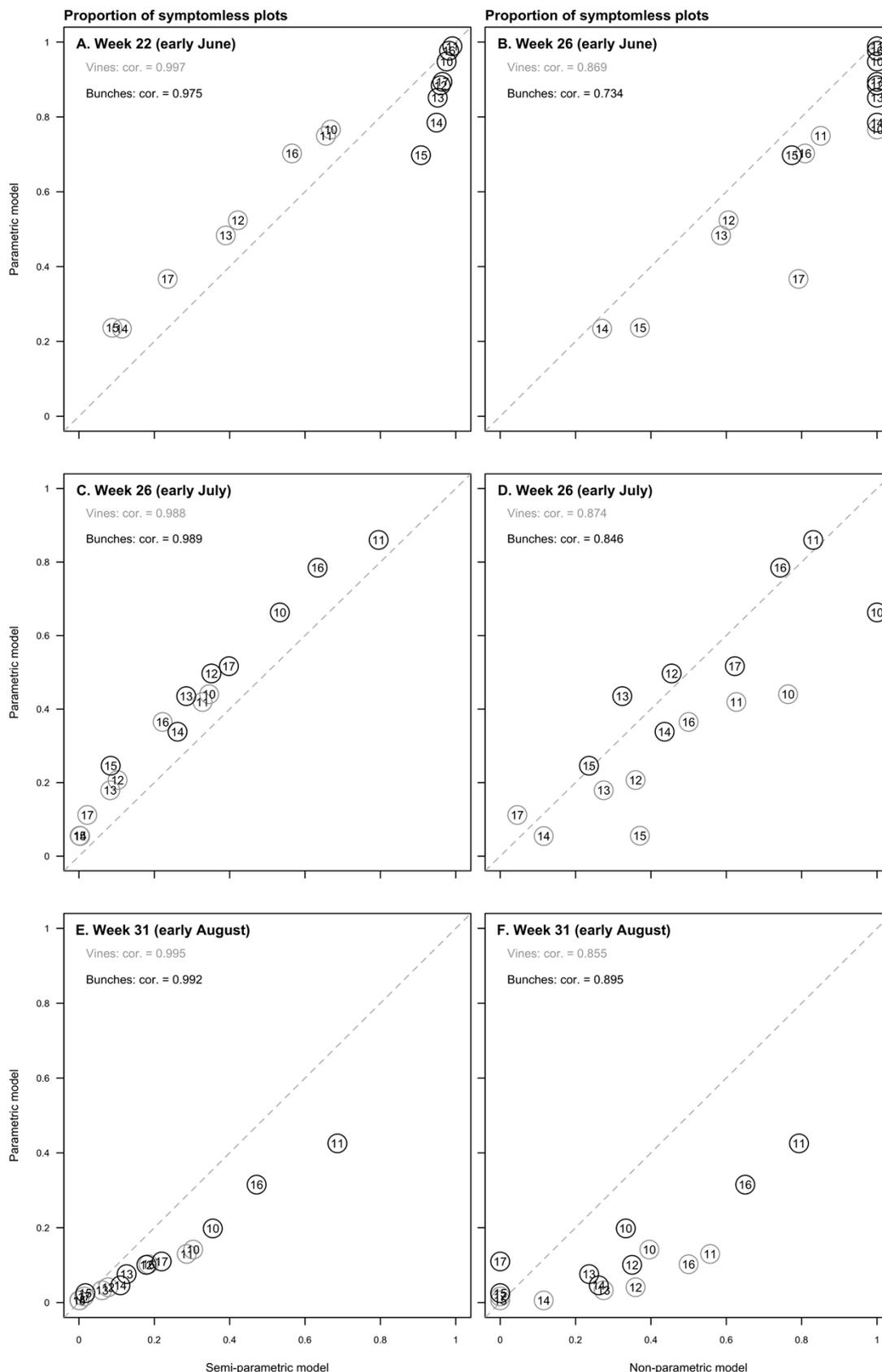


Figure 4.6 : Proportions of symptomless plots estimated each year with the parametric (log-normal model) and semi-parametric (Cox model, A, C, E) or non-parametric (NPLME model, B, D, F) models, on three different dates (weeks 22, 26, 31, i.e. early June, early July, early August). Gray and black circles correspond to vines and bunches, respectively. The numbers in the circles indicate the years

#### 4.4.3. Relationship between the date of GDM appearance on vines and the proportion of plots with symptomless bunches

We found a significant relationship between the date of GDM appearance on vines and the proportion of plots with symptomless bunches ( $p < 0.0001$  for the Cox and log-normal models). The early occurrence of GDM on vines resulted in a low proportion of plots with symptomless bunches, whereas a late occurrence of GDM on vines was associated with a high proportion of plots with symptomless bunches (Figure 4.7). With both the Cox and log-normal models, the proportion of plots with symptomless bunches was higher if the first GDM symptoms were observed on vines at week 22 than if such symptoms were not observed until week 25 (Figure 4.7). For example, with the log-normal model, the proportion of plots with symptomless bunches reached 10% at week 23 (95%CI=[22.6, 23.5]) (early June) when the first GDM symptoms occurred on vines at week 22 (late May, early June). By contrast, this proportion was not reached until week 25.1 (95%CI=[24.6, 25.5]) (mid-June) if the first GDM symptoms were observed on vines at week 25 (mid June) (Figure 4.7).

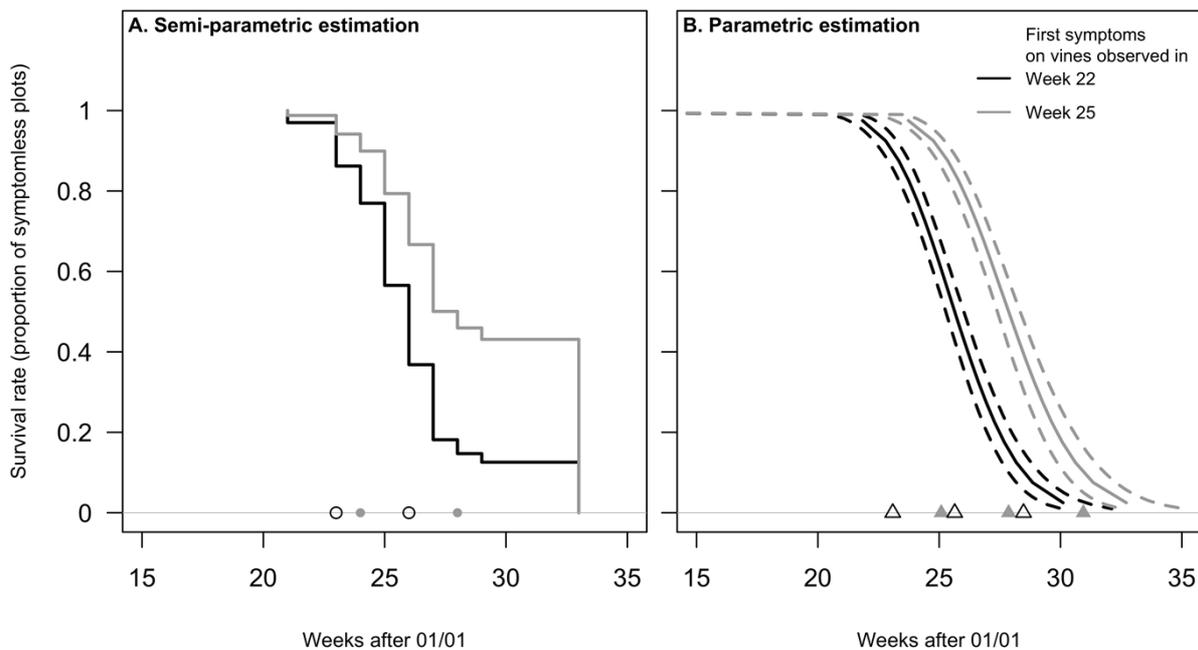


Figure 4.7: Estimated proportions of plots with symptomless bunches for two different dates for the first observation of GDM symptoms on vines (week 22 and week 25). The dotted lines correspond to the 95% confidence intervals. Empty black and filled gray circles at the base of the graph indicate the estimated dates at which the proportion of symptomless decreases to 90%, 50%, and 10%, for the Cox and the log-normal models, respectively.

#### 4.5. Discussion

We were able to estimate the dynamics of the appearance of GDM symptoms on vines and bunches of grapes in Bordeaux vineyards. The onset of GDM was not apparent on vines and bunches before early to late-May. Thereafter, we found that the thresholds of 90% and 50% of plots with symptoms were attained at very different dates over the 2010-2017 period in this region, and were even sometime never reached, even in August. For example, in 2015, 50% of the plots showed symptoms on vines and bunches in mid May and in late June,

respectively, but this threshold was never reached for vines and for bunches in 2011. Thus, according to the NPLME estimates, the proportion of plots with symptomless vines in August exceeded 25% in 2013 and 2016 (27.5% and 43.7%). The proportion of plots with symptomless bunches in August exceeded 25% in 2011, 2013 and 2016 (79.3%, 23.6% and 65%). Parametric models tended to give lower estimated proportions of symptomless plots in summer than Cox models, but the proportion of symptomless plots estimated in early-July with parametric models nevertheless exceeded 30% for vines in 2010, 2011 and 2016 (44.0%, 41.9%, and 36.5%), and 45% for bunches in all years, excepted for 2013, 2014 and 2015 (43.5%, 33.8% and 24.6%).

Our dataset included a substantial proportion of censored data. These data were subjected to several classic procedures for survival analysis, and we assessed the robustness of our results to the chosen survival model. We found some discrepancies between the results obtained with different techniques, particularly for estimations of the proportions of symptomless plots in summer with the non-parametric and parametric methods. However, agreement was found between the tested methods for many aspects. For example, both the semi-parametric and parametric methods showed that the rates of GDM symptom occurrence were higher in 2012, 2013, 2014, 2015 and 2017 than in 2010 for vines in the Bordeaux vineyards. Both these methods also showed that the rate of GDM symptom appearance on bunches was higher in 2015 than in the other years. These results were consistent with the reports of the French Agricultural Warnings ® published from 2011 to 2017. In the Bordeaux region, these reports indicated that GDM incidence and severity were “low” in 2011 and 2017, “medium” in 2012, 2013, and 2014, “medium to low” in 2015, “high” in 2016, but damages and yield losses were “low”.

High variability of GDM incidence across years was reported by Kennelly et al (Kennelly et al., 2007) and Carisse (Carisse, 2016). According to previous experimental and modeling studies, the variability of GDM appearance rate and GDM incidence is at least partly due to climatic factors (Gessler et al., 2011). The occurrence of GDM is determined principally by rainfall and temperature, which affect the various steps in the lifecycle of the pathogen, such as oospore germination (Rossi and Caffi, 2007; Vercesi et al., 2010) and sporulation (Kennelly et al., 2007). In our study, we found a significant effect of rainfall in spring on the date of symptoms appearance on vines and on bunches. Dry (wet) spring led to late (early) date of symptoms appearance on vines and on bunches. These results are consistent with those from Rossi et al (2002, cited by Rossi et Caffi, 2007) who found that dry periods in spring delay first symptoms appearance date. This is at least partly due to the fact that litter and leaf moisture stimulates the development of oospores (Rossi et Caffi, 2007). Furthermore, the survival of zoospores is strictly dependent on the presence of a film of water (Gessler et al, 2011).

We did find a significant relationship between the proportion of plots with symptomless bunches and the date of appearance of GDM on vines. The proportion of plots with bunches displaying symptoms was higher if GDM symptoms appeared on vines early in the season. The variability of the timing of GDM symptom onset on bunches is, thus, partly explained by the variability in the timing of GDM symptom appearance on vines in the Bordeaux region. Our approach based on survival analysis could be applied to determine dates of symptom

appearance for other vine diseases like powdery mildew or black rot, and also for diseases of other crops. Censored data are quite common in regional disease survey datasets such as those described for wheat and rapeseed in Northern France (Sine et al., 2010), or for *Yellow sigatoka* on banana and *weevils* on sweet potato in tropical regions (Michel et al., 2017a). Our approach is generic and can be applied in many situations.

Our results have several practical implications for the Bordeaux region. The date of first application has a strong influence on the total number of fungicide treatments during the growing season because, after the first seasonal treatment, fungicides are applied at an interval of about two weeks, in average, in the Bordeaux region. Our results indicate that fungicide treatments against GDM should not be applied before early-mid May in Bordeaux vineyards. Fungicide applications before this date would not be effective and would unnecessarily increase the number of fungicide applications in the vineyards of the Bordeaux region, potentially increasing the environmental impact of vine production, and the risk of fungicide resistance (Chen et al., 2007).

Our results also showed that no GDM symptom was ever recorded in some vineyards certain years, indicating that systematic preventive fungicides treatments against the disease may not be justified in every vineyards in the Bordeaux region. Considering the large variability of the date of first symptom appearance (i.e., from early May to early July) both within and between years, we suggest delaying the application of the first fungicide treatment in case of low rainfall in spring. Our survival models could be used to estimate the date of symptom appearance in function of the amount of rainfall in spring. This strategy could reduce the number of pesticide treatments compared to systematic preventive treatments in the Bordeaux region. This is consistent with Mailly et al. (Mailly et al., 2017) who indicated that fungicide use could be reduced by postponing the date of first fungicide spray in the French vineyards. From an economic point of view, the systematic use of fungicide treatments remains the most effective solution to control GDM compared to biocontrol agent use (Dagostin et al., 2011) and resistant vines varieties (Pertot et al., 2017). However, regulations on pesticide use may become more restrictive in the future. For example, in France, the “Plan Ecophyto 2” was set up to reduce pesticide use by 50% before 2025 (Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt, 2018a), and its implementation may encourage farmers to reduce the number of pesticide treatments during the next decade.

The practicality of this control strategy could be assessed in close collaboration with vine growers. The approach presented here could benefit from various tools, such as alert bulletins based on yearly field surveys (Michel et al., 2016), climate and/or phenological indicators (Caffi et al., 2010; Kennelly et al., 2007), on-farm measurements collected by sensors on drones (Rieder et al., 2014) and by systems of in-vineyard inoculum detection (Thiessen et al., 2016). The latter could make first symptom detection easier in the near future. Several epidemiological models (Raynal et al., 2010; Rossi et al., 2008b; Tran Manh Sung et al., 1990) and warnings systems (Caffi et al., 2010; Laurent Delière et al., 2015; Madden et al., 2000; Raynal et al., 2012) were developed for simulating GDM epidemics dynamic or optimizing the timing of fungicide sprays. In the future, the output of some of these models could be used as inputs of survival models in order to predict dates of GDM symptom appearance in function of local characteristics.

### **Acknowledgments**

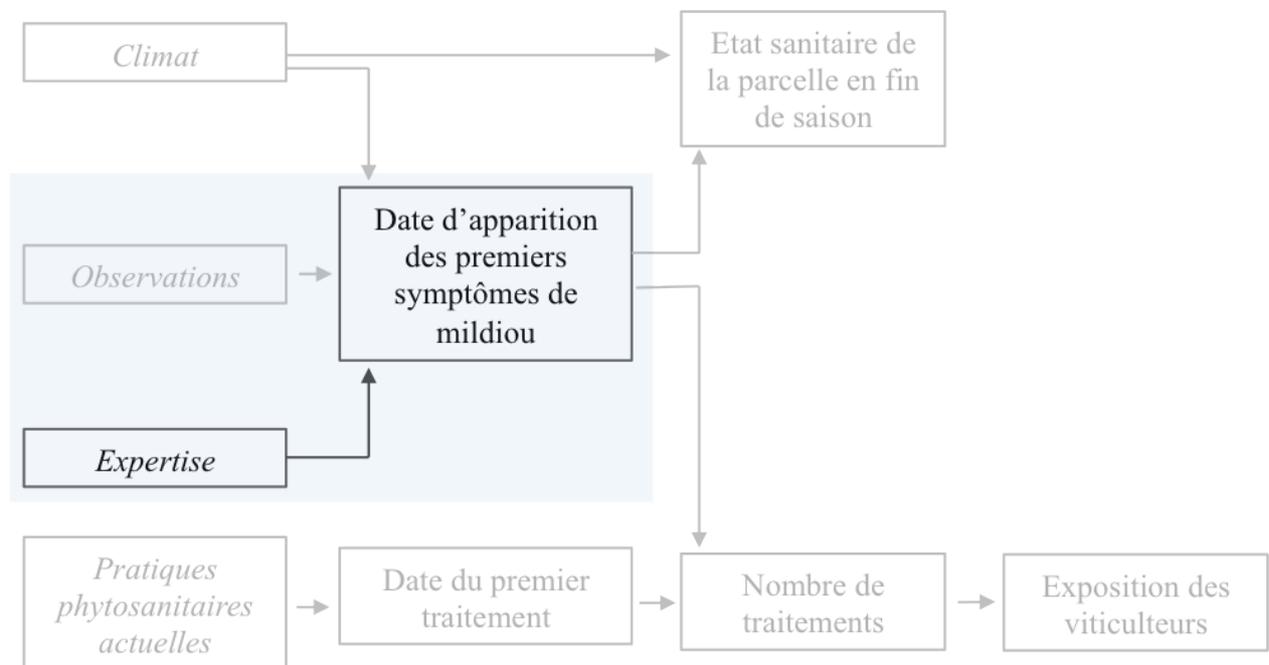
We would like to thank the French Wine and Vine Institute (*Institut Français de la vigne et du vin*) and its technical partners for collecting and providing us with access to their data and to the EPICure web platform (<https://www.vignevin-epicure.com>). We thank Marc Vergnes for data collection coordination, Christian Debord for database administration, and Amine Bennabi for his work on GDM indices. This work received funding from the French Ministry of Agriculture (CAS DAR, SMART-PIC project), the Institut Carnot Plant2Pro (project L-i-cite) and from the Bordeaux Vine Council (CIVB). This work is part of the #DigitAg project (ANR-16-CONV-0004).



## Chapitre 5. Estimation de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne grâce à l'élicitation probabiliste d'experts

Ce chapitre a été publié sous la forme d'un article scientifique dans la revue *Crop protection* 126 (2019) 104926 ; <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.10492>.

Il présente le développement d'une méthode d'estimation de la date d'apparition des premiers symptômes du mildiou de la vigne basée sur l'expertise. Les résultats de deux campagnes d'élicitation des connaissances expertes sont analysés dans ce chapitre et l'ensemble des résultats est présenté en Annexe R, en Annexe S et en Annexe T.



## **Résumé**

*Contexte* – L'élicitation probabiliste d'experts est une méthode qui consiste à représenter le jugement d'un expert sous la forme d'une distribution de probabilités. Cette méthode n'a à ce jour jamais été utilisée pour estimer les dates d'apparition des symptômes d'une maladie des plantes.

*Questions de recherche* – Les questions traitées dans ce chapitre sont :

- Peut-on estimer la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne dans une parcelle non traitée grâce à l'élicitation probabiliste d'experts ?
- Peut-on combiner le jugement de plusieurs experts élicités afin de décrire la dynamique d'apparition de la maladie à l'échelle d'un bassin de production ?

*Matériel et méthodes* – En 2017 et 2018, deux campagnes d'élicitation ont été conduites dans plusieurs régions viticoles. Les participants, qualifiés ci-après d'experts, ont estimé le risque d'apparition des premiers symptômes dans une parcelle non traitée sous la forme d'une distribution de probabilités. Les experts pouvaient actualiser leur estimation jusqu'à l'apparition des premiers symptômes dans leur parcelle de référence. Les dates médianes et les intervalles de confiance à 90 % des différents pronostics de chaque expert ont été comparés entre les différentes élicitations. Les pronostics des experts ont été utilisés individuellement pour fournir une prévision de la date d'apparition du mildiou dans une parcelle. Une prévision moyenne a été calculée à partir des estimations des experts d'une même région afin d'obtenir une prévision à l'échelle régionale. Les prévisions locales et régionales ont été successivement confrontées aux dates d'apparition observées par les experts dans leur parcelle. L'impact de la méthode de formalisation de l'expertise sur les estimations des participants a été estimé.

*Résultats* – Nos résultats montrent que le pronostic des experts évolue au cours de la saison. Les experts tendent à fortement anticiper la date d'apparition des premiers symptômes en début de saison, mais ce biais devient négligeable dès la fin-mai. A partir de cette période, la distribution des dates d'apparition estimées donne une image réaliste de la dynamique d'apparition du mildiou à l'échelle du bassin de production. De plus, nos résultats montrent qu'utiliser l'élicitation probabiliste d'experts pour estimer le risque d'apparition du mildiou limite le risque de surestimer ou sous-estimer les estimations d'un expert.

*Conclusion* – Nos résultats indiquent que la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou peut être estimée au moyen de l'élicitation probabiliste d'experts. Cette méthode fournit une distribution des dates probables d'apparition dont de nombreuses informations peuvent être dérivées. Elle fournit également une information sur les incertitudes associées à l'estimation de la date d'apparition du mildiou issue de l'expertise et présente le jugement d'experts sous une forme plus transparente qu'une estimation qualitative du risque.

**Mots clés** : Mildiou de la vigne, Expertise, Elicitation probabiliste, Incertitude.

## **Use of probabilistic expert elicitation for assessing risk of appearance of grape downy mildew**

**Authors:** M. Chen <sup>a</sup>, F. Brun <sup>b</sup>, M. Raynal <sup>c</sup>, C. Debord <sup>c</sup>, D. Makowski <sup>d,e</sup>

<sup>a</sup> ACTA, INRA, UMR Agronomie, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

<sup>b</sup> ACTA, INRA, UMR AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France

<sup>c</sup> IFV, Bordeaux Nouvelle Aquitaine. UMT SEVEN, 71 Avenue E Bourlaux 33882 Villenave d'Ornon Cedex

<sup>d</sup> INRA, UMR Agronomie, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

<sup>e</sup> CIRED, 45bis Avenue de la Belle Gabrielle, 94130 Nogent-sur-Marne, France

**Corresponding author:** M. Chen

**E-mail:** [mathilde.chen@acta.asso.fr](mailto:mathilde.chen@acta.asso.fr)

### **5.1. Abstract**

Grape downy mildew (GDM) is a major disease of grapevine and the date of appearance of its first symptoms is a determinant information for the protection of the vineyard. Probabilistic elicitation of experts has been used here to estimate this date. In 2017 and 2018, 29 experts were elicited to provide probability distributions of dates of GDM appearance between April and June, for different plots. The results of these elicitations show that the experts' forecasts and their uncertainty change over the season. The elicited dates tend to be earlier at the beginning of the season and later at the end of the season, by about 18 days in average. In April 2017 and 2018, most of the elicited dates are too early compared to observed dates of GDM symptom appearance. However, this bias becomes negligible in the month of May. Our results indicate that probabilistic elicitation is a useful tool for communicating expert judgments and uncertainties in a transparent manner in plant disease risk assessment and epidemiological alert bulletins.

**Keywords:** Downy mildew, Grapevine, Expert judgment, Probabilistic elicitation, Uncertainty.

## **5.2. Introduction**

Since its introduction in Europe, grape downy mildew (GDM) has been considered as a potentially high destructive disease, especially in South-West France vineyards (Dubos, 2002). GDM is caused by *Plasmopara viticola*, a polycyclic pathogen (Wong et al., 2001) that involves cycles of primary and secondary infections. Primary infections are caused by asexual spores (zoospores), which are produced from sexual spores called oospores. Oospores are produced in autumn, at the end of the growing season. They overwinter in leaf litter on the vineyard floor or buried in the ground; in spring, they germinate to form macrosporangia that release zoospores. Zoospores are disseminated by wind and rain splashes and infect green parts of grapes. After an incubation period of 4 to 19 days (Kennelly et al., 2007), sporangia are produced on the underside of leaf lesions caused from primary contamination. These sporangia, as they produce zoospores, are considered as secondary inoculum, responsible for secondary infections.

*P. viticola* development on inflorescences may cause the destruction of future berries leading to yield reduction. During the 20<sup>th</sup> century, significant damages were reported in French vineyards, when weather conditions were favorable to GDM development and efficient control measure not yet available (Gessler et al., 2011). For example, GDM caused the destruction of 70% of the grape and induced a loss of one third of the wine production in 1915 and 1930, respectively (Gessler et al., 2011). Furthermore, GDM leaf damages are responsible for a reduction in the sugar content of berries, which induces a decline in the grape quality (Jermini et al., 2010).

The systematic use of fungicide treatments remains the most effective solution to prevent the deleterious effect of GDM compared to biocontrol agent use (Dagostin et al., 2011) and resistant vines varieties (Pertot et al., 2017). One widely recommended strategy is to initiate fungicide treatment at the end of the incubation period of the first infections, which corresponds to the onset of the first symptoms. After the first fungicide application, most of the grape growers usually spray in average one treatment every two weeks, according to the French Ministry of Agriculture's Statistics and Prospective Service (SSP) survey (Service de la Statistique et de la Prospection, 2015a). Fungicide application relies on grape growers' perception of disease dynamic, and on several sources of information; epidemiological models, field observations, expert knowledge. The date of the last fungicide spray applied depends on the date of grape harvest, which depends on the wine-growing region and on the grape varieties (Mailly et al., 2017). This strategy relies on frequent applications of pesticides to keep a low level of damages, maintain a low inoculum level in the plot, and thus limit the spread of the disease.

The date of appearance of the initial symptoms is therefore determinant for the protection of the vineyard. This date partly determines the number of fungicide treatments that will be used during the season (Mailly et al., 2017), and therefore needs to be accurately estimated every year. Indeed, an early, inaccurate estimate of this date may lead to an unnecessary increase of the number of fungicide treatments. If the date of symptom appearance is estimated too late, the risk of GDM epidemic will be underestimated, and the protection of the vines will be insufficient. This can potentially lead to yield and quality losses.

Expertise is what allows an expert to interpret, analyze and/or synthesize his knowledge to make a judgment (European Food Safety Authority, 2014b). It is often used to aid analysis and decision-making in various fields (Barnett et al., 2010; Otway and Winterfeldt, 1992), especially in studies assessing plant health risks (Baker et al., 2014; Pheloung et al., 1999).

Expert-based risk assessment often rely on semi-quantitative or qualitative scoring systems. Several qualitative and semi-quantitative protocols have recently been developed to conduct risk assessment (D'hondt et al., 2015; European Food Safety Authority, 2014b; Kenis et al., 2012). In France, plant health bulletins (PHB) provide farmers with weekly up-to-date disease risk assessments (<https://agriculture.gouv.fr/bulletins-de-sante-du-vegetal>). PHB report qualitative risk scores ranging from "low" to "very high" chosen by regional experts based on available information (Chambre d'Agriculture de Gironde, 2018b). No information on uncertainty is reported in these bulletins to inform readers about the reliability of the expert judgments. Qualitative scores reported in PHB summarize several sources of information, including epidemiological model outputs and, also, field surveys and experimental data. Qualitative rating systems thus rely on different types of information related to plant health risk.

Qualitative rating systems have several disadvantages. They are often considered inaccurate (Cox et al., 2005; European Food Safety Authority, 2010; Makowski and Mittinty, 2010), and they do not provide quantitative information on the level of uncertainty associated with the experts' prognoses (Morgan, 2014). The use of qualitative scores makes the interpretation of the bulletin subjective (Wallsten et al., 1986).

Uncertainty analysis is an integral part of scientific assessment and uncertainty should be communicated in all risk assessments (Benford et al., 2018). Properly representing an expert's opinion about an uncertain quantity using probabilistic expert elicitation is strongly recommended by EFSA, in order to ensure transparency in risk assessment (European Food Safety Authority, 2014b). Probabilistic expert elicitation consists of extracting an expert's knowledge about the likely values of some unknown quantity of interest, and representing those beliefs with a probability distribution (Garthwaite et al., 2005; O'Hagan et al., 2006). This approach, generally used in case of unavailable or sparse data (Morris et al., 2014; O'Hagan, 2012), allows an expert's judgment to be quantified through a probability distribution. The probability distribution describes the expert's uncertainty about the estimated quantity. This approach has already been used in various fields, including health risk analysis (Evans et al., 1994) and environmental sciences (Millner et al., 2013; O'Hagan, 2012). To our knowledge, probabilistic elicitation has never been used to estimate the dates of occurrence of plant disease symptoms.

In this study, we show that probabilistic expert elicitation is a convenient and powerful tool to summarize expert knowledge in a quantitative way and in a transparent manner. We use probabilistic elicitation of regional experts' judgment to estimate probability distributions of dates of occurrence of the first symptoms of GDM on vines in the 2017 and 2018 seasons. We highlight a relationship between, on one hand, the result of a probabilistic elicitation and, on the other hand, the date on which the elicitation is conducted. We analyze the uncertainty of expert judgments and show that probabilistic elicitation is a useful tool for presenting it in a

transparent way. We confront the elicited dates with the dates of onset of symptoms observed in vines in several French regions. Finally, we compare our approach to two qualitative risk-rating systems.

### **5.3. Material and methods**

#### **5.3.1. Experts' elicitation**

Two elicitation campaigns for expert knowledge were conducted in 2017 and 2018 on two different experts panels. In 2017, ten participants were involved in the elicitation campaign. The participants, referred to thereafter as "experts", were advisors from the French wine extension services (*Institut Français de la Vigne et du Vin*), advisors from Agriculture Regional Chambers, Chateaux employees and grape growers. Due to their professional activity, these experts have a good knowledge of GDM epidemics in their geographical area of expertise (Cognac, Bordeaux, Gaillac and Beaune vineyards). A reference untreated plot was defined in advance by each participant in his/her expertise geographical area. During the elicitation, the experts reported the use of information related to past weather, climate forecasts, epidemiological model outputs, advices from colleagues, and field scouting.

In 2018, a panel of nineteen experts was established. This panel was constituted of wine advisors from wine extension services (*Institut Français de la Vigne et du Vin*, *Bureau National Interprofessionnel du Cognac*), advisors from Agriculture Regional Chambers, employees in vineyards and INRA researchers (one researcher, one research engineer and one PhD student). Eight of the 10 experts solicited during the first elicitation campaign were also elicited in 2018. A reference plot, untreated and located in each participant's area of expertise (Cognac, Bordeaux, Gaillac, Beaune, Haut Poitou or Pays-de-la-Loire vineyards), was defined in advance by each expert.

#### **5.3.2. Elicitation tool**

Expert elicitation was carried out using the online MATCH Tool<sup>®</sup> developed by Morris et al. (2014). At the beginning of each campaign, the experts were trained to use this tool, which is freely available (<http://optics.eee.nottingham.ac.uk/match/uncertainty.php#>). Among the different elicitation techniques proposed by MATCH Tool<sup>®</sup>, we chose the "roulette" method because this method was considered simple and easy to understand by the experts.

At a given date, the experts were asked to estimate the probability distribution of the dates on which the threshold of 1% of diseased vines would be reached for their respective plot. In practice, regional farm advisors use this date to predict subsequent GDM dynamic, as an early disease onset generally leads to more severe disease incidence (Kennelly et al., 2007) and severity (Dubos, 2002). In the Bordeaux region, the date at which 1% of vines display symptoms in a plot is a recommended date for the first fungicide application, to prevent the irreversible losses that may occur if climatic conditions are favorable for pathogen development. No restriction was placed on the information used by the experts.

Each expert formulates his/her prediction for a specific plot in the form of a histogram with MATCH Tool<sup>®</sup> (Figure 5.1.A and Figure 5.1.B). The x-axis of the histogram represents the time between the earliest and the latest possible dates of GDM first symptom onset, i.e. March

1<sup>st</sup> and July 31<sup>st</sup> in the considered wine-growing regions. The elicited experts found convenient to divide the x-axis into 15 intervals of 10-days. The first ([0-10]) and the last ([140-150]) intervals represented the first ten days of March and the last ten days of July, respectively. For each interval, the probability that the epidemiological threshold of 1% infected vines will be reached was estimated by each expert (y-axis) by allocating a greater or lesser number of chips. The maximum number of allocated chips was 10. The distribution of allocated chips provided by each expert was used to represent the plausible dates of GDM onset.

A probability distribution was then adjusted to the histogram (Figure 5.1.C). MATCH Tool<sup>®</sup> fits various parametric distributions (Gaussian, Student, Scaled Beta, gamma, log-normal, and log-Student) to the allocated chips using a least squares procedure and compares the quality of fit of the distributions (Morris et al., 2014). The distribution that best fits the histogram is automatically selected by the tool.

The 33<sup>rd</sup> and the 66<sup>th</sup> percentiles of the elicited dates of the disease onset were computed from the distribution selected by MATCH Tool<sup>®</sup>, and were then presented to the expert. By comparing these quantiles to her/his judgment, the expert was able to check whether her/his forecast corresponded to her/his judgment. If the results were not consistent with her/his impressions, the expert was allowed to adjust her/his histogram and to modify the proposed distribution.

After the appearance of first GDM symptoms on his/her plot, the expert was no longer elicited. The observed date of GDM onset (corresponding to 1% of diseased vines) was reported by each expert for her/his reference plots.

In 2017, each expert repeated this procedure approximately every two weeks, between March and June, to update her/his estimate of dates of disease onset. On average, 0.7 elicitations were conducted every two weeks by each expert, or 4.6 elicitations per expert over the March-June period, with a minimum of 3 and a maximum of 7 elicitations per expert, and a total number of elicitations equal to 46. In 2018, the elicitation procedure was repeated about every week between April and June. A total of 111 distributions were elicited during this period. On average, 5.8 elicitations were conducted per expert in 2018, with a minimum of 3 and a maximum of 10.

All the histograms were collected every two weeks in 2017 and every week in 2018 during the period of elicitation. They were analyzed with R (version 3.5.1; (R Core Team, 2018), using the *fitdist()* function of the SHELF package (Oakley, 2018). All results are provided in the supplementary table in Annexe G.

Estimation de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne grâce à l'élicitation probabiliste d'experts

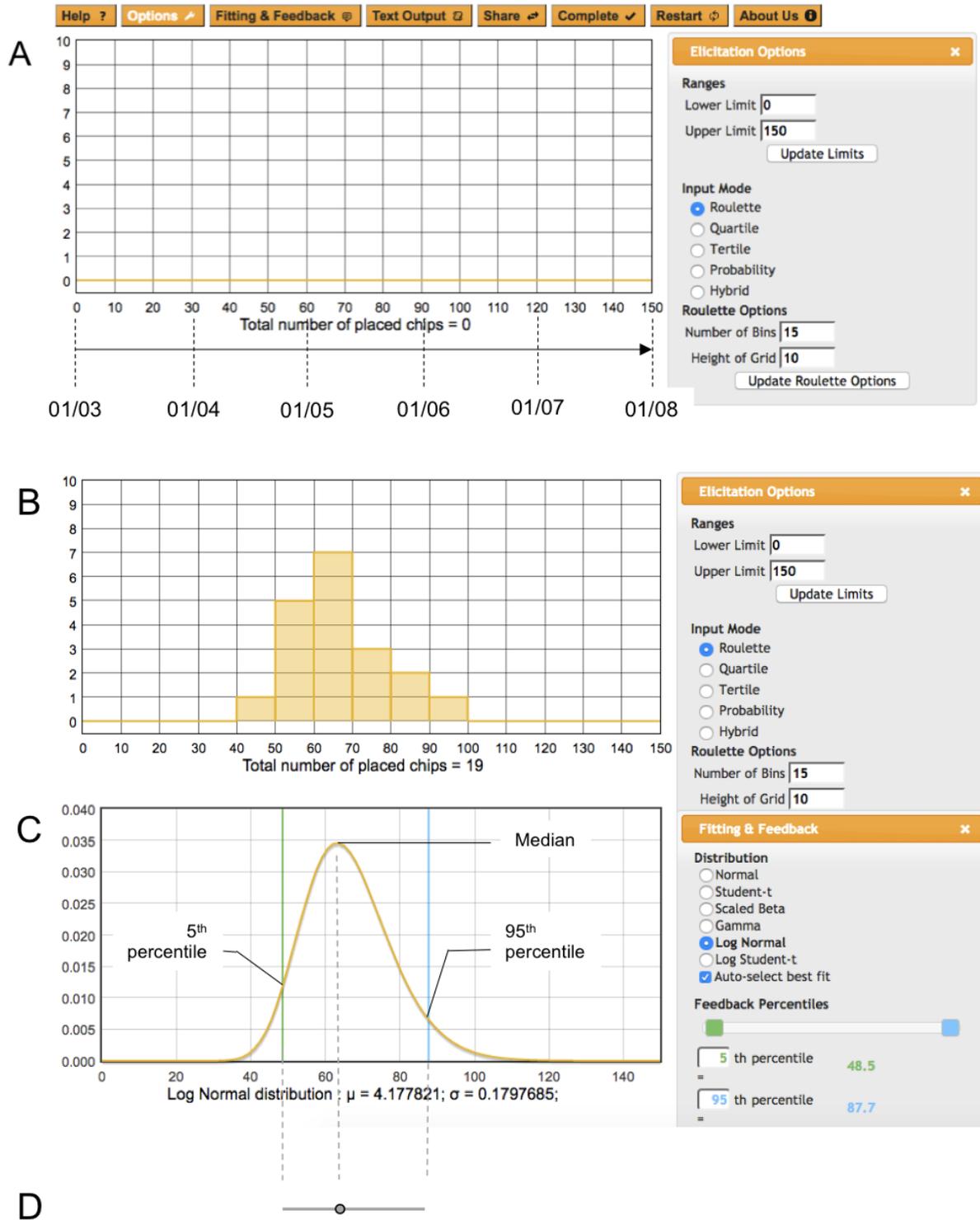


Figure 5.1: Expert elicitation using the “roulette” method implemented by MATCH Tool<sup>®</sup> (Morris et al., 2014). A: Empty histogram. Each column represents a 10-days interval between March 1st (0) and August 1st (150). B: Distribution of dates of appearance of downy mildew of the vine elicited by the expert. C: Density function adjusted to the elicited histogram in B. The vertical green and blue lines correspond to the 5<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile, respectively. D: Representation of the median (point) and of the 90% probability interval (bar).

### **5.3.3. Statistical analyses**

Each probability distribution was summarized by its median and by its 5<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentiles. The median date corresponds to the date for which there is a 50% chance that the 1% threshold will be reached, according to the elicited expert. The number of days between the 5<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile of the elicited distribution, i.e. the 90% credibility interval, reflects the level of uncertainty of the expert. The larger the interval; the more uncertain the estimate.

In order to analyze the evolution of the experts' judgment over time, the difference between the first and last elicited median dates of disease onset was computed. For each year, the statistical significance of the relationship between these differences and the median dates produced by the experts during their first elicitation was tested by fitting a linear regression expressed as:

$$y_i = \alpha + \beta * x_i + \varepsilon$$

where  $y_i$  is the difference (in days) between the first and last elicited median dates of expert  $i$ ,  $\alpha$  and  $\beta$  are two regression parameters,  $x_i$  is the first elicited median date of expert  $i$ , and  $\varepsilon$  the residual error. Similarly, the statistical significance of the relationship between the uncertainty levels of expert's first and last forecasts was tested by fitting the following linear regression:

$$I_{ni} = a + b * I_{1i} + \varepsilon$$

where  $I_{ni}$  is the length of the 90% credibility interval (in days) of the last elicitation of expert  $i$ ,  $a$  and  $b$  are two regression parameters,  $I_{1i}$  is the length of the 90% credibility interval (in days) of the first elicitation of expert  $i$  and  $\varepsilon$  is the residual error.

The median dates estimated by expert elicitation were compared to the dates of appearance of the first symptoms observed in their respective reference plots. The 5<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentiles of the series of observed dates were compared to the corresponding percentiles of the series of median dates estimated by the experts at their first and last elicitations, over the whole set of plots.

Based on the assumption that fungicide sprays were repeated every 14 days after the first application (SSP, 2016), we computed the number of fungicide treatments between the date of first fungicide spray and the end of the season, i.e. the early September, in the monitored vine plots. We first assumed that the date of first fungicide application corresponded to the observed onset date in each monitored plot. Then, we assumed that the onset date was not directly observed and that the first fungicide spray was applied at the median date of the distribution obtained by expert elicitation in each plot. In both cases, the numbers of fungicide treatments obtained in the different plots in our dataset were summarized by their 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentiles.

### **5.3.4. Comparison with qualitative risk rating systems**

We assessed the consequences of using qualitative scores instead of quantitative probabilities by considering two different qualitative rating systems, successively. The first system, further referred to as “system 1” thereafter (ANSES, 2018) includes five risk levels ranging from “very improbable” to “very probable” (Table 5.1). The second system, further referred to as “system 2” (Australian Government - Department of Agriculture and Water Resources, 2014),

includes six risk levels (Table 5.1). Both systems are used for plant health risk assessment, but the ranges of probability associated with risk levels are very different, especially for risk levels 1 to 4.

*Table 5.1: Probability ranges associated with the five risk levels of the qualitative systems 1 and 2. The score associated with an expert's elicitation corresponds to the probability range in which the expert median*

| System   | Risk levels labels          | Probability ranges |
|----------|-----------------------------|--------------------|
| System 1 | 1. Very improbable          | [0; 0.025]         |
|          | 2. Improbable               | ]0.025; 0.25]      |
|          | 3. Moderately improbable    | ]0.25; 0.5]        |
|          | 4. Probable                 | ]0.5; 0.75]        |
|          | 5. Very probable            | ]0.75; 1]          |
| System 2 | 1. Negligible               | ]0; 0.000001]      |
|          | 2. Extremely low likelihood | ]0.000001; 0.001]  |
|          | 3. Very low likelihood      | ]0.001; 0.05]      |
|          | 4. Low likelihood           | ]0.05; 0.3]        |
|          | 5. Moderate likelihood      | ]0.3; 0.7]         |
|          | 6. High likelihood          | ]0.7; 1]           |

Elicited probabilities of disease onset at mid-May derived (i.e., probability that GDM symptoms would appear on May 15<sup>th</sup> the latest) were allocated to the categories of systems 1 and 2, and were mapped to qualitative scores. The proportion of prognostics elicited before mid-May falling within each category was then calculated for both risk-rating systems. Results obtained with the two systems were compared in order to analyze the sensitivity of the risk assessments to the chosen risk rating systems.

## 5.4. Results

### 5.4.1. Evolution of the elicited dates over time

Experts' elicitation results changed over time (Figure 5.2). For example, in 2018, the median date of expert A was May 20<sup>th</sup> at the first elicitation, but the median date of the same expert was May 1<sup>st</sup>, i.e., 19 days earlier than the first estimate, at the second elicitation. This median date declined to May 9<sup>th</sup> at the third elicitation, then evolved again during the following five

elicitation: May 22<sup>nd</sup>, May 9<sup>th</sup>, May 15<sup>th</sup>, June 1<sup>st</sup> and June 29<sup>th</sup>, 2018 (Figure 2.A). For Expert A, the final median date was much later than the initial median date.

The results also changed over time for experts B (Figure 5.2.B) and C (Figure 5.2.C), but in a different way. Thus, the median dates obtained during Expert B first and last elicitation were April 22<sup>nd</sup> and May 18<sup>th</sup>, respectively (Figure 5.2.B) and June 8<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> for those of Expert C (Figure 5.2.C).

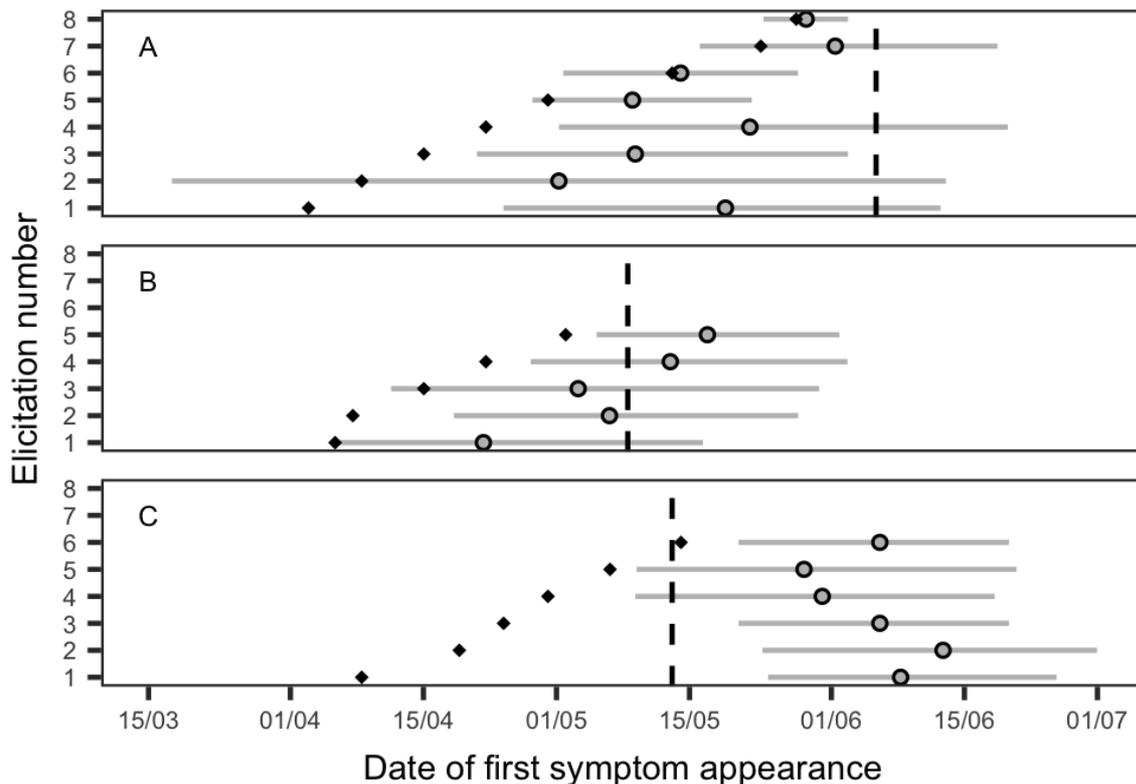


Figure 5.2: Elicited dates of the first downy mildew symptom appearance from three experts of the Bordeaux region (A, B and C) for three different vineyards in 2018. Each expert was elicited several times during the 2018 growing season (each row corresponds to a specific date of elicitation). The dates on which each elicitation is made are represented by black dots. The median date of onset of the first symptoms is represented by a grey dot. A horizontal line represents the 90% probability interval of this estimate. A vertical segment represents the date of appearance observed in each plot. In 2018, budburst and flowering were observed on April 5<sup>th</sup> and June 5<sup>th</sup>, respectively (Chambre d'Agriculture de Gironde, 2018a).

Although large differences were sometimes found between experts, the median date of the first elicitation was earlier than the median date of the last one for 80% of the experts elicited in 2017 and 89.4% of those elicited in 2018 (Figure 5.3.A and Figure 5.3.C). In 2017, the difference between the first and last elicitation was of 23.1 days on average, with a maximum of 44 days and a minimum of 0 days. In 2018, the average difference was 15.3 days, with a maximum of 47 days and a minimum of 1 day. The largest differences were obtained for experts who estimated early median dates at the first prognosis. When the first elicited median date was late, the difference between the first and last elicitation tended to be smaller (Figure 5.3). This trend was significant in both 2017 and 2018 (Figure 5.3.B and Figure 5.3.D).

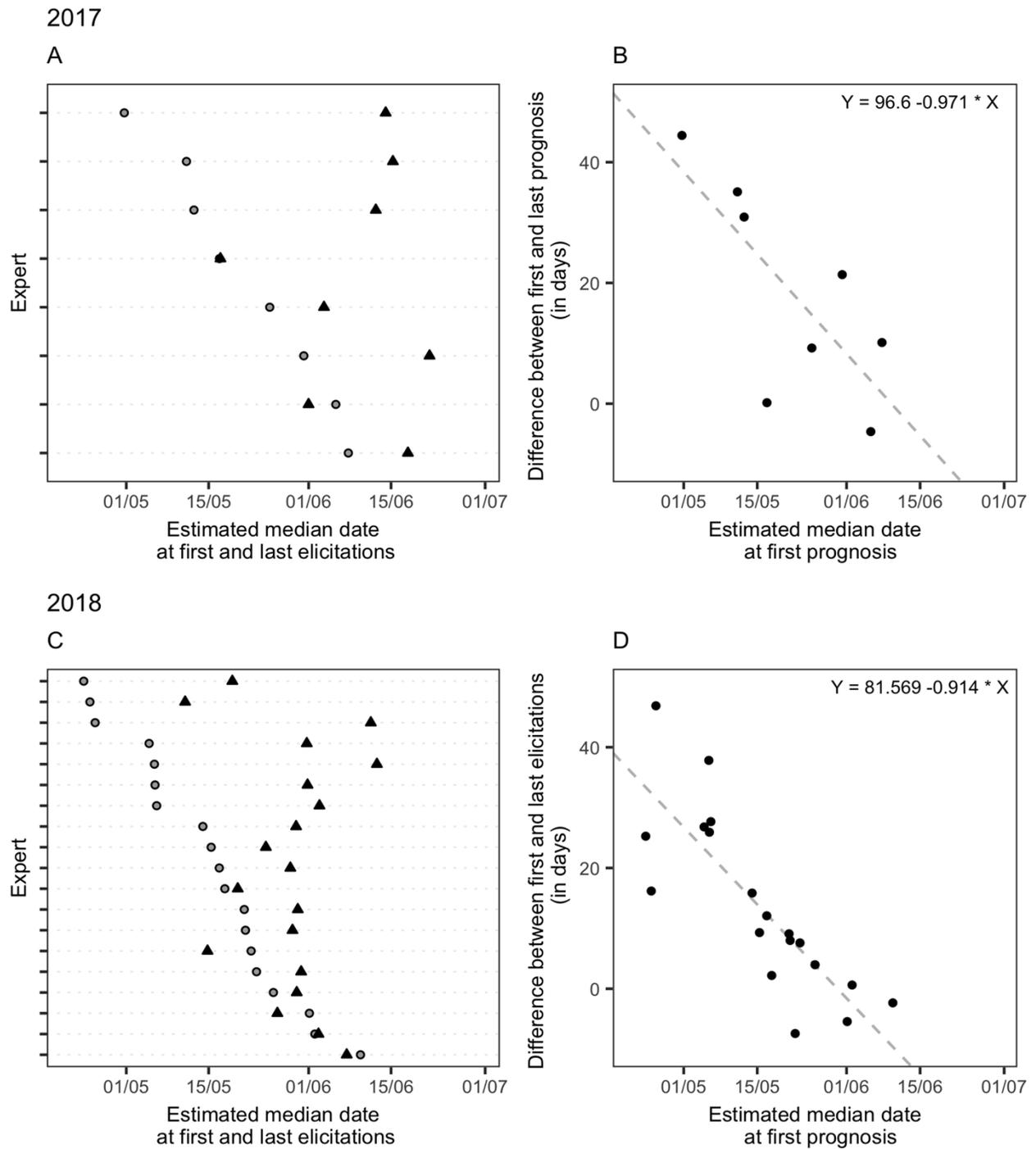


Figure 5.3: Comparison of the median elicited date of appearance of the first symptoms of late blight of the vine estimated at the beginning (first elicitation) and end (last elicitation) of the season by each expert, in 2017 (A and B) and 2018 (C and D). Figures A and C represent the median dates obtained during the first (grey) and last (black) elicitation of each expert. In A and C, each row and each pair of points corresponds to one expert. Figures B and D represent the difference between the median dates estimated at the first and last elicitation as a function of the median date estimated at the first elicitation of each expert. The relationship between the median deviation and the estimated median early season date is shown for 2017 (B) and 2018 (D).

### **5.4.2. Evolution of experts' uncertainty over time**

The level of uncertainty in elicitation changed over time. This is the case, for example, for expert A (Figure 5.2.A). The difference between the lower and upper bounds of the 90% interval of the first probability distribution elicited with Expert A was 49 days. This difference increased in his second forecast to 87 days. But between the third and eighth elicitation, the gap between the lower and upper bounds of the 90% interval decreased sharply from 41 to 9 days (Figure 5.2.A). Although the evolution was less visible, the level of uncertainty also decreased over time for the other two experts represented in Figure 5.2. The overall average difference between the lower and upper bounds of the 90% interval was equal to 51.8 and 32.6 days at the first and last elicitation, respectively.

This trend was confirmed when we analyzed all the results obtained from all the elicited experts (Figure 5.4). In 2017, uncertainty was reduced by an average of 19 days (-37.8%,  $p < 0.0001$ ) between the first and last elicitation. The maximum reduction observed on elicited experts in 2017 was 45 days, and the minimum reduction was zero (Figure 5.4.A). In 2018, the average reduction in uncertainty was 18 days (-42.2%,  $p < 0.0001$ ). Among the 19 experts elicited that year, the maximum difference observed between the uncertainty level of the first and the last forecast was 60 days. This decreasing trend is partly explained by the fact that the interval of possible dates of disease onset decreases over time. Only two experts had a higher level of uncertainty at the last forecast in 2018 (Figure 5.4.C).

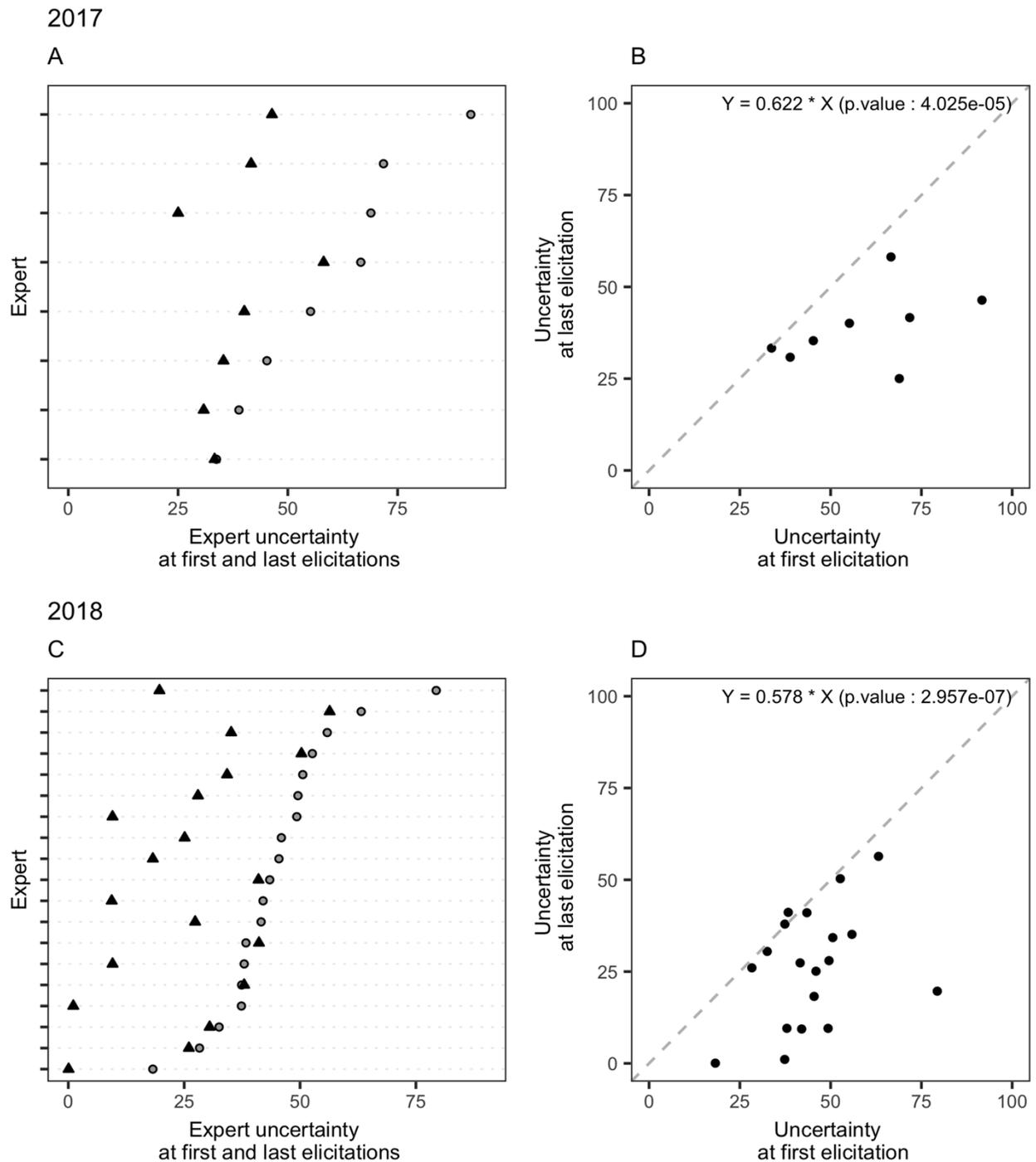


Figure 5.4: Experts' elicitation uncertainty levels in the first and last elicitation in 2017 and 2018. Figures A and C represent the number of days between the upper and lower limits of the 90% probability interval of the distribution of the appearance dates of the first symptoms of downy mildew elicited by each expert at the beginning (grey dots) and end of the season (black dots). Figures B and D compare the uncertainty levels of the first (x-axis) and the last elicitation (y-axis) of each expert.

### 5.4.3. Comparison between observed and estimated dates of first symptom appearance

The observed dates were compared to the median dates estimated by the experts during their first and last elicitation. The difference between the distribution of estimated dates and those

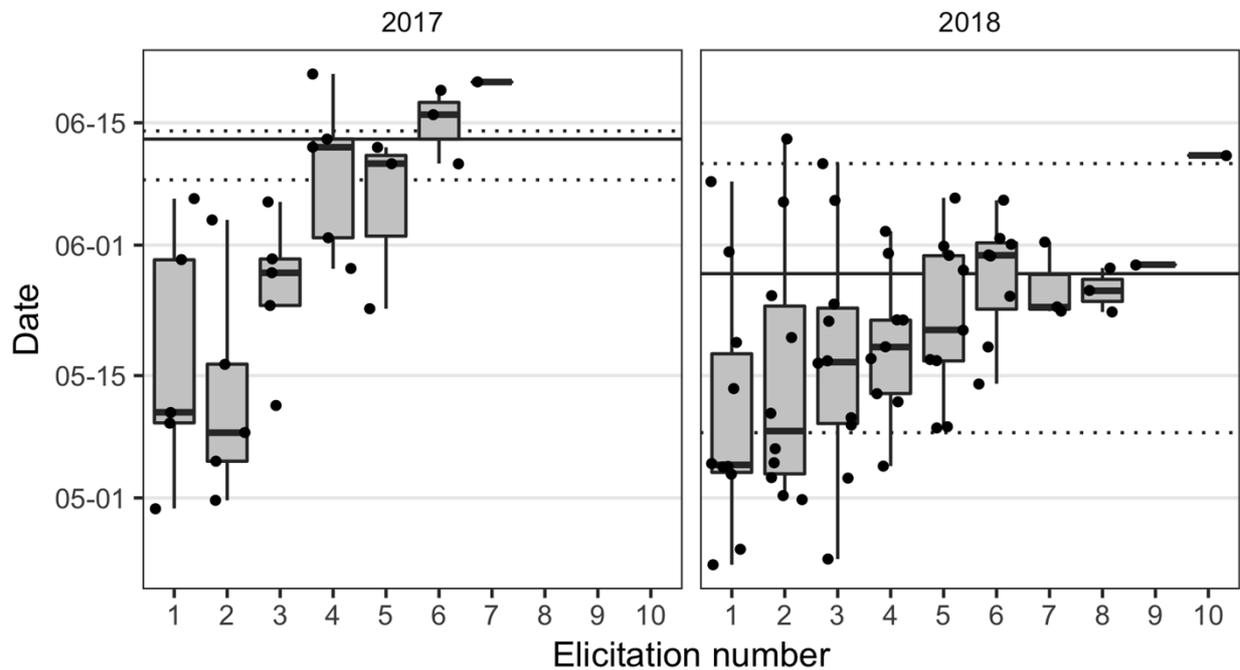
of observed dates decreases between the first and last elicitation (Table 5.2). In 2017, on June 9<sup>th</sup>, the first symptoms of GDM in the vines were observed in 50% of the plots monitored by the experts. For the elicitations made in April, 50% of the median dates elicited by the experts were prior to May 18<sup>th</sup>, i.e. 22 days earlier than the median date observed. For elicitations made from mid-May onwards, this difference was only 1 day. In the same year, the first observed symptoms appeared in 5% of the plots as early as May 27<sup>th</sup>. Four days later, a quarter of the plots were infected. The fifth and twenty-fifth quantiles of the median dates elicited at their first prognosis corresponded to May 1<sup>st</sup> and 9<sup>th</sup>; they are therefore earlier by 26 and 22 days compared to the observed corresponding percentiles, respectively. During the last elicitation, this difference was reduced to 8 and 1 days, respectively. The onset of the first symptoms was observed in 75% and 95% of the plots on June 12<sup>th</sup> and June 13<sup>th</sup>, respectively. These quantiles should have been reached on May 29<sup>th</sup> and June 3<sup>rd</sup>, according to the experts' initial elicitations, i.e., 14 and 9 days earlier. This difference was reduced to 1 and 4 days at the last elicitation. Similar results were obtained in 2018 (Table 5.2). Higher variability within elicitation was noted for first elicitation than for last elicitation. Standard deviation for first was 13.31 days in 2017 and 13.5 days in 2018 when for last elicitation it was 8.44 and 11.56 days in 2017 and 2018, respectively. In both situations, the variability within experts' elicitations was higher than the variability within observed dates of first symptoms appearance (gap of 7.42 days in 2017 and gap of 10.96 days in 2018).

*Table 5.2 : Quantiles 5, 25, 50, 50, 75 and 95% of the distribution of median appearance dates from experts' first and last elicitations and from the distribution of observed appearance dates. The quantiles reflect the variability of the expert opinions at first and last elicitations. Differences, in days, between estimated and observed quantiles are indicated in brackets. In 2017, budburst and flowering stages were observed on 5th April and May 30th (Chambre d'Agriculture de Gironde, 2017), respectively. In 2018, budburst and flowering were observed on April 5th and June 5th, respectively (Chambre d'agriculture de Gironde, 2018b). Date format: Month-Day.*

| Quantiles | 2017              |                  |                | 2018              |                  |                |
|-----------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|
|           | First elicitation | Last elicitation | Observed dates | First elicitation | Last elicitation | Observed dates |
| 5%        | 05-01 (26)        | 05-19 (8)        | 05-27          | 04-21 (16)        | 05-11 (4)        | 05-07          |
| 25%       | 05-09 (22)        | 05-30 (1)        | 05-31          | 05-02 (13)        | 05-22 (7)        | 05-15          |
| 50%       | 05-18 (22)        | 06-10 (1)        | 06-09          | 05-13 (15)        | 05-26 (2)        | 05-28          |
| 75%       | 05-29 (14)        | 06-12(1)         | 06-12          | 05-19 (14)        | 05-29 (4)        | 06-02          |
| 95%       | 06-03 (9)         | 06-17 (4)        | 06-13          | 05-30 (9)         | 06-08 (0)        | 06-08          |

The convergence of expert opinions towards observed dates of GDM onset appeared very clearly in the Bordeaux region where a high number of experts were elicited (Figure 5.5). Early in the season, experts tended to anticipate the date of first symptom appearance

strongly, sometimes even by more than one month (Figure 5.5). In late March 2017, median elicited dates of GDM onset were 34 days earlier than the median observed dates, for more than 50% of the experts. The differences were somewhat smaller in 2018, but results showed that most of the experts anticipated GDM symptom appearance by several weeks in March 2018. The differences between elicited dates and observations decreased during the growing season (Figure 5.5). In 2017, the difference between the medians of elicited and observed dates decreased to 16, 1, 3, 3, and 7 days at the third, fourth, fifth, sixth and seventh elicitations, respectively. In 2018, the gap between elicited and observed dates of GDM onset decreased from 24 to 1 day, between the second and ninth elicitations.



*Figure 5.5: Elicited median dates of onset for each experts' elicitation throughout the growing season (1 = first elicitation, 2 = second elicitation, etc.) in 2017 and 2018. Each dot indicates an elicited median date obtained with one expert. The distributions of the elicited median dates are described by boxplots (minimum, 1st quartile, median, 3rd quartile, maximum). The plain lines represent the medians of observed GDM onset dates in 2017 and 2018, while the dashed lines represent the 5th and the 90th percentiles of these observations. In 2017 in the Bordeaux region, budburst and flowering stages were observed on April 5th and May 30th (Chambre d'Agriculture de Gironde, 2017), respectively. In 2018, budburst and flowering were observed on April 5th and June 5th, respectively (Chambre d'Agriculture de Gironde, 2018b).*

#### **5.4.4. Number of fungicide treatments**

Assuming that fungicide treatments were triggered at the elicited dates of disease onset, we computed the median number of treatments resulting from the use of each expert's prognostic (Figure 5.6). The numbers of treatments tended to decrease over time, i.e. from early to late elicitations. In 2017, the median number of sprays became lower than 6 after the 4<sup>th</sup> elicitation, i.e. from early-mid May, but reached 8 when earlier elicitations were used to trigger the first fungicide application. In 2018, the median number of fungicide treatments

progressively decreased from 7.6 to 7.3 between the 3<sup>rd</sup> and the 5<sup>th</sup> elicitation, i.e. between late April and mid-May, and became close to or lower than 7 afterward (Figure 5.6).

Assuming that the first fungicide spray was applied at the observed dates of disease onset, the resulting number of treatments would be equal to 5.6 in 2017 and to 6.8 in 2018. These numbers are roughly equivalent to the median number of treatments obtained at the 6<sup>th</sup> elicitation, i.e., in June. The use of earlier expert elicitation to trigger fungicide spray (i.e., before June) would result in a higher number of treatments compared to the use of the observed dates of disease onset. This is due to the fact that experts tended to anticipate the date of disease onset before June. However, even if early expert elicitations were used to trigger fungicide sprays, the resulting numbers of treatments would probably remain lower than the numbers of treatments commonly applied by vine growers in the Bordeaux region. Indeed, surveys conducted in this region in 2010 and 2013 reported an average number of treatments equal to 7.9 and 10.1 fungicides treatments to control GDM, respectively (SSP, 2012; SSP, 2015).

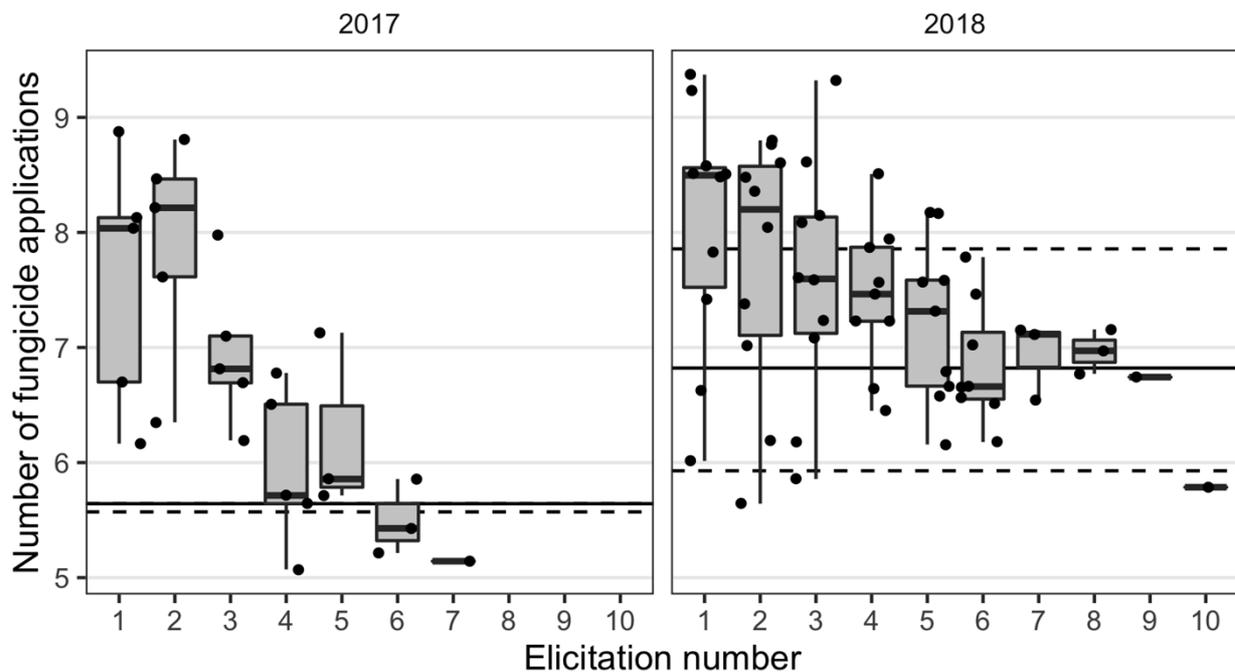


Figure 5.6: Number of applications of anti-GDM fungicides resulting from the use of elicited dates of onset of disease symptoms (boxplots) or from observed dates of disease onset (horizontal lines) as the first date of application of the fungicide. Each dot indicates the number of fungicide applications obtained from the elicitation of one expert in one plot. The distributions of the estimated number of treatments resulting from expert elicitations are described in the boxplots (minimum, 1<sup>st</sup> quartile, median, 3<sup>rd</sup> quartile, maximum). The plain lines represent the median number of fungicide treatments based on observed dates of GDM onset in the plots monitored in 2017 and 2018, while the dashed lines represent the 25<sup>th</sup> and the 75<sup>th</sup> percentiles (nearly undistinguishable in 2017).

### 5.4.5. Consequences of using qualitative risk rating systems instead of probabilities

The shares of the different risk categories were highly dependent on the chosen rating system. For example, in early May 2017, 50% of the experts' prognostics were allocated to the category 1 of system 1 but no prognostic was allocated to the category 1 of system 2, and 12% and 36% of the prognostics were allocated to the categories 2 and 3 of system 2, respectively (Figure 5.7). Several differences in the shares of the categories of the two systems were also noticeable in 2018 (Figure 5.7). The risk category associated with a given elicited probability was thus sensitive to the chosen risk rating system.

Figure 5.8 reveals another issue related to the use of qualitative systems; these systems tend to mask the evolution of risk level over time. For example, although the elicited probability of disease onset decreased by more than 50% (i.e., from more than 0.8 to less than 0.3) between April 1<sup>st</sup> and May 13<sup>rd</sup> according to expert 2, the risk level of system 2 decreased only from 6 to 5 during the same period (Figure 5.8.B). Similarly, according to system 1, expert 3's prognostics were allocated to the same risk category in April 1<sup>st</sup> and May 13<sup>rd</sup>, although the probability elicited by this expert decreased by almost 0.2 during this period. Qualitative risk-rating systems were thus not able to reflect the evolution of the elicited probability of symptom appearance during the growing season.

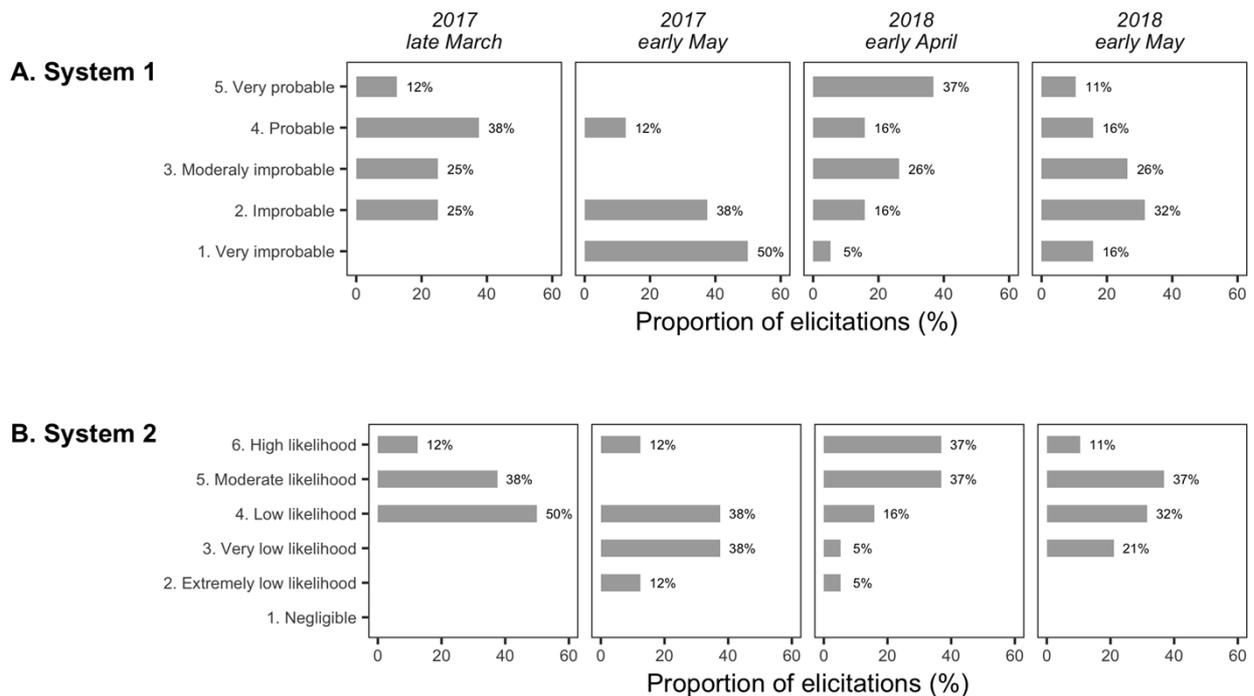


Figure 5.7: Proportion of elicitations falling within each category of risk-rating system 1 and 2. Expert elicitation on risk of disease onset at mid May was conducted in late March 2017, early May 2017, early April 2018 and early May 2018.

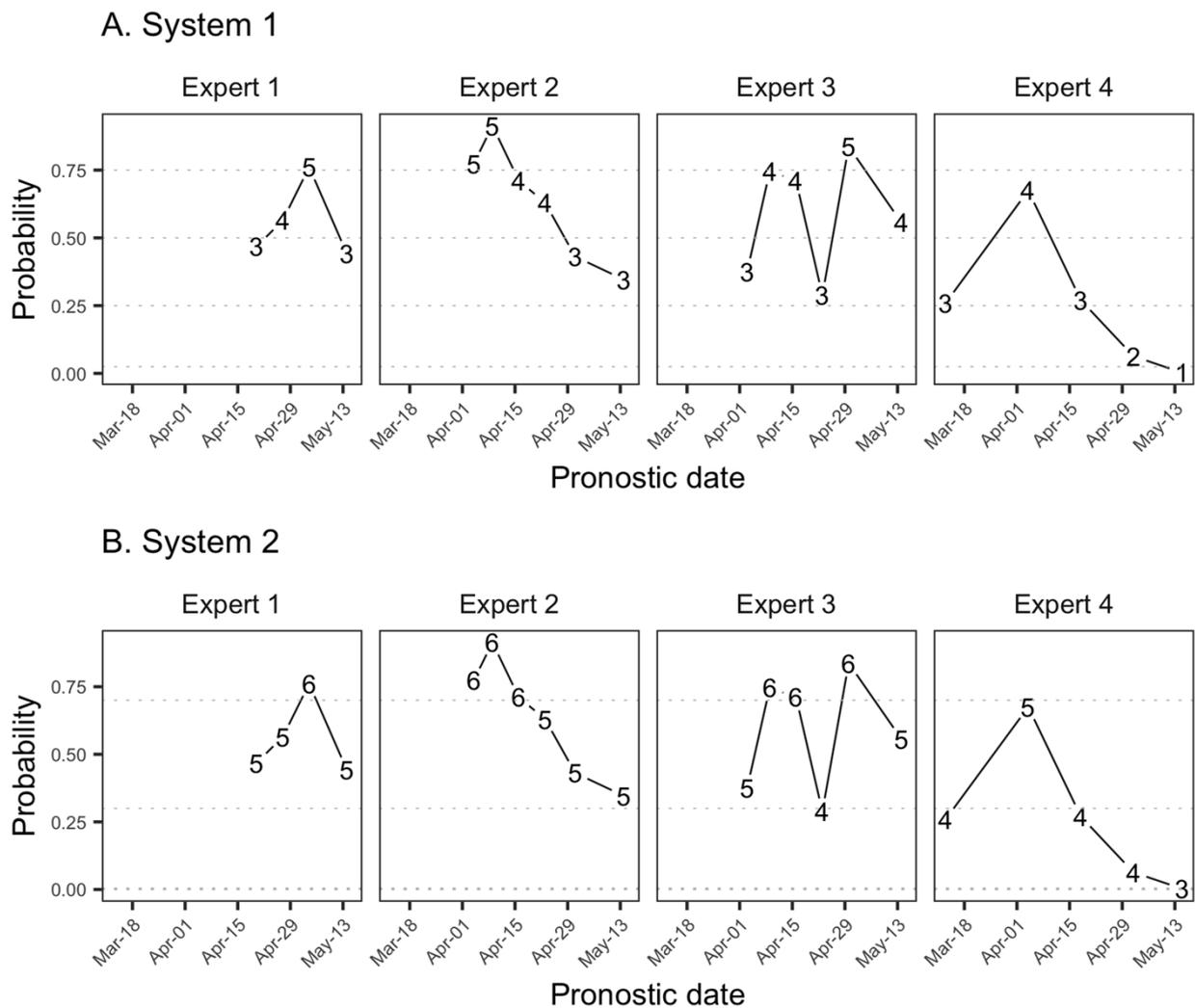


Figure 5.8: Evolution of four experts' opinions on the risk of GDM onset at mid-May. The positions of the dots on the y-axis of the graphs indicate the probabilities of first symptom appearance provided by the elicited distributions. The number of the dot represents the risk category assigned to each expert's prognostic, according to the two qualitative risk rating systems defined in Table 5.1.

## 5.5. Discussion

Although probabilistic elicitation is recommended in several areas of science to express experts' judgment and reflect their uncertainties (Andriamampianina et al., 2018; Grigore et al., 2016; O'Hagan, 2012; Winter and Green, 2018), this approach is not currently used to estimate plausible dates of disease onset in farmers' fields. In our study, we assessed the interest and limitations of this approach to estimate date of GDM onset in vineyards.

Our results show that the elicited dates of GDM first symptom appearance on vines and the uncertainty of experts' predictions change over time. This is explained by the availability of new information between two elicitation dates, including new climate data, epidemiological model simulations and local or regional observations. Experts adjust their prognosis based on this new information, which can contribute to reduce their level of uncertainty over time. The reduction of expert uncertainty with time is also partly due by the setting of our study; the

possible time period in which GDM onset can occur decreases during the growing season. The range of possible dates of disease onset becomes thus smaller and smaller over time.

Our results also show that elicited dates vary significantly between experts at each elicitation date, i.e. up to 38 and 49 days in 2017 and 2018, respectively. Since experts are elicited for different vineyards, it is not possible to determine whether the variability of the elicited dates is due to divergent opinions between experts or to the fact that each expert makes a prediction for a different plot. The between-plot variability cannot be distinguished from the between-expert variability. Dates of GDM outbreaks are indeed known to vary in space in relation with local weather conditions (Caffi et al., 2014). In future applications, it will be interesting to disentangle the between-site from the between-expert variability by involving groups of experts familiar with several vineyards (e.g., farmers' advisors able to estimate dates of disease onset on a relatively large number of vineyards) that could be all elicited for the same plots.

Our approach is also one of the few studies that attempt to assess the accuracy of elicitation results using observations. Lichtenstein et al. (1982) also compared probabilistic elicitation results with observations, but in a very different context. In their study, Lichtenstein et al. (1982) showed that in some cases the experts' estimates were very different from reality, which is consistent with our results. In our study, the elicited dates of GDM symptom appearance are often too early compared to the date actually observed in their plot, but this bias tends to decrease during the growing season. Indeed, when all the plots are considered, the proximity between the distribution of elicited dates and the distribution of observed dates is significantly higher at the end of the season than at the beginning of the season. At the regional level, the distribution of elicited dates at the end of the season gives a realistic picture of the possible dates of GDM first symptoms appearance on vines in vineyards, at least for the two years considered in our study. It would be useful to verify this result for other years and other regions.

Probabilistic expert elicitation has several advantages compared to qualitative risk-rating systems currently used for assessing plant health risk. First, this approach does not require the specification of risk level categories. As demonstrated in this study, the use of such categories makes the interpretation of any risk assessment very sensitive to the chosen scoring scheme. Second, probabilistic expert elicitation describes the level of uncertainty of the experts' prognostics in a transparent manner. Finally, probabilistic expert elicitation is able to describe more transparently the evolution of the expert's prognostics and of their uncertainty during the growing season than qualitative rating systems, which tend to mask part of this dynamic.

Our results show that probabilistic elicitation provides a full distribution of possible dates of GDM first symptoms appearance in a given region, from which various quantiles can be derived. Probabilistic elicitation provides useful information about experts' uncertainty at the plot and regional levels. This is a major advantage compared to qualitative scoring methods. Although the relationship between the elicited and observed dates of disease onset is weak at level of individual vineyards, the distributions of elicited dates obtained at the regional scale are in agreements with the observed distributions.

Since grape growers rely on GDM onset risk assessments (especially qualitative risk estimation provided by regional experts in alert bulletins) to trigger their first fungicide treatment, the use of probabilistic expert elicitation is expected to have an effect on the number of fungicide treatments. As shown by Maily et al. (2017), the date of the first fungicide treatment, conditioned by the appearance of the first symptoms on vines, has a strong impact on the total number of fungicide treatments applied during the season. Indeed, after the first application, the treatments (contact or systemic) are usually repeated several times during the growing season. The average frequency of treatments is of one treatment every two weeks (SSP, 2015; Maily et al., 2017). Our results show that the median date of GDM first symptoms appearance estimated in March or in April from experts' elicitations is generally earlier than the actual date of appearance of the first symptoms observed in the monitored plots. For the two years considered in this work, a trigger of fungicide treatments from the elicited dates in April would lead to a total number of treatments higher than that resulting from a treatment decision based on the elicitations at the end of May or beginning of June. Our results show that the difference in median elicited dates is approximately 19 days on average over the two years between elicitations performed in March-April and those performed from mid-May. The expected difference in the number of treatments induced by the elicitation date would therefore be 1.4 treatments, assuming that one treatment is applied every two weeks.

The farm surveys conducted in the Bordeaux regions indicate that the average numbers of fungicide treatments against GDM were equal to 7.9 and 10.1 in 2010 and 2013, respectively (Service de la Statistique et de la Prospection, 2015a, 2012). Although these surveys were older than our elicitations, there is little evidence that fungicide use has decreased since then. Compared to these values, the use of the elicited dates obtained after early May to trigger the first spray of fungicide would have decreased the number of treatments. However, the practical utility of expert probabilistic elicitation to trigger fungicide treatments still needs to be assessed in close collaboration with farmers and agricultural extension services.

In theory, it will be of course better to visit each vineyard every week to check disease symptom occurrence. In practice, vine growers rely on alert bulletins reporting qualitative ratings because most of them do not have time to check GDM symptoms every week. Our proposal is to use probabilistic elicitation instead of qualitative ratings in alert bulletins in order to communicate expert judgments and uncertainties in a more transparent way in the assessment of plant disease risks. Probabilistic elicitation is a generic method that can be applied to evaluate risks related to various pests and diseases or to other epidemiological thresholds, providing information about GDM development at a regional scale. Several operational tools (Devilee and Knol, 2011; Morris et al., 2014; Pibouleau and Chevret, 2014) are available to implement probabilistic elicitation through a user-friendly interface. In this study, we used the MATCH Tool<sup>®</sup> developed by Morris et al. (2014). Based on our experience, experts need one training session before being elicited with MATCH Tool<sup>®</sup>. After this training, the implementation of MATCH Tool<sup>®</sup> is quick and easy (about 10 minutes per elicitation and per expert). However, due to high uncertainty in expert knowledge, it is indeed relevant to make frequent observations in farmers' vineyards when possible.

## **5.6. Conclusion**

Based on the distributions estimated by the experts, we have shown a relationship between an expert's elicitation on the date of GDM first symptoms appearance on vines and the date on which elicitation is conducted. Our results also reveal a high level of uncertainty in the experts' judgments, especially in March-April. Although differences between the elicited and observed dates of GDM onset are large at the plot level, expert elicitation provides a realistic distribution of plausible dates of GDM onset at the regional scale. Finally, we conclude that probabilistic elicitation is a useful tool for transparently presenting expert judgment and the associated level of uncertainty.

### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

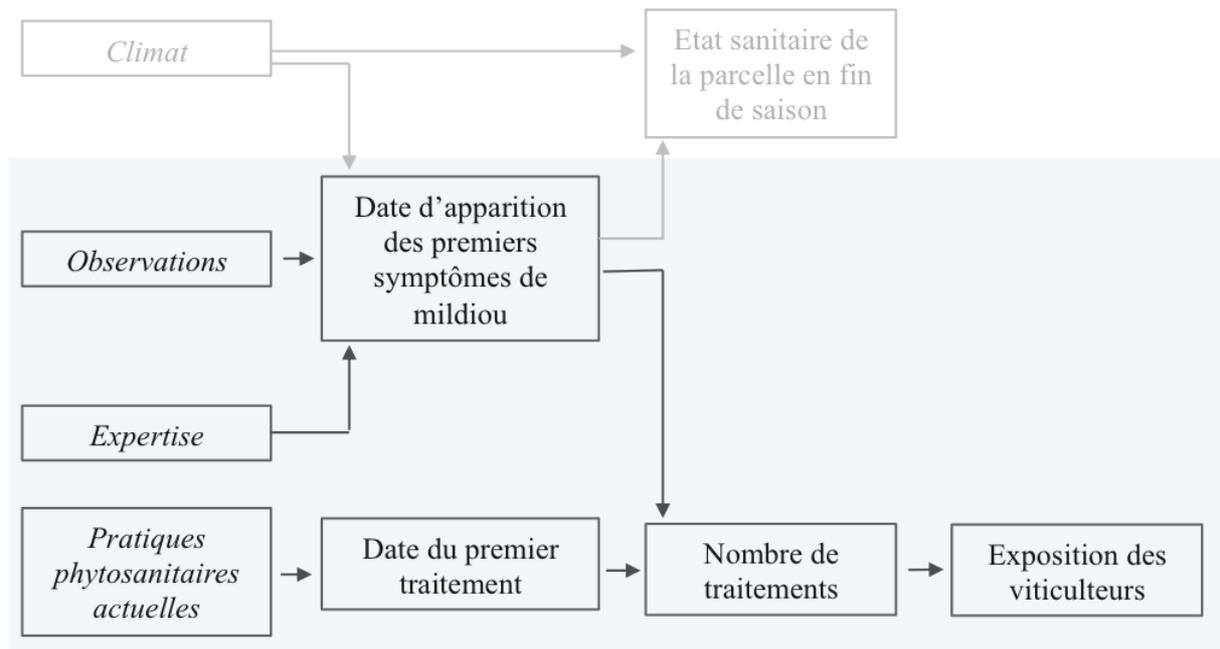
### **Acknowledgments**

This work was supported by the L-i-cite project funded by the Carnot Plant2Pro Institute; the SMART-PIC project - Designing tools for decision-making support in integrated crop protection [2015-2019, CASDAR funding, AAP RT]; ANRT [CIFRE thesis grant for Mathilde Chen]. This work is part of the #DigitAg project [ANR-16-CONV-0004]. The authors would like to thank the regional experts who agreed to participate in the elicitation sessions.

## **Chapitre 6. Impact d'un report de la date de la première intervention sur le nombre de traitements et sur l'exposition des opérateurs**

Ce chapitre est un projet d'article soumis à la revue *Scientific Reports*.

Il présente l'étude de l'impact du report de la date du premier traitement anti-mildiou sur le nombre de traitements et sur l'exposition des opérateurs aux fongicides.



## **Résumé**

*Contexte* – Le mildiou de la vigne est à l'origine de nombreux traitements fongicides en viticulture, notamment dans le Bordelais. Il a été montré que le report de la date du premier traitement permet de réduire le nombre d'interventions pour lutter contre la maladie.

*Questions de recherche* – Les questions traitées dans ce chapitre sont :

- Comment se positionne la distribution des dates de premiers traitements anti-mildiou par rapport à la distribution des dates d'apparition de la maladie dans les vignobles bordelais ?
- Quel est l'impact d'un report de la date de la première intervention anti-mildiou à la date d'apparition de la maladie sur le nombre de traitements ?
- Quel est l'impact de cette stratégie sur l'exposition des opérateurs, c'est-à-dire les personnes en charge des traitements ?

*Matériel et méthodes* – La distribution des dates de premiers traitements anti-mildiou et la distribution des dates d'apparition de la maladie ont été décrites pour le Bordelais. Pour chaque distribution, le nombre moyen de traitements a été estimé en fonction de différentes cadences de traitements. La réduction du nombre de traitements anti-mildiou induite par le report de la date du premier traitement à l'apparition de la maladie a été associée à une réduction de l'exposition des opérateurs. Cette réduction a été comparée au niveau de protection induit par le port de différents équipements de protection individuelle (EPI).

*Résultats* – Cette étude montre que déclencher le premier traitement anti-mildiou à la date d'apparition de la maladie réduit en moyenne le nombre de traitements de 56 % par rapport aux pratiques actuellement observées dans le Bordelais. Le nombre de traitements induits par cette stratégie est supérieur lorsque la fréquence de traitement augmente, mais reste inférieur aux estimations réalisées pour les pratiques actuelles. La réduction d'exposition associée au report de la date du premier traitement est équivalente voire plus importante que celle induite par le port de certains EPI. Cependant, les meilleurs niveaux de protection ont été observés dans le cas où l'opérateur porte des EPI et déclenche la lutte fongicide à l'apparition des premiers symptômes de mildiou.

*Conclusion* – Nos résultats montrent qu'utiliser la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou pour déclencher la première intervention permet de réduire en moyenne de moitié l'usage des fongicides pour lutter contre cette maladie et de réduire l'exposition des opérateurs. Cependant, il serait nécessaire de confirmer que cette stratégie n'ait pas d'impact significatif sur la récolte et au delà, sur le revenu des viticulteurs.

**Mots clés** : Mildiou de la vigne, raisonnement des traitements, exposition des opérateurs.

## **Delaying the first grapevine fungicide application reduces exposure on operators by half**

### **Authors**

Mathilde Chen<sup>1,4</sup>, François Brun<sup>2</sup>, Marc Raynal<sup>3</sup>, David Makowski<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> ACTA, INRA, UMR Agronomie, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval Grignon, France

<sup>2</sup> ACTA, INRA, UMR AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France

<sup>3</sup> IFV, Bordeaux Nouvelle Aquitaine. UMT SEVEN, 71 Avenue E Bourlaux 33882 Villenave d'Ornon Cedex

<sup>4</sup> INRA, UMR Agronomie, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval Grignon, France

<sup>5</sup> CIRED, 45bis Avenue de la Belle Gabrielle, 94130 Nogent-sur-Marne, France

**Corresponding author:** M. Chen

**E-mail:** [mathilde.chen@acta.asso.fr](mailto:mathilde.chen@acta.asso.fr)

### **6.1. Abstract**

Downy mildew is a severe disease of grapevines treated by repeated fungicide applications during the growing season. The impact of these treatments on human health is currently under scrutiny. Fungicide application before disease onset is not thought to be greatly beneficial for grape production, but the first fungicide treatment is applied at least six weeks before disease onset in more than 50% of the vineyards in the Bordeaux region, a major French vine-growing area. We estimate that applying one fungicide every two weeks at disease onset would reduce fungicide applications against downy mildew by 56% (95%IC=[51.0%, 61.3%]), on average, relative to current levels. This reduction is lower when treatments are sprayed weekly but still reaches at least 12.4% (95%IC=[4.3%, 20.8%]) in this case. We show that this strategy would decrease operator exposure to pesticide as effectively as the use of various types of personal protection equipment in the Bordeaux region. The implementation of this strategy would significantly decrease fungicide use, health risks, and adverse environmental impacts of vineyards.

## **6.2. Introduction**

Downy mildew, caused by the oomycete *Plasmopara viticola*, is a major disease of grapevine worldwide. If left untreated, grape downy mildew (GDM) attacks can cause yield losses (Dubos, 2002; Gessler et al., 2011) and reduce grape quality (Jermini et al., 2010). This disease is currently controlled mostly by intensive pesticide use, particularly in Bordeaux, a major wine-growing area in France (Commission européenne, 2007). In this region, many vine growers start applying fungicides early in spring, and spraying is then repeated regularly throughout the growing season, about two or three times per month, depending on their action period. This strategy keeps damages levels low but entails a large number of fungicidal treatments (7.9 treatments per vineyard and year in average in France (*Service de la Statistique et de la Prospection, 2015a*), with potential environmental implications, high production costs (Caffi et al., 2010) and risks to human health, particularly for vine growers (Baldi et al., 2003a, 2003b, 2001; Provost et al., 2007; Viel and Challier, 1995).

Several approaches for reducing pesticide exposure have been proposed. The use of personal protection equipment (PPE) is often promoted as an efficient means of reducing the exposure of operators – the individuals applying the treatments (European Food Safety Authority, 2014a) – to pesticides. However, it was pointed out that PPE was not systematically worn during pesticide applications (ANSES, 2014). Indeed, the wearing PPE appears to be uncomfortable in certain climatic conditions and in certain positions (Garrigou et al., 2012; Grimhuhler and Viel, 2018). Another limitation of this approach is its inability to reduce the exposure of residents living close to vineyards. Concern about the exposure of residents to the vineyards where pesticides are applied has increased sharply in recent years (Kab et al., 2017; Seidler et al., 2008).

Delaying the first application for GDM treatment could potentially reduce the total number of fungicide treatments over the growing season. Mailly et al. (Mailly et al., 2017) showed, in a nationwide survey, that the total number of fungicide applications in the vineyard was smaller for growers who began spraying later in the season (i.e. after May 15<sup>th</sup>). GDM can be efficiently controlled by fungicides beginning at the time of infection (Caffi et al., 2010) or a few days before the symptoms onset (Menesatti et al., 2015). Most vine growers in the Bordeaux region current start spraying fungicides before mid-May (Mailly et al., 2017), a few weeks before the onset of the first GDM symptoms (Chen et al., 2018a). Postponing the first fungicide treatment to the date of symptom onset could, thus, potentially reduce the number of fungicide treatments and the associated exposure to pesticides. However, the degree to which fungicide use and operator exposure can be reduced by this approach has never been quantified.

In this study, we estimated the dates of the first GDM treatment in the Bordeaux vineyards from different sources of information. Based on our estimations, we calculated the potential decrease in fungicide use relative to current practices in this region that could be achieved by delaying the first spray until symptom onset. This assessment was based on different treatment frequency assumptions, ranging from one fungicide spray every two weeks to one spray per week. These decreases were converted into decreases in operator exposure and compared with the decrease in exposure associated with the use of various types of personal

protection equipment, computed with a model predicting the exposure of the agricultural operator (Großkopf et al., 2013). We found that postponing the first fungicide application to disease onset would decrease operator exposure to pesticides by the same order of magnitude as the use of personal protection equipment.

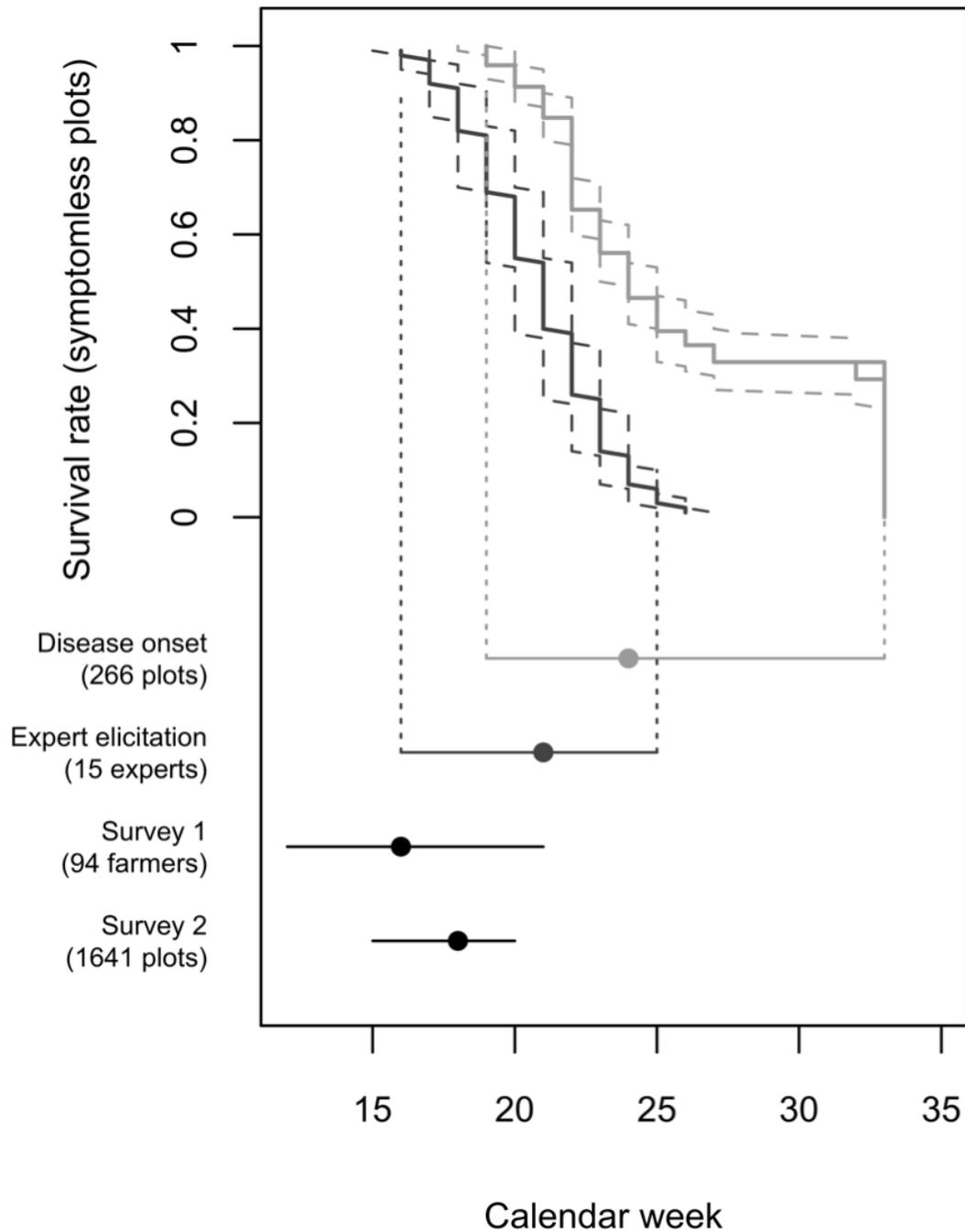
### **6.3. Results**

#### **6.3.1. Large gap between first fungicide spray and the date of disease onset**

The date of first GDM treatment range from calendar week 12 (cw) (mid-late March) to cw 28 (early-mid July), according to a survey conducted by the French extension service for vines and wines (IFV) in the Bordeaux region in 2018 (Figure 6.1). About 95% of the questioned vine growers in the Bordeaux region applied their first GDM treatment between cw 12 (mid-late March) and cw 21 (mid-late May) according to this source of information (Figure 6.1). These results were confirmed by a three-year survey conducted by the French Ministry of Agriculture's Statistics and Prospective Service (SSP), which found that about 95% of the Bordeaux vine growers questioned applied their first GDM treatment between cw 15 (mid April) and cw 20 (mid May) (Figure 6.1).

Although both farm surveys showed that 90% of vineyards received their first treatment against GDM before cw 19 (early-mid May), our statistical survival analysis of the on-field GDM disease observations revealed that almost none of the 266 untreated sites-year monitored displayed any symptoms of GDM before cw 19. Here, the first symptoms of the disease appeared in less than 10% (95%CI = [3.7%, 12.8%]) of the plots by cw 20 (mid-late May), and in 50% (95%CI = [46.8%, 59.7%]) of the plots by cw 24 (mid-June), i.e. six to eight weeks after the median date of first fungicide application reported in the farm surveys (Figure 1). By cw 32 (mid August), the proportion of plots with GDM symptoms remained below 90% (95%CI = [61.0%, 73.5%]). We found a relationship between the date of symptom onset and spring rainfall. The median date of GDM onset was delayed by about three weeks, i.e. 50% (95%CI = [36.6%, 64.0%]) of the monitored plots displayed GDM symptoms by cw 27 (early July) if the spring was dry (mean daily rainfall < 1.51 mm/day in March-June, like in 2011). The first symptoms appeared in 50% (95%CI = [52.1%, 67.4%]) of the plots by cw 24 (mid-June) in wet springs (mean daily rainfall > 5.45 mm/day in March-June, like in 2013). By cw 33 (mid-late August), GDM onset was reported less than 60% of the plots (95%CI = [37.4%, 70.0%]) and more than 70% (95%CI = [68.4%, 85.9%]) of the plots in dry and wet springs, respectively.

Regional experts (vine growers' advisers) tend to anticipate the dates of first GDM symptom appearance relative to field observations. The median date of symptom onset elicited on 15 regional experts is cw 21 (late May), three to five weeks after the median date of first fungicide treatment reported in agricultural surveys but about two weeks before the median date of symptom onset in the untreated fields monitored. The probability of GDM onset was 90% (95%IC = [82.0%, 96.0%]) by cw 24 (mid-June), based on regional experts elicitation, when the proportion of infected plots remains inferior to 55%, according to Cox models.



*Figure 6.1: Proportions of symptomless plots according to expert opinion or based on observed symptoms (decreasing survival curves in plain lines with 95% confidence intervals in dashed lines). Horizontal bars represent the 2.5% and 97.5% quantiles computed from each distribution and points correspond to medians, from top to bottom: dates of onset of the first GDM symptoms based on observed plots (light grey) and on expert elicitations (dark grey), first GDM fungicide spraying dates according to two surveys, IFV and SSP surveys (in black).*

### **6.3.2. Delaying the date of the first spray could halve fungicide use**

Assuming that fungicides are usually applied every two weeks after the first application (Service de la Statistique et de la Prospection, 2016b), the median number of fungicide applications would be 8.5 and 7.8 based on the dates of the first fungicide spray reported in the IFV and SSP farm surveys, respectively. This result is consistent with the number of fungicide applications reported by the SSP for the 2010 and 2013 growing seasons in the Bordeaux region (Service de la Statistique et de la Prospection, 2015a, 2012).

Delaying the first fungicide spray to the date of disease onset derived from the field observations would decrease the number of fungicides to 3.4, on average, in all years (Figure 6.2.A.). This number of treatments corresponds to a 59.9% (95%IC = [55.0%, 64.5%]) and 56.0% (95%IC = [51.0%, 61.3%]) decrease relative to the numbers of treatments derived from the IFV and SSP surveys, respectively (Figure 6.2.B). However, the actual decrease in the number of fungicide treatments depends on climate conditions in the spring. In dry springs, the decrease may be as high as 70.4% (95%IC = [61.3%, 79.1%]) and 67.6% (95%IC = [57.8%, 77.3%]) (2.5 treatments) relative to the numbers of treatments computed from the IFV and SSP surveys, respectively. In a wet spring, the decrease would be lower, at 55.6% (95%IC = [49.8%, 61.2%]) and 51.4% (95%IC = [45.3%, 57.8%]) (3.8 treatments) relative to the numbers of treatments estimated from the IFV and SSP surveys, respectively. The use of a higher treatment frequency of one application per week combined with a delay of the first application to the disease onset results in a smaller decrease in the number of treatments equal to 19.6% (95% CI =[12.2%, 27.3%]) and 12.4% (95% CI =[4.3%, 20.8%]) compared to current practices of farmers reported in the IFV and SSP surveys, respectively.

Experts tend to predict earlier dates of first symptom appearance than those observed in the field (Figure 6.1). Thus, smaller decreases would be achieved if the first fungicide is sprayed on the date of disease onset estimated from expert knowledge. Assuming a frequency of treatment of one every two weeks, the number of treatments would be about 29.4% (95%IC = [26.3%, 35.4%]) and 22.7% (95%IC = [19.7%, 29.6%]) lower than that derived from the IFV and SSP surveys, respectively. On the other hand, with a frequency of one treatment every week, the number of treatments would be 40.0% (95%IC = [0.0%, 63.5%]) and 52.5% (95%IC = [8.4%, 78.1%]) higher than that derived from the IFV and SSP surveys, respectively.

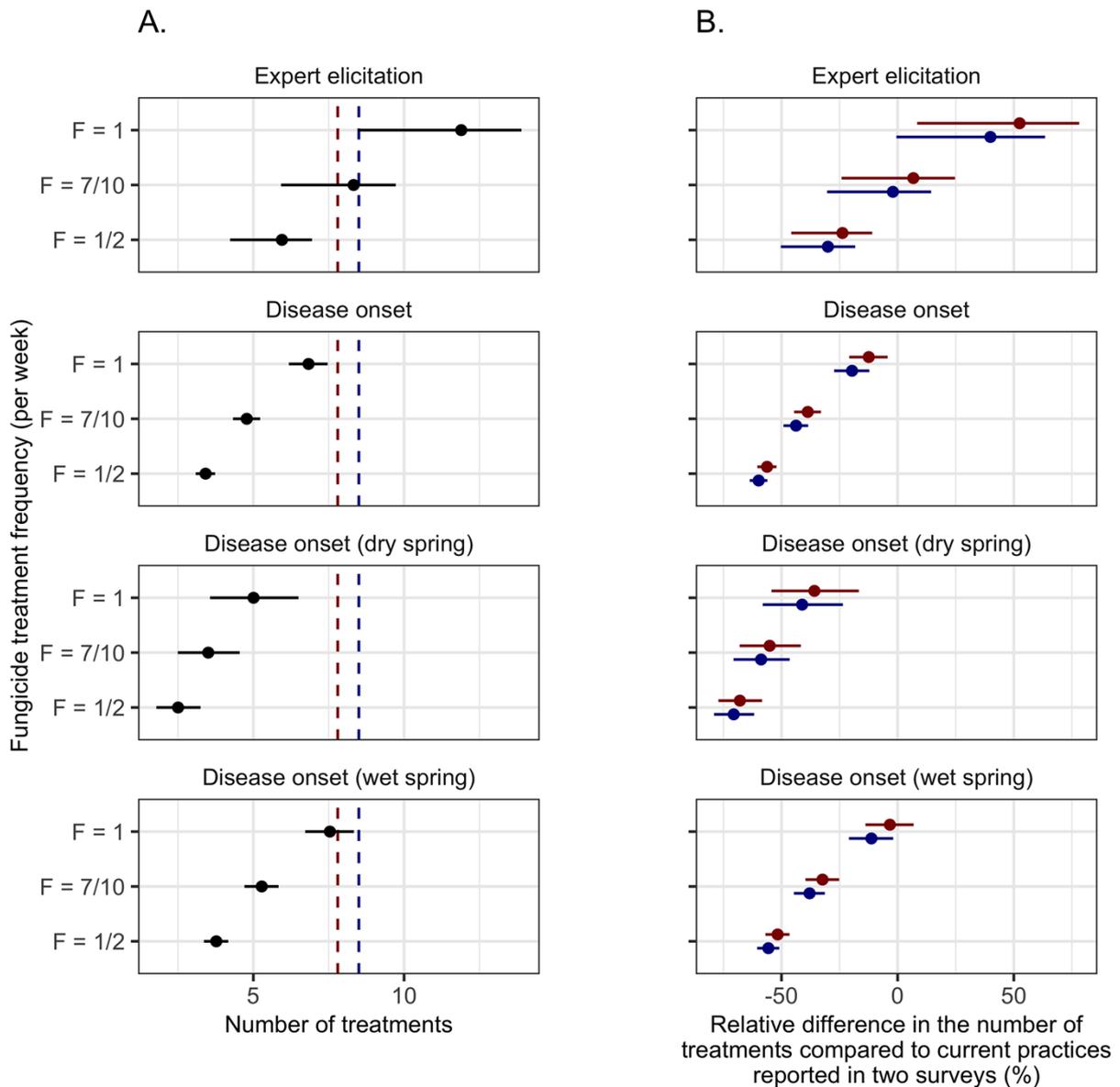


Figure 6.2: A: Number of anti-GDM fungicide sprays for different strategies to trigger the first fungicide application (based on expert elicitation or on observed dates of disease onset) and different treatment frequencies ( $F=1$ , i.e., one treatment per week,  $F=7/10$ , i.e., seven treatments every 10 weeks or one treatment every 10 days,  $F=1/2$ , i.e., 1 treatment every two weeks). Vertical lines represent the numbers of fungicide applications corresponding to current farmers' practices according the IFV survey (in blue) and SSP survey (in red). B: Same results expressed as relative differences in the number of fungicide applications (%) for different strategies to trigger the first fungicide application (based on expert elicitation or on observed dates of disease onset) and different treatment frequencies compared to current farmers' practices according the IFV survey (in blue) and SSP survey (in red). Horizontal lines represent 95% confidence intervals in both panels.

### 6.3.3. Means of decreasing operator exposure to fungicides

Decreasing the number of GDM fungicide sprays by delaying the first fungicide treatment until disease onset results in a lower level of operator exposure to fungicides. We compared the decrease in exposure due to this strategy with that resulting from the use of personal protection equipment (PPE). Operator exposure to the main active compounds of GDM fungicides was calculated with the exposure model of Großkopf et al. (2013), for different

combinations of PPEs (Figure 6.3, Supplementary Table in Annexe H and Supplementary Figure in Annexe I).

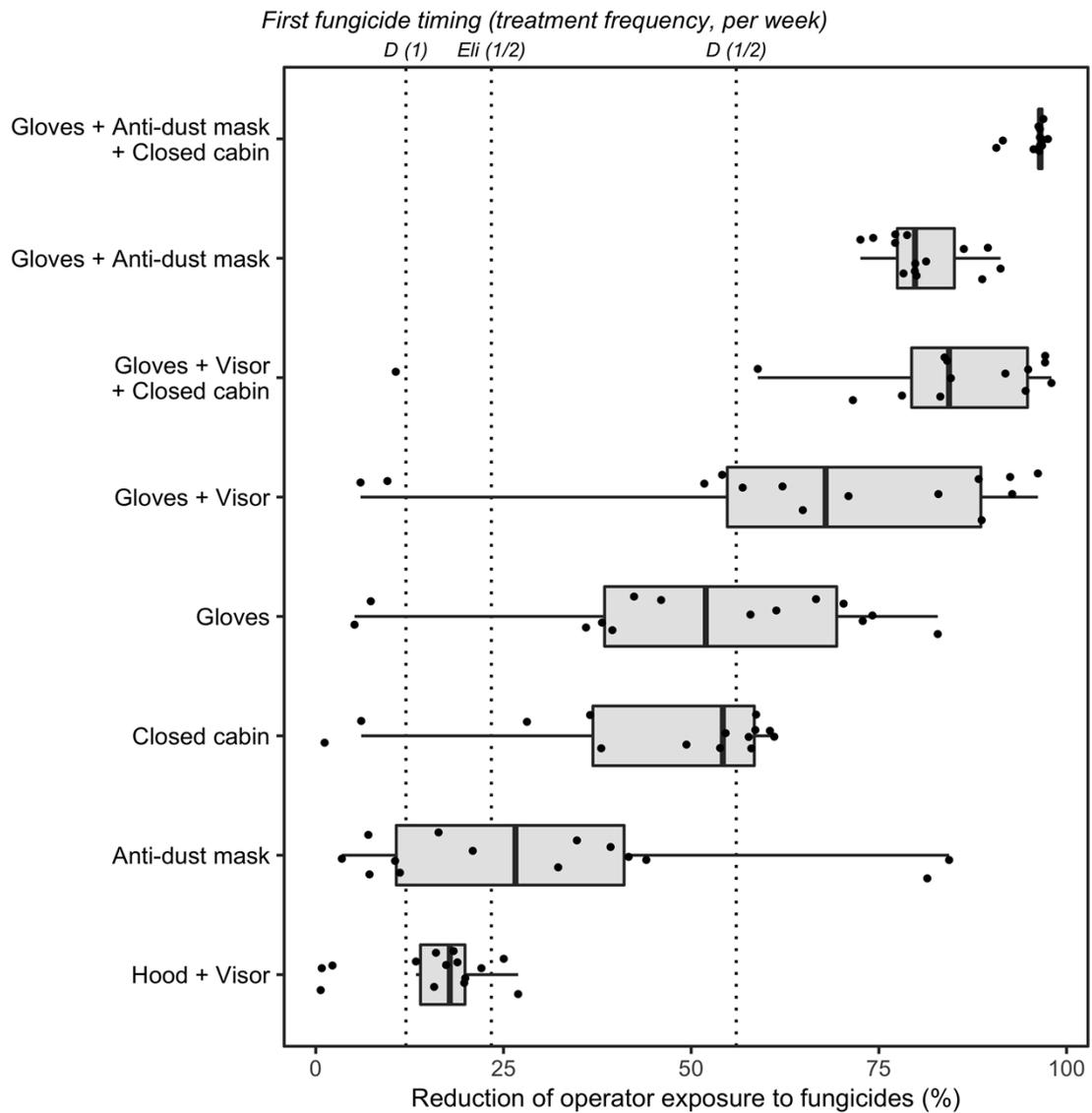
With a treatment frequency of one every two weeks, delaying first fungicide application until disease onset is more protective than wearing a face shield with a hood or an anti-dust mask for most substances. Considering the data for all years together, the use of a closed tractor cabin did not reduce operator exposure more than reducing the number of fungicide treatments by delaying the first fungicide spray until disease onset for 57% of the substances considered. In dry springs, this was the case for 100% of the substances considered, whereas, in wet springs, it was the case for 43% of the substances considered. Considering the data for all years together, wearing gloves was less protective than postponing the first GDM treatment for 50% of the studied substances. For 36% of the substances, wearing gloves was still more protective than reducing the number of treatments, even if there was little rainfall in the spring.

The decrease in operator exposure was enhanced by using several PPEs together during pesticide mixing, loading and application. On average, the use of both gloves and a face shield was more protective than delaying the first fungicide treatment until disease onset for 71% of the active substances. The largest decrease in exposure was achieved through the combined use of gloves and an anti-dust mask. Furthermore, this combination of PPEs was also more effective at reducing exposure than delaying first fungicide application until disease onset.

However, even for combinations of several PPEs, operator exposure was further reduced by delaying the first fungicide treatment until disease onset (Figure 6.4 and Annexe J). This delay systematically gave substantial exposure reduction for every studied PPE combinations. The strongest decrease in operator exposure was observed when postponing first application was combined with the use of a hood and visor (from 16.6 to 67.1%, depending on the substance) and the smallest was achieved with a combination of delayed spraying and the use of gloves, an anti-dust mask and a closed cabin (from 0.6 to 6.3%).

The decrease in exposure was much lower when the date of appearance of the first symptoms was estimated from expert knowledge. This finding is consistent with the anticipation of symptom appearance by the experts; the decrease in the number of fungicide treatments and the associated decrease in exposure were smaller when the first fungicide application took place on the dates of symptom appearance estimated by the experts than when they took place on the dates derived from field observations.

Levels of exposure reduction were smaller when the treatment frequency was increased from one treatment every two weeks to one treatment every week. Indeed, an increase in the frequency of treatment partially offsets the effect of the postponement of the first treatment on operators' exposure. However, combined with PPE, the triggering of first fungicide application at disease onset was still able to reduce operators' exposure by 2.4 to 11.9% (Figure 6.4, see results for D (1)).



*Figure 6.3: Levels of reduction of operator exposure to 14 fungicide molecules for various operator protection scenarios. Each point represents the reduction of exposure to one molecule. Vertical lines indicate the median decrease in exposure achieved by different control strategies, specified above each line (D (1) = first application delayed until disease onset estimated by survival analysis + treatment applied every week; D (1/2) = same delay + treatment applied every two weeks; Eli (1/2) = first application delayed until disease onset estimated by probabilistic expert elicitation + treatment applied every two weeks).*

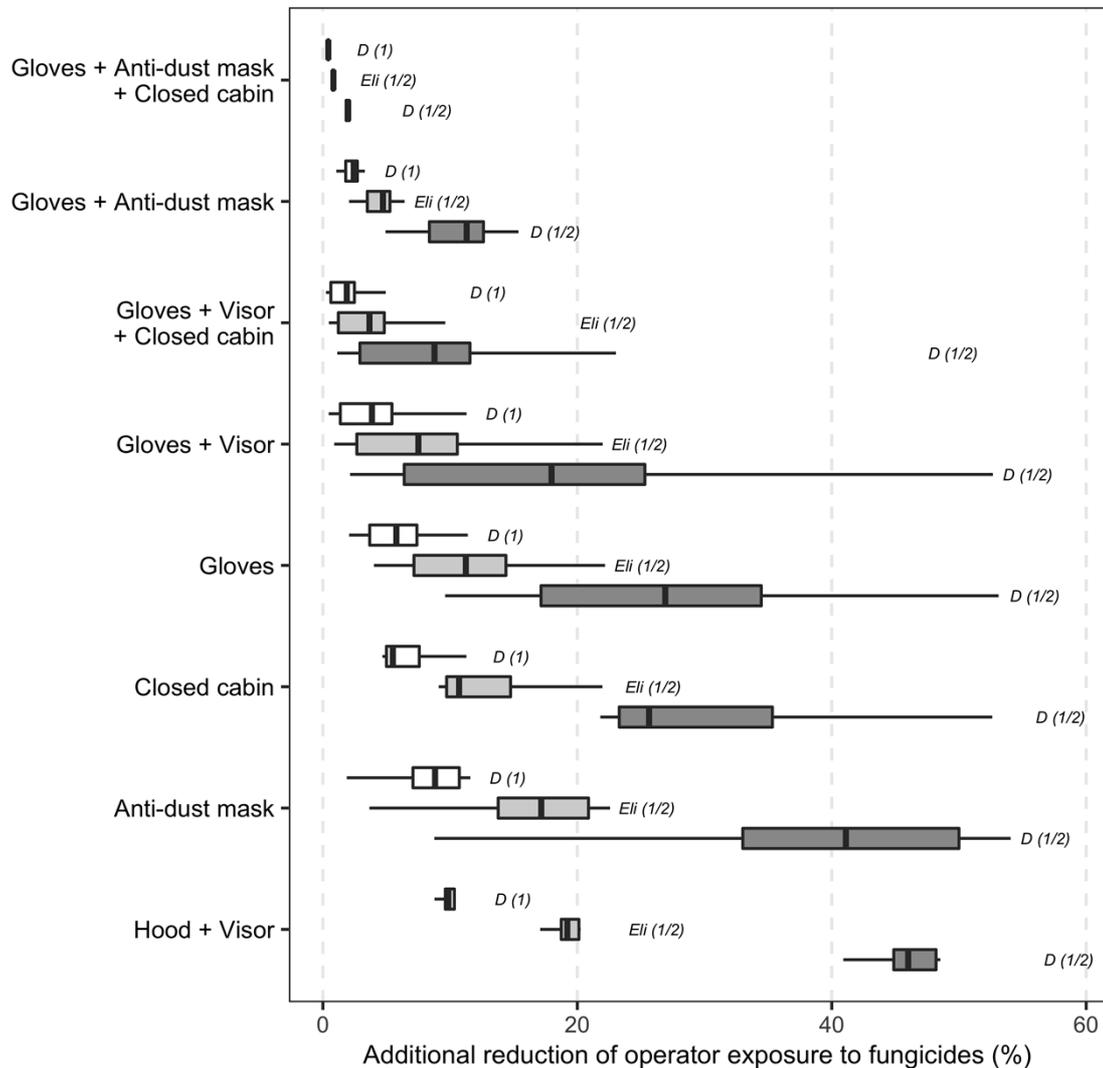


Figure 6.4: Additional reduction of operator exposure resulting from delayed first anti-GDM treatment combined with various operator protection scenarios, according to different GDM control strategies (*D (1)* = first application delayed until disease onset estimated by survival analysis + treatment applied every week; *D (1/2)* = same delay + treatment applied every two weeks; *Eli (1/2)* = first application delayed until disease onset estimated by probabilistic expert elicitation + treatment applied every two weeks).

## 6.4. Discussion

Our results show that postponing the fungicide spray against GDM until disease onset could reduce the number of GDM fungicide treatments by 56.0%, on average, relative to current agricultural practices in the Bordeaux region. In 2013, a mean of 10.1 fungicide applications were used to control GDM in Bordeaux vineyards, accounting for 44.3% of all pesticide applications (*Service de la Statistique et de la Prospection, 2016b*). Delaying the date of the first anti-GDM treatment until the appearance of the first symptoms would have eliminated a mean of 5.7 fungicide treatments, corresponding to 25.0% of all pesticide applications applied on average in this year. Some vine growers may be tempted to increase the frequency of

treatments if there is a delay in the date of the first anti-GDM spray. It is therefore possible that the frequency of treatment may increase to one treatment per week, but it is unlikely that the frequency of treatment will exceed this level, as the minimum persistence time for anti-GDM fungicides is at least seven days (*Chambre d'Agriculture du Tarn* et al., 2019). An increase in the treatment frequency partially offsets the benefit of the postponement of the first treatment on operators' exposure. However, we showed that, even with a frequency of one treatment per week, the triggering of first fungicide application at disease onset was still able to reduce operators' exposure compared to current practices.

Our estimations are consistent with the conclusion of Mailly et al. (2017), who showed, based on the results of a national survey over two growing seasons (2006 and 2010), that fungicide applications were halved if vine growers did not start applying fungicides until after May 15th. Based on an epidemiological model, Caffi et al. (2010) showed that the number of fungicide treatments could be reduced by 33 to 86%, with a median reduction of 54%, relative to standard practices in northern Italy, if fungicide spraying was delayed until an infection was predicted. In the same study, the authors showed that this strategy protected grape crops effectively against the disease. Menesatti et al. (2015) reported a similar decrease in fungicide applications for the delaying of the first fungicide treatment against GDM until predicted date of disease onset, associated with an efficient level of control of the pathogen.

We used the AOEM model (Großkopf et al., 2013), recommended by EFSA (European Food Safety Authority, 2014a), to assess operator exposure in various PPE scenarios. AOEM is an exposure model based on data collected from recent, representative and reproducible studies. Other exposure models, such as the UK POEM and German models, exist (Ross et al., 2015) but these models are based on old data, not representative of current agricultural practices, particularly for the use of different types of PPE by operators (European Food Safety Authority, 2014a). The AOEM model calculates dermal exposure of the body assuming that the operator is wearing normal work clothes, defined as at least one layer of work clothing completely covering the body, arms and legs (Großkopf et al., 2013) and a full-body PPE overall is not considered. This is a limitation of the model as the combination of gown and working overall tested by Thouvenin et al. (2017) may further reduce operators' exposure.

Our study is the first to compare the decrease in exposure yielded by the various types of PPE with that obtained by delaying the first GDM treatment. Furthermore, previous studies have focused on only a small number of molecules, such as dithiocarbamates, folpet, arsenic and spinosad, whereas we estimated the decrease in operator exposure to 14 molecules commonly used to control downy mildew in the Bordeaux region. We found that delaying the first anti-GDM treatment reduced operator exposure to several common active substances used against this vine disease to a greater extent than wearing some forms of PPE (gloves, hood with a visor and anti-dust mask) during mixing, loading and application. These results are consistent with those of Baldi et al. (2006) and Baldi et al. (2012), who showed that wearing PPE, such as gloves, did not significantly decrease operator exposure to dithiocarbamates (e.g. mancozeb) or folpet. Our results also show that the use of closed tractor cabin during pesticide application was not more protective than postponing the first GDM treatment for more than half of the considered substances. However, the highest levels of exposure reduction were obtained in scenarios combining PPEs and a delay of first GDM treatment.

Operator exposure to the pesticides used in viticulture is thought to affect the development of several diseases in this population, including cancers (Seidler et al., 2008; Viel and Challier, 1995), Parkinson's disease (Baldi et al., 2003a; Kab et al., 2018), and neurological problems (Baldi et al., 2011, 2003b), particularly in the vineyards of Bordeaux (Baldi et al., 2001). Mancozeb, one of the most widely used anti-GDM molecules in Bordeaux vineyards according to SSP survey results, is suspected to increase the risks of the operator developing leukemia, melanoma and Parkinson's disease (INSERM, 2013). The use of PPE is generally recommended to protect operators against the adverse effects of pesticides for human health. However, PPE is frequently used incorrectly or not at all (ANSES, 2014; Damalas and Abdollahzadeh, 2016), resulting in incomplete protection for operators (Baldi et al., 2006; Grillet et al., 2004; Lebailly et al., 2009). Moreover, several studies have highlighted the impact of pesticide exposure on residents in the surrounding area (Damalas and Eleftherohorinos, 2011; Kab et al., 2018), who cannot be protected by PPE. In this context, delaying the timing of the first anti-GDM fungicide application until disease onset could efficiently decrease the risks of exposure in residents. However, as GDM often occurs earlier in damp spring conditions than in dry springs, the decreases in the number of treatments and associated exposure probably vary from year to year.

The practicality of delaying the first fungicide treatment against GDM should be assessed in close collaboration with farmers and agricultural extension services. This strategy can be perceived as risky by some vine growers because the disease sometimes progresses quickly after disease onset. Few experiments have been conducted to evaluate the consequences of triggering a fungicide spray at the beginning of GDM. However, Menesatti et al. (2015) evaluated three strategies for the control of GDM in a two-year field experiment: no treatment, standard control strategy consistent with current farmer practices, and first fungicide spray at disease onset. Their results showed that triggering the first fungicide application at disease onset effectively controlled GDM and reduced the number of fungicide applications by almost half. When the first fungicide spray was applied at disease onset, the levels of disease incidence and severity on leaves and bunches were significantly reduced compared to untreated controls and were similar to those obtained with a standard control strategy. As the number of experimental studies is limited, it would be useful to confirm these results by carrying out new experiments covering various agricultural and environmental conditions.

Furthermore, the approach presented here could benefit from various tools, such as weekly alert bulletins regularly published in major vine-growing areas. These bulletins report forecasts of disease occurrence based on annual field surveys (Michel et al., 2017a). Climate and/or phenological indicators (Caffi et al., 2010; Kennelly et al., 2007) could also be used to estimate the date of GDM onset and to follow GDM outbreak evolution. Models outputs can be used to predict onset date and date of the first fungicide application (Menesatti et al., 2015). It may be possible to estimate the date of disease onset more precisely in the future, through the use of on-farm measurements collected by sensors on drones (Rieder et al., 2014) and systems for the detection of inoculum in the vineyard (Thiessen et al., 2016). The economic benefits of reducing the number of fungicide treatments remain to be assessed. The systematic use of fungicide treatments is a more effective solution for controlling GDM than

the use of biocontrol agents and resistant vine varieties (Dagostin et al., 2011; Pertot et al., 2017). However, in a context of growing concern about the impact of pesticides on the environment and human health, regulations on chemical pesticide use may become more restrictive in the future.

## **6.5. Materials and methods**

### **6.5.1. Dates of first fungicide treatment**

#### *SSP survey*

Pesticide use on vines in the Bordeaux region was surveyed by the Statistics and Foresight Department of the French Ministry of Agriculture (SSP) during the 2010, 2013 and 2016 growing seasons, on 606, 576 and 459 vineyards ( $n = 1641$ ), respectively. Information about product names, dates and rates of pesticide application were collected in each vineyard and the date of the first fungicide application to control downy mildew was determined for all vineyard\*year combinations.

#### *Survey conducted by the French Vine and Wine Institute*

In spring 2018, the French Vine and Wine Institute (*Institut Français de la Vigne et du Vin*, referred to hereafter as IFV) published an online questionnaire to collect data from vine growers on the timing of the first anti-GDM treatment applied. Vine growers in the Bordeaux region ( $n=94$ ) were asked to report the frequency of treatments against GDM for each 10-day interval between March 1 and July 31. The protocol of the farm survey was approved by the IFV to ensure that the data source is valid and that the data is used correctly and ethically. The responses received were used to plot histograms to determine likely dates of first treatment. A continuous probability distribution was fitted to each histogram with the *fitdist()* function of version 1.4.0 of the SHELF package (Oakley, 2018) of R (R Core Team, 2018) (version 3.3). The distribution yielding the best quality of fit was selected for estimation of the median date of first GDM spray for each vine grower.

### **6.5.2. Dates of GDM onset**

#### *Survival analysis*

Dates of GDM onset were estimated by analyzing epidemiological data collected from untreated plots in vineyards of the Bordeaux region. GDM incidence data were collected from 266 vineyards in the Bordeaux region from 2010 to 2017 by the technical staff of the IFV. In each vineyard, at least one untreated row of vine stocks was monitored for the detection of GDM symptoms. The number of vine stocks with GDM symptoms was determined by visual inspection. Visual observations stopped when the proportions of infected vine stocks and bunches were close to 100%. In total, 1 to 57 GDM incidence data were collected in each vineyard. Cox survival models (Cox, 1972) were fitted to estimate the dates at which the epidemiological threshold of 1% of vines infected was reached in the sample of untreated plot surveyed. The results obtained with the fitted Cox model were used to derive three distributions of dates of GDM onset: a common distribution for all years, and two separate distribution for years characterized by dry spring (rainfall in March-May  $< 1.51$  mm/day) and years with a wet spring (rainfall in March-May  $> 5.45$  mm/day), respectively. 95% confidence

intervals were computed from 1000 bootstrap samples. A full description of the statistical procedure is presented elsewhere (Chen et al., 2018a).

#### *Expert probabilistic elicitation*

Fifteen experts (technical advisors to vine growers) were individually asked to estimate the dates on which a threshold of 1% of vines displaying disease (i.e., GDM onset) would be reached in untreated plots in the Bordeaux region in 2017-2018. The experts were asked to assess the probability of the epidemiological threshold being reached for each 10-day interval between March 1 and July 31. Each participant gave a reply in the form of a histogram, according to the guidelines of the “roulette” method (Morris et al., 2014). Several probability distributions were then automatically adjusted to fit each histogram and the distribution giving the best fit was selected. Each elicitation was carried performed with MATCH Tool<sup>®</sup> (Morris et al., 2014) and with the *fitdist()* function of version 1.4.0 of the SHELF package (Oakley, 2018) of R (R Core Team, 2018) (version 3.3). This procedure was applied by each expert, each year, between April 15 and May 15, generating one distribution of dates of GDM onset per expert\*year combination.

### **6.5.3. Number of fungicide treatments**

For each distribution of first dates of anti-GDM treatment or of disease onset dates, we calculated a mean number of fungicide sprays in vineyard of the Bordeaux region. Each date distribution was used to define a distribution of the probability of applying the first GDM fungicide for each week. The number of weeks for which this probability was calculated differed between date distributions, between cw 12 (mid-late March) and cw 33 (mid August).

Based on each probability distribution, the mean number of fungicide applications against GDM in the Bordeaux vineyards was calculated as

$$NT = \sum_{t_i = t_S}^{t_f} \omega_{t_i} (t_F - t_i) F$$

where  $t_i = t_S, t_S + 1, \dots + t_E$  is the week of the first treatment (based on the distributions of dates of first GDM application and disease onset, estimated as explained above),  $t_F$  is the week of the last treatment,  $\omega_{t_i}$  is the proportion of vineyards in which fungicide treatment begins on date  $t_i$ , and  $F$  is the treatment frequency, in weeks. The values of  $\omega_{t_i}$  were calculated from the probabilistic distributions.

Computation derived from current practices in Bordeaux vineyards were made using a value of  $F$  based on local practices; according to national reports on fungicide use in French vineyards, vine growers apply fungicide every two weeks on average, i.e.  $F = 1/2$  (Service de la Statistique et de la Prospection, 2016b). Some farmers may be tempted to increase the frequency of treatments if there is a delay in the date of the first anti-GDM spray. To estimate the impact of an increase in treatment frequency, two other values of  $F$ ,  $F = 1$  (one treatment per week) and  $F = 7/10$  (one treatment every 10 days), were used to calculate the values of  $NT$  derived from the survival analysis and expert elicitation. It is unlikely that the frequency

of treatment will exceed one per week, as the minimum persistence time for anti-GDM fungicides is at least seven days (*Chambre d'Agriculture du Tarn et al.*, 2019).

#### **6.5.4. Assessment of operator exposure to fungicides**

##### *AOEM model*

The AOEM model is a statistical model developed by Großkopf et al. (2013) for the prediction of agricultural operator exposure in treatment scenarios representative of current agricultural practices in EU member states (Großkopf et al., 2013). Operator exposure (in mg per kg of body weight per day) corresponds to the exposure of a professional operator during a whole working day spent mixing, loading and applying. The exposure due to the rinsing of the containers or vessels and the cleaning and maintenance of the equipment is also taken into account.

Inhalation, head, 'inner' body (i.e. exposure of the body in the absence of special personal protective equipment, PPE, use but with normal work clothes), 'total' body (i.e. sum of inner and outer body exposure), protected hand and unprotected hand exposure are modeled separately with log-linear equations in the form of  $\log(X) = \alpha \log(A) + \sum[F_i]$  where  $X$  is the exposure value (in mg per kg of body weight per day),  $A$  is the total amount of active substance used per operator per day and  $F_i$  is a set of categorical factors. The final form of the equation for each term depends on the pesticide mixing/loading and application scenarios considered.

Terms relating to dermal exposure (including the head, body and hand terms) and inhalation are used for the calculation of dermal exposure ( $DE_O$ ) and inhalation exposure ( $IE_O$ ) to an active substance, respectively. The assessment of  $DE_O$  and  $IE_O$  also takes into account absorption through the skin or by inhalation (according to the term assessed) of the active substance, the default body weight of the operator (i.e. 60 kilograms) and a risk mitigation factor corresponding to the use of PPE (if indicated). The model then estimates overall operator exposure (in mg per kg of body weight per day) as the sum of  $DE_O$  and  $IE_O$ .

Based on new exposure datasets from 34 unpublished studies (Großkopf et al., 2013), the AOEM model is representative of current agricultural practices, including PPE use, in EU member states (European Food Safety Authority, 2014a). Furthermore, the selection of these 34 studies was transparently explained, making the outputs of the model reproducible. The European Food Safety Authority considered this exposure model to be suitable for inclusion in the EFSA guidelines and in its exposure calculator (European Food Safety Authority, 2014a). All calculations and model equations were included in the exposure calculator spreadsheet provided by EFSA (European Food Safety Authority, 2014a). This calculator is an electronic tool that uses the input provided to assess the exposure of operators, workers, residents and bystanders for each application scenario chosen (European Food Safety Authority, 2014a). The "Operator Outdoor Spray AOEM" section of this calculator (in which the AOEM model of Großkopf et al. (2013) is implemented) was used to assess operator exposure to the main active substances used to control GDM in the Bordeaux region according to different protection scenarios, as described below.

### **6.5.5. Main active substances used in Bordeaux vineyards against GDM**

Usage frequencies of the most common fungicides applied to control GDM in the Bordeaux region were calculated from the SSP surveys. Each fungicide product was characterized in terms of the mean number of sprays in a given vineyard and the number of vineyards in which it was used during each of the growing seasons surveyed (2010, 2013 and 2016).

The composition of each fungicide (i.e. names of active substances and amount of each molecule in the fungicide) was obtained from the ANSES E-Phy database (ANSES, 2019). Substances and fungicide products were paired, and the number of applications of each pair in the region was calculated by multiplying the mean number of treatments with the fungicide by the number of vineyards receiving these treatments.

The total number of treatments containing each active substance was calculated by summing the number of applications of the pairs containing the substance. The 14 most frequently used substances and substance\*product combinations were selected (Table 6.1).

### **6.5.6. Operator protection scenarios**

Operator exposure to each selected molecule was calculated for nine scenarios involving different combinations of PPE: i.e. gloves, face shield (referred to as a "visor" in the model options) worn with a hood, and anti-dust masks (FP2, P2 or similar type), during mixing, loading and application of the pesticide (Table 6.2). The closure of the tractor cabin door during pesticide application was simulated in three of these scenarios. A scenario with no PPE was also simulated. Each scenario was simulated for the 14 most frequently used substance\*product combinations. In total, 126 simulations were performed in the "Operator Outdoor Spray AOEM" section of the EFSA calculator (Annexe H).

Exposure assessments were used to calculate the decrease in exposure resulting from the use of each item of PPE individually or in combination as  $RED_i = \frac{(E_0 - E_i)}{E_0}$ , with  $E_0$  operator exposure estimated for the scenario without PPE and  $E_i$  operator exposure estimated for the scenario involving the PPE or combination of PPE  $i$ .

Decreases in exposure due to the use of combinations of PPE were combined with those resulting from delaying the first fungicide treatment until disease onset, to assess the total reduction of exposure as  $RED_{ij} = 1 - (1 - RED_i)(1 - RED_j)$ , where  $RED_i$  is the reduction resulting from using the  $i^{th}$  combination of PPE,  $RED_j$  is the reduction resulting from delaying the first anti-GDM treatment until the date of disease onset estimated with the  $j^{th}$  estimation method (i.e. early or late expert probabilistic elicitation, null Cox model or Cox model including weather cofactors).

*Impact d'un report de la date de la première intervention sur le nombre de traitements et sur l'exposition des opérateurs*

*Table 6.1: Main active substances, their associated fungicide products and maximum authorized sprayed quantity of each active substance used in each product used in the Bordeaux region to control GDM. The maximum permitted doses of pesticide were considered to compute the amounts of active substance used by an operator.*

| Active substance name  | Fungicide name   | Maximum authorized quantity of active substance during one treatment (in kg per ha) |
|------------------------|------------------|---|
| Ametoctradin           | ENERVIN          | 0.3   |
| Benalaxyl-M            | SIDECAR          | 0.1   |
| Copper compounds       | HELIOCUIVRE      | 1.94  |
| Cyazofamid             | MILDICUT         | 0.112   |
| Cymoxanil              | VALIANT FLASH    | 0.12  |
| Dimethomorph           | FORUM TOP        | 0.225   |
| Disodium phosphonate   | MILDICUT         | 1.12  |
| Fluopicolide           | PROFILER         | 0.133   |
| Folpet                 | EPYLOG FLASH     | 1.5   |
| Fosetyl                | EPYLOG FLASH     | 1.5   |
| Mancozeb               | SIDECAR          | 1.62  |
| Mandipropamid          | PERGADO F PEPITE | 0.125   |
| Metalaxyl-M            | RIDGOLD F        | 0.097   |
| Metiram                | ENERVIN          | 1.1   |
| Potassium phosphonates | LBG-01F34        | 2.92  |

Table 6.2: Operator protection scenarios involving PPE use and a closed tractor cabin.

| Scenario ID | Mixing and loading |                          | Application |                          |              |
|-------------|--------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|--------------|
|             | Gloves             | Head and respiratory PPE | Gloves      | Head and respiratory PPE | Closed cabin |
| 1           | Yes                | Anti-dust mask           | Yes         | Anti-dust mask           | Yes          |
| 2           | Yes                | Hood and visor           | Yes         | Hood and visor           | Yes          |
| 3           | No                 | None                     | No          | None                     | Yes          |
| 4           | Yes                | Anti-dust mask           | Yes         | Anti-dust mask           | No           |
| 5           | No                 | Anti-dust mask           | No          | Anti-dust mask           | No           |
| 6           | Yes                | Hood and visor           | Yes         | Hood and visor           | No           |
| 7           | No                 | Hood and visor           | No          | Hood and visor           | No           |
| 8           | Yes                | None                     | Yes         | None                     | No           |
| 9           | No                 | None                     | No          | None                     | No           |

### **Acknowledgments**

We thank the French Wine and Vine Institute (*Institut Français de la vigne et du vin*) and its technical partners for collecting data and allowing us access to these data and to the EPICure web platform (<https://www.vignevin-epicure.com>). This work received funding from the French Ministry of Agriculture (reference: CAS DAR, SMART-PIC project), the Institut Carnot Plant2Pro (project L-i-cite) and the Bordeaux Vine Council (CIVB). This work is part of the #DigitAg project (ANR-16-CONV-0004). It is supported by a public grant overseen by the French National Research Agency (ANR) as part of the “*Investissements d’avenir*” program (reference: ANR-10-EQPX-17 – *Centre d’accès sécurisé aux données – CASD*).

### **Author contributions**

M.C., F.B., M.R. and D.M. framed the study. M.C. and D.M. performed statistical analyses of data. All authors interpreted the results. M.C. and D.M. wrote the paper; F.B. and M.R. have approved the submitted version.

### **Competing Interests statement**

The authors declare no competing interests.

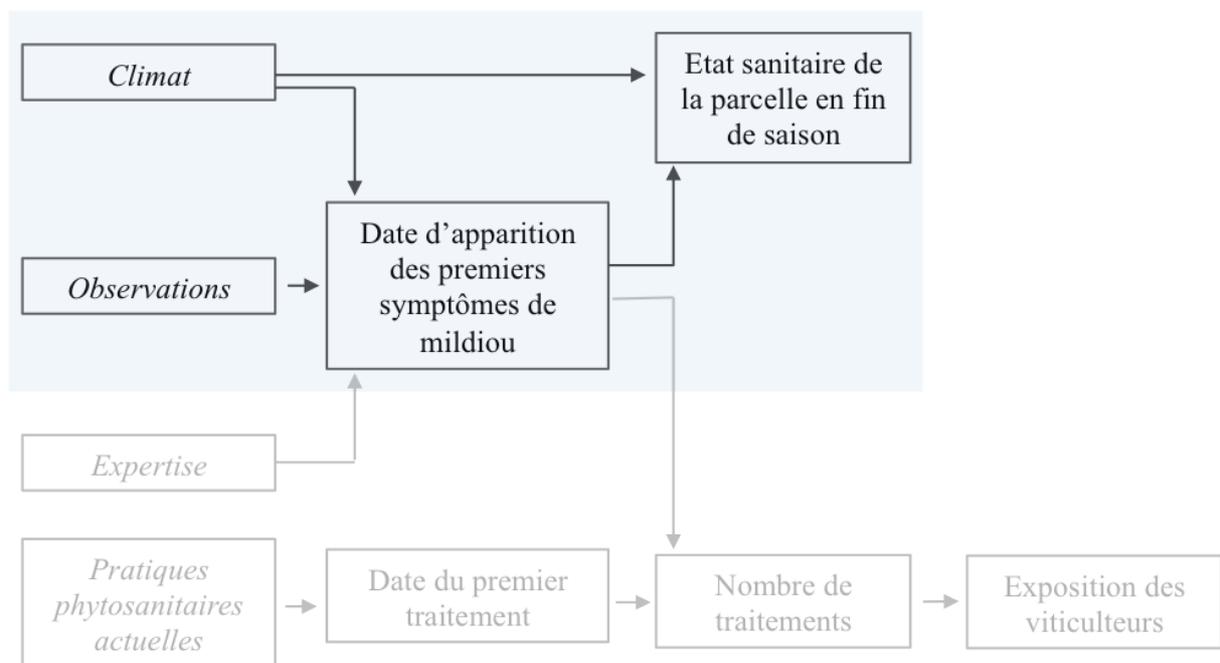


## **Chapitre 7. Impact de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou et du climat sur l'état sanitaire d'une parcelle en fin de saison**

Ce chapitre est un projet d'article soumis à la revue *PLoS ONE*.

Il présente l'étude de l'impact de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou et du climat au printemps sur l'incidence et la sévérité du mildiou sur feuilles et grappes à la mi-août.

Ce chapitre est accompagné d'une analyse complémentaire concernant la qualité d'imputation de la date d'apparition du mildiou de la vigne (voir Complément au Chapitre 7).



## **Résumé**

*Contexte* – La modélisation épidémiologique fait partie intégrante du schéma décisionnel de traitement, notamment dans la lutte contre le mildiou de la vigne. Elle permet d'identifier les périodes favorables au développement de la maladie et délivre des informations prévisionnelles qui étayent la prise de décision.

*Questions de recherche* – Les questions traitées dans ce chapitre sont :

- Peut-on anticiper l'état sanitaire d'une parcelle en fin de saison à partir de la date d'apparition des premiers symptômes et de variables climatiques observées ?
- Cette prévision peut-elle être utilisée en début de saison pour raisonner l'usage des traitements anti-mildiou ?
- Quelles sont les conséquences d'une variation de température et de précipitations durant le printemps sur le risque de forte attaque de mildiou en fin de saison ?

*Matériel et méthodes* – Entre 2010 et 2018, l'état sanitaire de 151 sites-années du Bordelais a été suivi hebdomadairement jusqu'au mois d'août. Plusieurs types de mesures ont été réalisées : incidence du mildiou sur feuilles, sévérité sur feuilles, incidence sur grappes et sévérité sur grappes. Pour chaque mesure, différents modèles (modèles binomiaux, régression LASSO) et algorithmes de *machine learning* (*gradient boosting*, *random forest*) ont été développés afin d'estimer la probabilité que la valeur de la dernière observation soit supérieure à la médiane régionale. La date d'apparition du mildiou issue des données d'épidémiosurveillance et plusieurs indicateurs climatiques dérivés des données SAFRAN ont été utilisés pour décrire la variabilité des épidémies de mildiou en fin de saison. Le risque de forte attaque de mildiou en fin de saison a été estimé pour différents scénarios climatiques.

*Résultats* – Les résultats de cette étude montrent que les algorithmes de *gradient boosting*, *random forest* et la régression LASSO incluant la date d'apparition et les variables climatiques prédisent le mieux la probabilité de forte attaque de mildiou. Les modèles binomiaux incluant seulement la date d'apparition présentent une qualité prédictive similaire. Nous montrons que dans le Bordelais, les prévisions de ces modèles peuvent être utilisées dans le raisonnement des traitements contre la maladie, entraînant une réduction de plus de 50 % des traitements anti-mildiou par rapport aux pratiques actuelles. Les prévisions des modèles « climatiques », c'est-à-dire ceux incluant seulement les variables climatiques, montrent qu'une diminution des précipitations et une augmentation des températures en avril et en mai réduit la probabilité que l'incidence (la sévérité) de mildiou soit supérieure à la médiane régionale en fin de saison.

*Conclusion* – Les prévisions des modèles développés dans cette étude ont plusieurs implications pratiques. Elles peuvent être utilisées pour anticiper l'état sanitaire d'une parcelle en fin de saison et ainsi, adapter la lutte fongicide au risque de forte attaque de mildiou.

**Mots clés :** Mildiou de la vigne, indicateur, état sanitaire, raisonnement des traitements, *machine learning*.

## **Forecasting severe grape downy mildew attacks using machine learning**

### **Authors**

Mathilde Chen<sup>1,4</sup>, François Brun<sup>2</sup>, Marc Raynal<sup>3</sup>, David Makowski<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> ACTA, INRA, UMR Agronomie, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval Grignon, France

<sup>2</sup> ACTA, INRA, UMR AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France

<sup>3</sup> IFV, Bordeaux Nouvelle Aquitaine. UMT SEVEN, 71 Avenue E Bourlaux 33882 Villenave d'Ornon Cedex

<sup>4</sup> INRA, UMR Agronomie, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval Grignon, France

<sup>5</sup> CIRED, 45bis Avenue de la Belle Gabrielle, 94130 Nogent-sur-Marne, France

**Corresponding author:** M. Chen

**E-mail:** [mathilde.chen@acta.asso.fr](mailto:mathilde.chen@acta.asso.fr)

### **7.1. Abstract**

Grape downy mildew (GDM) is a major disease of grapevine that has an impact on both the yields of the vines and the quality of the harvested fruits. The disease is currently controlled by repetitive fungicide treatments throughout the season, especially in the Bordeaux vineyards where the average number of fungicide treatments against GDM was equal to 10.1 in 2013. Reducing the number of treatments is a major issue from both an environmental and a public health point of view. One solution would be to identify vineyards that are likely to be heavily attacked in spring and then apply fungicidal treatments only to these situations. In this perspective, we use here a dataset including 9 years of GDM observations to develop and compare several generalized linear models and machine learning algorithms predicting the probability of high incidence and severity in the Bordeaux region. The algorithms tested use the date of disease onset and/or average monthly temperatures and precipitation as input variables. The accuracy of the tested models and algorithms is assessed by year-by-year cross validation. LASSO, random forest and gradient boosting algorithms show better performance than generalized linear models. The date of onset of the disease has a greater influence on the accuracy of forecasts than weather inputs and, among weather inputs, precipitation has a greater influence than temperature. The best performing algorithm was selected to evaluate the impact of contrasted climate scenarios on GDM risk levels. Results show that risk of

GDM at bunch closure decreases with reduced rainfall and increased temperatures in April-May. Our results also show that the reasoning of fungicide treatments according to local characteristics would reduce the number of treatments against GDM in the Bordeaux vineyards compared to current practices by at least 50%.

## **7.2. Introduction**

Downy mildew is one of the most severe diseases of grapevines (*Vitis vinifera*). *Plasmopara viticola*, the pathogen responsible of this disease, is a heterothallic oomycete (Wong et al., 2001). In autumn, winter eggs, called oospores, are produced. They overwinter in infected leaves, fallen to the vineyard ground (Dubos, 2002). In spring, they germinate as macrosporangium, which releases zoospores (Dubos, 2002; Gessler et al., 2011). Zoospores are disseminated through rain splashes to young vines organs (leaves, flowers or young bunches), where they germinate and penetrate through stomata, causing primary infection after 7 to 10 days of incubation (Gessler et al., 2011). Sporangia, borne by sporangiophores, then emerge from affected host tissues. They are spread with wind and rain splashes to green parts of grapes, where they release new zoospores from asexual reproduction, which can then infect healthy tissues (secondary infection). *P. viticola* damages on flowers and bunches lead to yield losses (Dubos, 2002). Leaves damage also induce a reduction in the sugar content, which induces a decline in the grapes quality (Jermini et al., 2010).

For economic and health crop reasons, applying fungicide treatment remains a very common practice to control grape downy mildew (GDM) (Pertot et al., 2017). Several resistant varieties were developed (Lacombe et al., 2011), but they are still not used for the production of most of the more profitable wines, due to appellation regimes' specifications. Many microorganisms and botanicals were tested as an alternative to synthetic chemical fungicides (Dagostin et al., 2011; Ghule et al., 2018; Liang et al., 2016; Zhang et al., 2017), but most of them have not yet been developed for commercial purposes (Pertot et al., 2017), mainly because of their low and unsteady efficacy in the vineyards.

Currently, many growers start spraying fungicides early in spring, and fungicide applications are then frequently repeated, about every two weeks in the Bordeaux region, a major vine producing area (Service de la Statistique et de la Prospection, 2015b). A large number of fungicide treatments are therefore applied over the course of the growing season, with implications for people living around vineyards health (Kab et al., 2017), grape growers' health (Baldi et al., 2011, 2001; Viel and Challier, 1995), air (Shunthirasingham et al., 2010), soil (Imfeld and Vuilleumier, 2012) and water (Morrissey et al., 2015) contamination, and entailing high production costs (Butault et al., 2010). In 2013, an average of 18.5 pesticide sprays were applied in Bordeaux vineyards, 52% of which were used to control GDM (Service de la Statistique et de la Prospection, 2015b).

Predictions of disease outbreak can assist farmers in decision-making for crop protection. Such predictions can be integrated into Decision Support Systems (Rossi et al., 2014) or warning systems (Caffi et al., 2010). They could potentially be used in spring to estimate the incidence and severity of GDM at the end of the season. Based on model forecasts, growers could trigger fungicide applications only when the risk of GDM is high, avoiding unnecessary sprays. Models based on weather inputs can also be used to deal with more long term issues, for example to forecast GDM outbreaks under different climate conditions and assess the potential severity of the disease in the future.

In the past, several approaches were used to predict GDM epidemics. Historically, statistical models were first developed in Germany (Hill, 2000), France (Magnien et al., 1991; Stryzik,

1983; Tran Manh Sung et al., 1990), Switzerland (Blaise and Gessler, 1992), Italy (Orlandini et al., 1993) and Australia (Magarey et al., 1991). Statistical models are simple to implement and they are able to predict complex systems, without explicating all functional mechanisms (Thakur, 1991). Mechanistic models differ from traditional statistical models because their structure makes explicit hypotheses about the biological mechanisms that drive infection dynamics (Lessler and Cummings, 2016). Such models were also developed to dynamically predict primary infections of *P. viticola* (Rossi et al., 2008b). Machine learning algorithms are also used for plant disease detection and crop protection (Jha et al., 2019; Liakos et al., 2018). Machine learning models provide predictions of outcomes of complex mechanisms by relating outputs to inputs using very flexible algorithms (Baker Ruth E. et al., 2018). Vercesi et al. (Vercesi et al., 2000) used such algorithms to estimate ability of *P. viticola* oospores to germinate.

Models performance depends on the model equations, on the accuracy of the parameter estimates, and on inputs used in the model. Since GDM development is influenced by several weather conditions such as rainfall and temperatures (Rossi et al., 2008a, 2002; Rossi and Caffi, 2007; Rouzet and Jacquin, 2003), climatic variables are frequently used in predictive models (Caffi et al., 2009; Hill, 2000; Menesatti et al., 2015; Rossi et al., 2008b). Other input variables can be included in predictive models, such as crop cultivar or soil type. Field observations can also be used as input data for predictive models, e.g. in Savary et al. (Savary et al., 2009) and Delière et al. (Laurent Delière et al., 2015). However, data collection can be time consuming and costly.

In this study, we develop different statistical and machine learning models to predict the risk of high GDM incidence or severity on leaves and bunches at the end of the season, in untreated Bordeaux vineyards. The models tested are generalized linear models (Nelder and Wedderburn, 1972), regularized regression models (LASSO) (Tibshirani, 1996), and two machine learning algorithms, i.e. gradient boosting (Friedman, 2002) or random forests (Breiman, 2001). These models are implemented with three sets of inputs, namely field scouting observations, climate inputs, and both types of inputs. Model performances are assessed by cross-validation using a large dataset of observations collected during 9 years in 151 vineyards in the Bordeaux regions. The most accurate models are then used to evaluate the potential reduction in the number of fungicide treatments achieved when model outputs are used to trigger fungicide applications. We also use our models to determine the impact of temperature increases and changes in precipitation on future GDM outbreaks.

### **7.3. Material and methods**

#### **7.3.1. Data**

Grape downy mildew (GDM) incidence and severity data were collected in 156 site-years located in the Bordeaux regions from 2010 to 2018 by the French vine and wine extension service (*Institut Français de la Vigne et du Vin*, IFV). Each monitored site-year consisted in an untreated row of vines including from 3 to 165 plants and further referred to as “plot”. Each untreated row was surrounded by two other untreated rows, to ensure that they were not unintentionally sprayed with fungicide. In the monitored central row, weekly visual inspections were performed on grape stocks, leaves and bunches in order to assess disease

incidence and severity. The proportion of vine stocks, leaves and bunches displaying symptoms (incidence) and the average percentages of leaves and bunches necrotic area (severity) were recorded. In total, 1 to 57 visual inspections were conducted in each vineyard. Observations were conducted from budburst (i.e. week 12, late March) until at least bunch closing (i.e. week 29, mid July) or stopped when the proportions of infected vine stocks and bunches were close to 100%. Contrasted outbreaks were observed between 2010 and 2018 seasons. For example, the median disease incidence on leaves was close to 0% and reached 90.1% in 2011 and 2018, respectively (Figure 7.1.A).

Dates of GDM onset were estimated by analyzing incidence data on vine stocks. GDM onset was defined as the first week in which the proportion of infected vines stocks exceeded 1%. This date was estimated for each plot by survival analysis in order to deal with censored data (Chen et al., 2018b). Censored GDM onset dates were found in 97 plots (right censored: 40.2%, left censored: 38.1% and interval censored: 21.7%). Censored data were imputed by a semi-parametric survival model (Anderson-Bergman, 2017b) including the average rainfall between March and June as covariate (Chen et al., 2018b). Between 2010 and 2018, GDM onset date varied across years. For example, less than 25% on the monitored plots displayed symptoms by week 23 (i.e. early-mid June) in 2010, 2011 and 2016, whereas 100% of the plots were infected at this date in 2014, 2015 and 2018 (Figure 7.1.B).

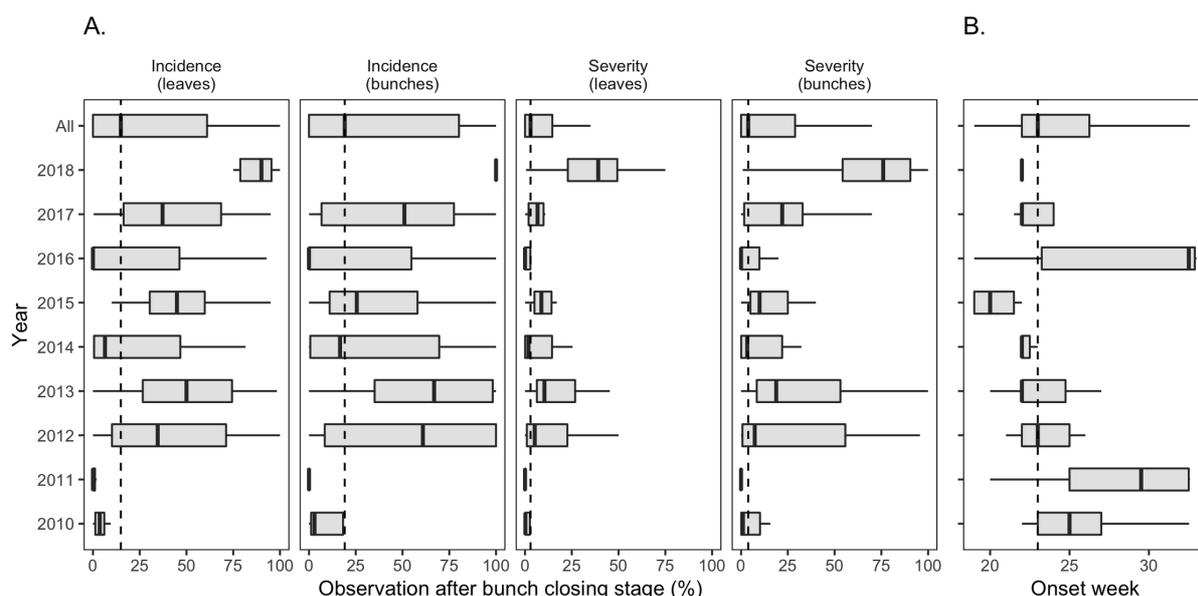


Figure 7.1: Grape downy mildew (GDM) severity data on leaves after bunch closing (A) and imputed disease onset dates (B) in 151 untreated plots. Median contamination levels and median disease onset date are represented by vertical dotted lines.

Climatic variables were computed from the SAFRAN database, produced by the French national meteorological service (*Météo-France*). SAFRAN data covers France in the form of an 8 by 8 km grid (Le Moigne, 2002). For each plot and each year, mean amount of rainfall (in mm day<sup>-1</sup>) and mean temperature (in °C) were calculated in March, April, May and June from the weather data of the grid cell including the considered plot (Figure 7.2). Data used in this study are summarized in Supporting information (see Annexe K).

*Impact de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou et du climat sur l'état sanitaire d'une parcelle en fin de saison*

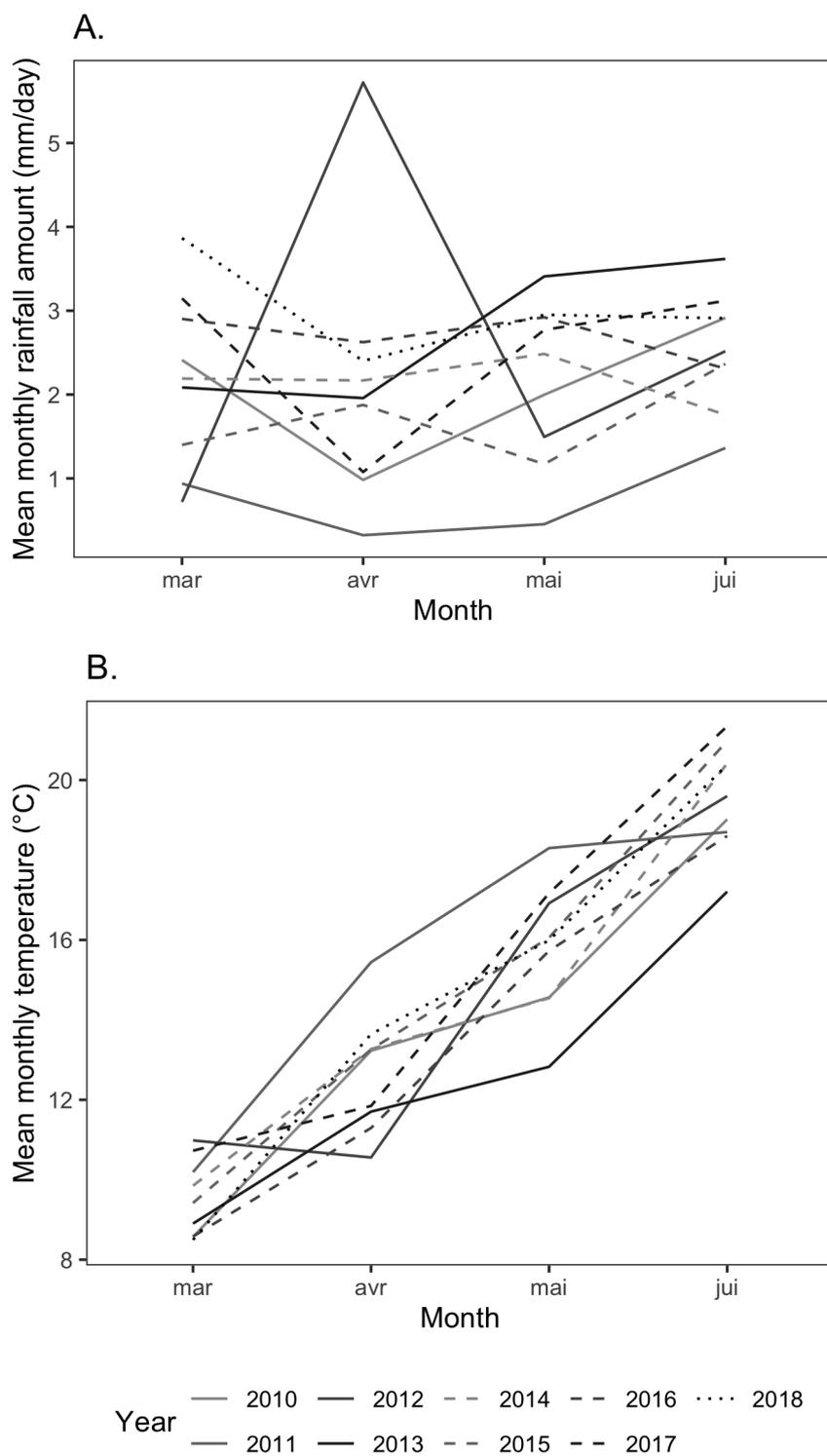


Figure 7.2: Mean monthly rainfall amount (A) and temperature (B) in March, April, May and June during the 2010 - 2018 period in the 151 untreated monitored plots.

### **7.3.2. Models predicting occurrence of high levels of disease incidence and severity**

Different models were considered to calculate the probability to reach a high level of contamination at bunch closing stage, i.e. higher than the median value reported in the dataset. Four types of output were considered in turn, i.e., incidence on leaves, incidence on bunches, severity on leaves and severity on bunches. For each output, four types of models were developed in the version 3.5.1 of the statistical software R (R Core Team, 2018) and compared to predict occurrence of high level of GDM (i.e., higher than median): generalized linear models (binomial-logit models), further denoted as GLM (Nelder and Wedderburn, 1972), LASSO regression (Tibshirani, 1996), random forest (Breiman, 2001) and gradient boosting (Friedman, 2002). Depending on the considered output, the predictions returned by these models correspond to predicted probabilities of high levels of incidence or severity of GDM on leaves or on bunches.

Three binomial-logit models were developed: one model including a single input i.e., disease onset date, one model taking into account weather inputs, and one model including both disease onset date and weather variables as inputs. The models were fitted to data using the `glm` R function. The most relevant inputs of the last two models were selected using a stepwise procedure based on the Akaike criterion (AIC) implemented with the R function `stepAIC` from the MASS R package, version 7.3 (Venables and Ripley, n.d.).

LASSO regression, random forest and gradient boosting were first fitted using weather inputs only, and then using both weather inputs and the GDM onset date. LASSO regression (implemented here with a logit link) is a special type of regression model fitted using a penalty term shrinking regression coefficients towards zero. Here, this model was fitted with the version 2.0 of the R package `glmnet` (Friedman et al., 2010) and the most relevant model inputs were selected by cross-validation using the R function `cv.glmnet`. Random forest and gradient boosting are ensemble learning algorithms; they are based on the combination of multiple learning simple algorithms to improve prediction performance. Random forest is a bagging method developed by Breiman (2001). The algorithm builds an ensemble of 100 independent deep decision trees from bootstrapped samples. Deep trees have the properties to have low bias but high variance, and when combined together, produce an output with lower variance. In the case of gradient boosting, an ensemble of 100 successive shallow trees are built, such as each new tree predicts the residuals of the previous one. Random forest and gradient boosting were fitted using the R packages `ranger`, version 0.11.2 (Wright and Ziegler, 2017) and `gbm`, version 2.1.5 (Ridgeway, n.d.) to predict occurrence of high levels of GDM.

### **7.3.3. Model assessment and sensitivity analysis**

The ability of the fitted models to predict occurrence of high level of GDM was assessed by ROC analysis (Barbottin et al., 2008; Makowski et al., 2009). A separate ROC analysis was conducted for each output and each model separately. The 151 plots were divided into two subgroups depending on whether the final disease observation ( $Y$ ) was above the median value ( $Y_t$ ) or less than or equal to this threshold. The probability of high level of GDM was then estimated by each model for each plot in each subgroup. Let  $I$  denote the prediction of a given model in a given plot, i.e., the predicted probability of high level of GDM in a given

plot. Each value of  $I$  was compared with a decision threshold  $I_t$ . The results were used to determine the true positive proportion (TPP) (number of plots with  $I > I_t$ , in the subgroup defined by  $Y > Y_t$  divided by the total number of plots in this subgroup) and the true negative proportion (TNP) (number of plots with  $I \leq I_t$ , in the subgroup defined by  $Y \leq Y_t$  divided by the total number of plots in this subgroup). TPP and TNP are estimates of  $P(I > I_t | Y > Y_t)$  and  $P(I \leq I_t | Y \leq Y_t)$  and are referred to as “sensitivity” and “specificity”, respectively. The ROC curve of model is a graphical plot of sensitivity against  $1 - \text{specificity}$ . The values of TPP and TNP are calculated by allowing the decision threshold ( $I_t$ ) to vary over the range of its possible values. A ROC curve that passes close to the point (0, 1) shows that the model gives satisfactory results in terms of sensitivity and specificity. A choice can thus be achieved by using the model with an appropriate choice of the decision threshold. A ROC curve that passes close to a straight line joining the points (0, 0) and (1, 1) shows that the model is non-informative (i.e. no better than a random decision).

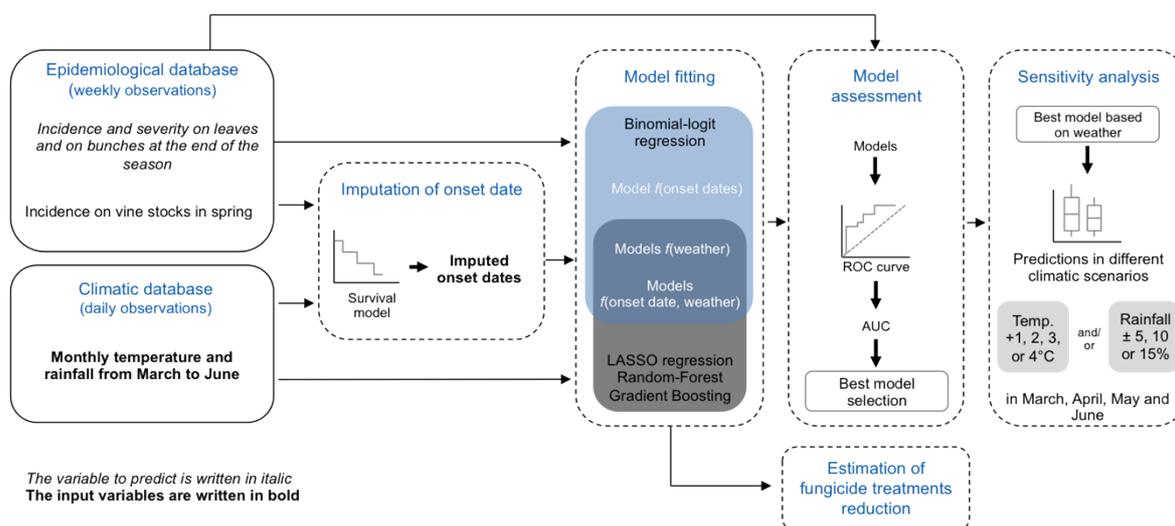
A useful summary of the overall accuracy of a model is the area under the ROC curve (AUC). AUC is expected to be equal to 0.5 for a non-informative model, and to 1 for a perfect model. TPP and TNP values were used to compute the sensitivity, specificity, and AUC for each output variable and each model. The computations were performed using the pROC (Robin et al., 2011) package of the version 3.5.1 of R statistical software.

For machine learning algorithms, inputs were ranked according to their importance. For random forests, the importance corresponds to the increase in the misclassification frequency after random permutations of the values of each input. The variables leading to the largest average increase of misclassification frequency are considered most important (Breiman, 2001). For gradient boosting algorithms, the average improvement of the loss function (generally the MSE for regression or the deviance for classification) made by each variable is computed. The variables with the largest average improvement, i.e. the relative influence, are considered most important (Friedman, 2002).

A sensitivity analysis was conducted to explore the potential consequences of an increase of temperature and/or of a change in rainfall. The best model among the models including weather input variables (i.e., the model with the highest AUC) was used to compute the probability of high levels of GDM according to different climatic scenarios. The original temperature data were increased by  $+1^\circ\text{C}$ ,  $2^\circ\text{C}$ ,  $3^\circ\text{C}$  or  $4^\circ\text{C}$ , successively. Rainfall was increased by  $+5\%$ ,  $10\%$  or  $15\%$ , and then decreased by the same levels. All combinations of temperature and rainfall changes were considered. The selected model was run using each climate scenario.

A graphical summary of the modeling framework is presented in Figure 7.3

Figure 7.3: Illustration of the modeling framework implemented in this study.



### 7.3.4. Number of fungicide treatments

The probability of severe attack was estimated for each plot as a function of the GDM onset date using the GLM model. We calculated the number of fungicide treatments against GDM resulting from the use of model output (i.e., predicted probability of high GDM) to trigger treatments. To do so, we assumed that fungicide treatments were applied only in plots where the probability of severe attack was higher than a predefined threshold and that vine growers apply fungicide every two weeks after the first treatment until late August (week 35) (Service de la Statistique et de la Prospection, 2016b). Several probability thresholds in the range 0-1 were considered successively, and the resulting number of treatments was calculated for each threshold and each plot. The average number of treatments over plots was finally calculated for each probability threshold. This number was compared to the mean number of GDM fungicide treatments applied in 2010 and 2013 according to the results of a survey conducted by the French Ministry of Agriculture's Statistics and Prospective Service (SSP) (Service de la Statistique et de la Prospection, 2015b).

## 7.4. Results

### 7.4.1. Ability of the models to distinguish between high and low levels of disease

The best models according to AUC are those including the full set of inputs i.e., both climate variables and the date of disease onset (Figure 7.4). The highest AUC (0.87) is obtained with gradient boosting for incidence on leaves. For the three other outputs, i.e. leaves severity, bunches incidence and bunches severity, the AUC values of the best models were between 0.76 and 0.84.

Model performances are decreased when climate variables are omitted for predicting incidence and severity, but the AUC always remains very close to or slightly higher than 0.75 for all outputs. The omission of the date of disease onset from the set of inputs has a strong

impact on the performance of the models. However, when this variable is omitted, the AUC of best models remains higher than 0.70 for incidence on bunches and is even higher than 0.75 for incidence on leaves (AUC = 0.77). The decrease of AUC resulting from the omission of the date of disease onset is stronger for severity on leaves and for severity on bunches for which the best AUC values are lower than 0.70 (0.67 and 0.65, respectively) (Figure 7.4).

Considering the models including climate inputs only (second row of Figure 7.4), gradient boosting shows the best performance for three of the four outputs (incidence on leaves, incidence on bunches, severity on bunches). The AUC values of random forest are, however, very close. The other types of models (LASSO, GLM with and without input selection) show contrasted results depending on the output. For example, LASSO has a high value of AUC for incidence on leaves but gets a very low value for severity on leaves. Very variable AUC values are also obtained for GLM.

Considering the models including climate inputs plus date of disease onset (first row of Figure 7.4), gradient boosting has the highest AUC for two outputs, namely incidence and severity on leaf. Random forest, LASSO and GLM without selection also show good performance. Stepwise input selection substantially decreases AUC values revealing that this selection procedure was unable to select relevant inputs. Better results are thus obtained with GLM without input selection.

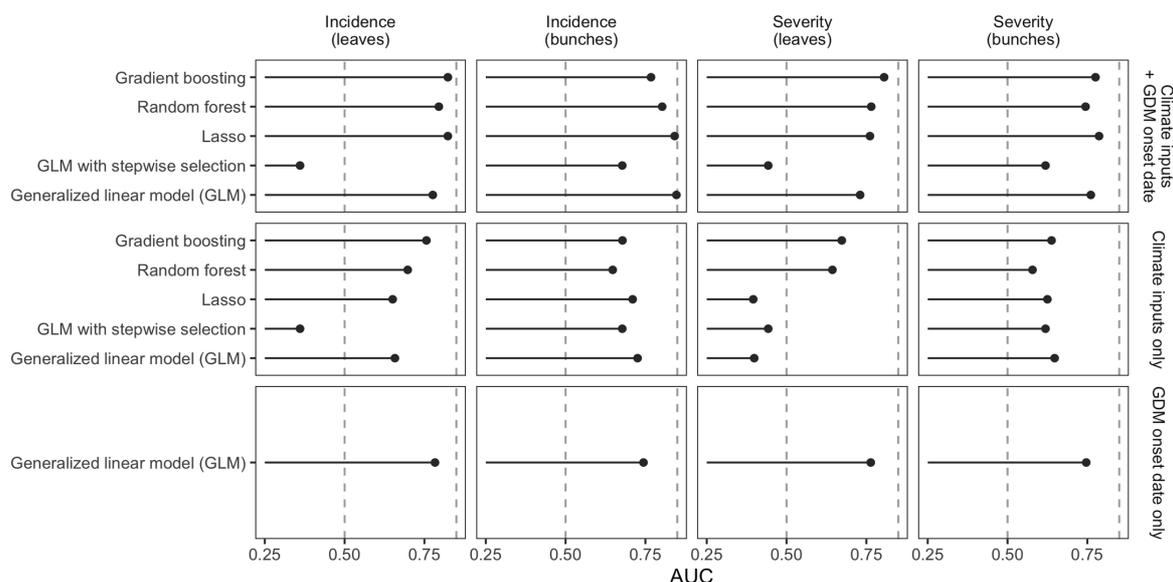


Figure 7.4: Area under the ROC curve (AUC) of several models used to predict occurrence of high level of GDM incidence and severity on leaves and bunches.

### 7.4.2. Importance of the model inputs

The inputs are ranked according to their importance in Figure 7.5 (see also Annexe L, Annexe M, Annexe N). The date of GDM onset is ranked first for all outputs (Figure 7.5.A, Figure 7.5.B and Annexe L, Annexe M, Annexe N). This input has thus a stronger impact on model classifications than all the considered climate inputs. The difference of importance between the date of disease onset and the most important climate input is stronger for random forest than for gradient boosting but the date of disease onset is ranked first with both approaches.

The most important climate inputs are those related to precipitation in late spring, i.e. mean precipitation in May (for random forest and random forest) and in June (for gradient boosting). The least important variables are the average temperature in March for random forest and mean temperature in May-June for gradient boosting. Mean temperature in March is also among the least influential variables for gradient boosting.

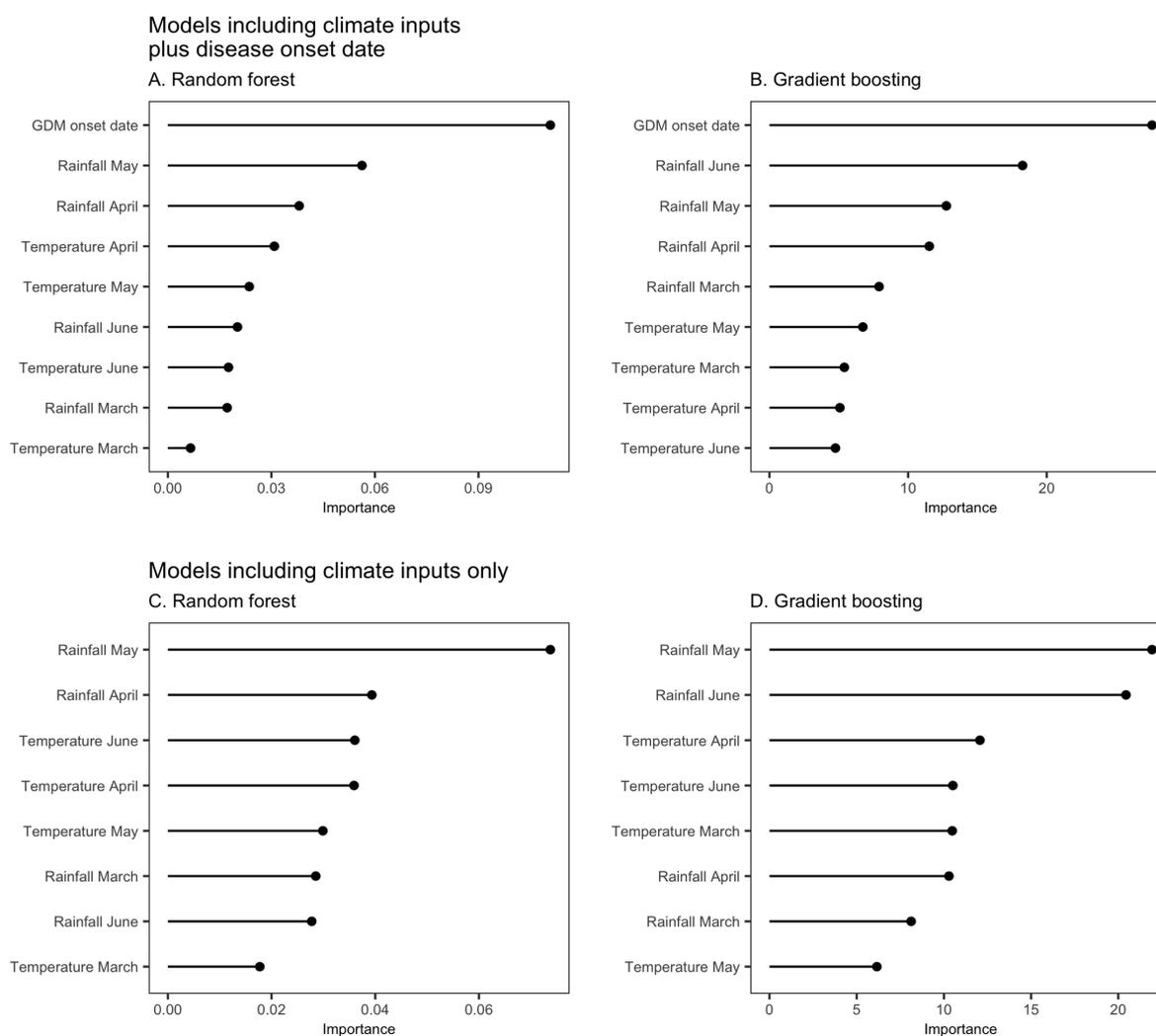


Figure 7.5: Importance of the inputs used in random forest and gradient boosting models predicting the risk of high GDM severity on leaves at bunch closing stage. Models presented in A and B include all inputs (date and climate) and models presented in C and D include climate inputs only. The importance metric reflects the gain in the model performance resulting from the use of each input.

### 7.4.3. Influence of temperature and precipitation on the probability of high disease severity

The gradient boosting algorithm is selected here because, in most cases, this type of model was the most accurate among the tested models including climate inputs (Figure 7.4). This model is thus used here to analyze the sensitivity of the probability of high disease severity on leaves to monthly temperature and precipitation changes.

The results are presented month-by-month in Figure 7.6. Each graphic in Figure 7.6 shows the effect of precipitation change (from -15% to +15%) in a given month for a fixed level of temperature increase during the same month, while keeping all other temperature variables unchanged. The probability of high leaves severity shows an increasing trend as a function of precipitation increase (Figure 7.6). If we consider the precipitation change in May (precipitation in May is the most important input for gradient boosting according to Figure 7.5.D), the median probability of high severity increases from 0.57 to 0.79 for +15% of precipitation and +0% of temperature (Figure 7.6). The first and third quartiles computed over the set of vineyard plots follow a similar increasing trend. Symmetrically, the probability of high severity decreases when the level of precipitation is reduced. Thus, a reduction of -15% of precipitation in May decreases the probability of high severity from 0.57 to 0.31. The strong sensitivity of the probability of high disease severity on leaves to precipitation is consistent with the increasing trend shown by the partial dependence plots displayed in Figure 7.7.A and Figure 7.7.B for precipitation in May and June.

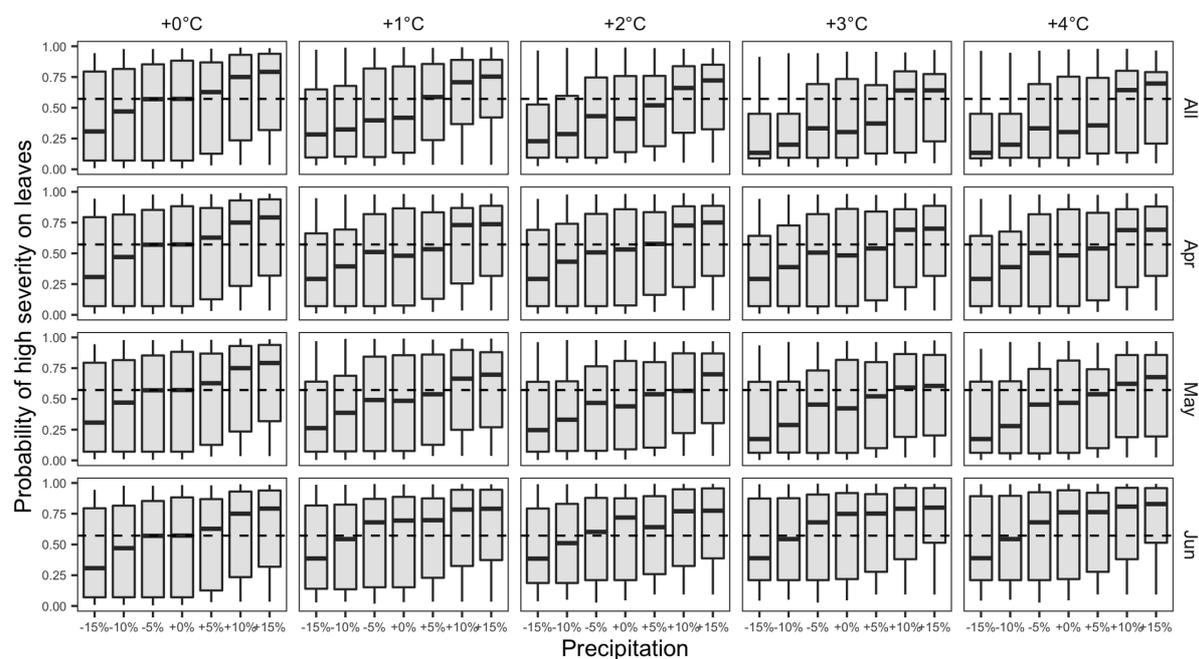


Figure 7.6: Probability of high severity on leaves computed with gradient boosting according to different precipitation variations and to different levels of temperature increase. The median probability obtained with the initial precipitation and temperature is indicated by a dotted line. Each graphic shows the effect of precipitation change (from -15% to +15%) in a given month for a fixed level of temperature increase during the same month, while keeping all other climate variables unchanged. Each boxplot represents the distribution of the probability values over the vineyard plots of our dataset.

Overall, the temperature effect is smaller. Increasing temperature in April and May tends to have negative effect on the probability of high severity. Thus, in May, the probability of high severity decreases from 0.57 (if the precipitation is kept unchanged) to 0.42 (at +3°C). Even in case of a +15% increase of precipitation, the probability of high severity in May does not exceed its original value at +3°C. The effect of temperature in June is positive but small (the probability increased from 0.57 to 0.76 at +4°C). The sensitivity of the probability of high disease severity to temperature is consistent with the partial dependence plots obtained for temperature (Figure 7.7.C and Figure 7.7.D); these plots reveals a decreasing trend in April and an increasing trend in June but with a plateau covering a large range of temperatures.

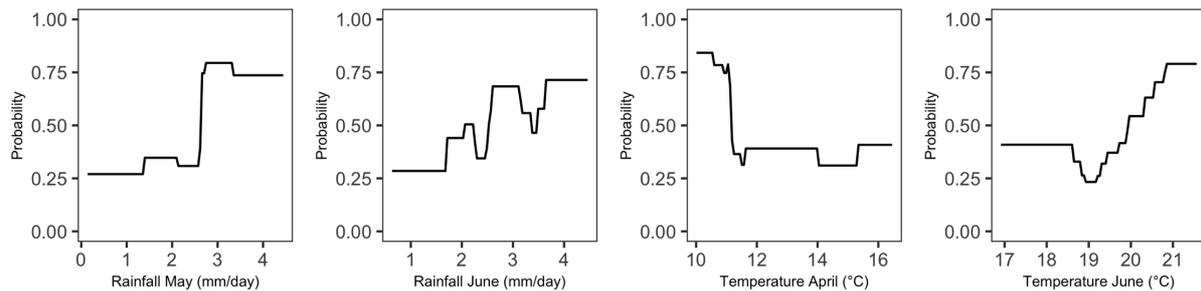


Figure 7.7: Partial dependency plots of the four most important climate variables of gradient boosting (for severity on leaves).

#### 7.4.4. Potential reduction of GDM treatment

A late occurrence of GDM on vines resulted in a decrease of the probability of high incidence and severity. For example, the probability of high GDM severity on leaves computed by the GLM was higher than 0.75 in case of early disease onset (before week 22, i.e. late May, early June) but lower than 0.5 when disease onset occurred after week 24 (95%IC = [23.2; 25]), i.e. mid-June (Figure 7.8). The probability to reach high GDM incidence on leaves estimated by the GLM decreases from 0.92 (95%IC = [0.86; 0.99]) for a disease onset at week 19 (late May) to 0.5 (95%IC = [0.39; 0.61]) for a disease onset at week 24 (late June) (Figure 7.8). A similar decreasing trend was obtained with the other models, in particular with gradient boosting (Figure 7.8 and Annexe O).

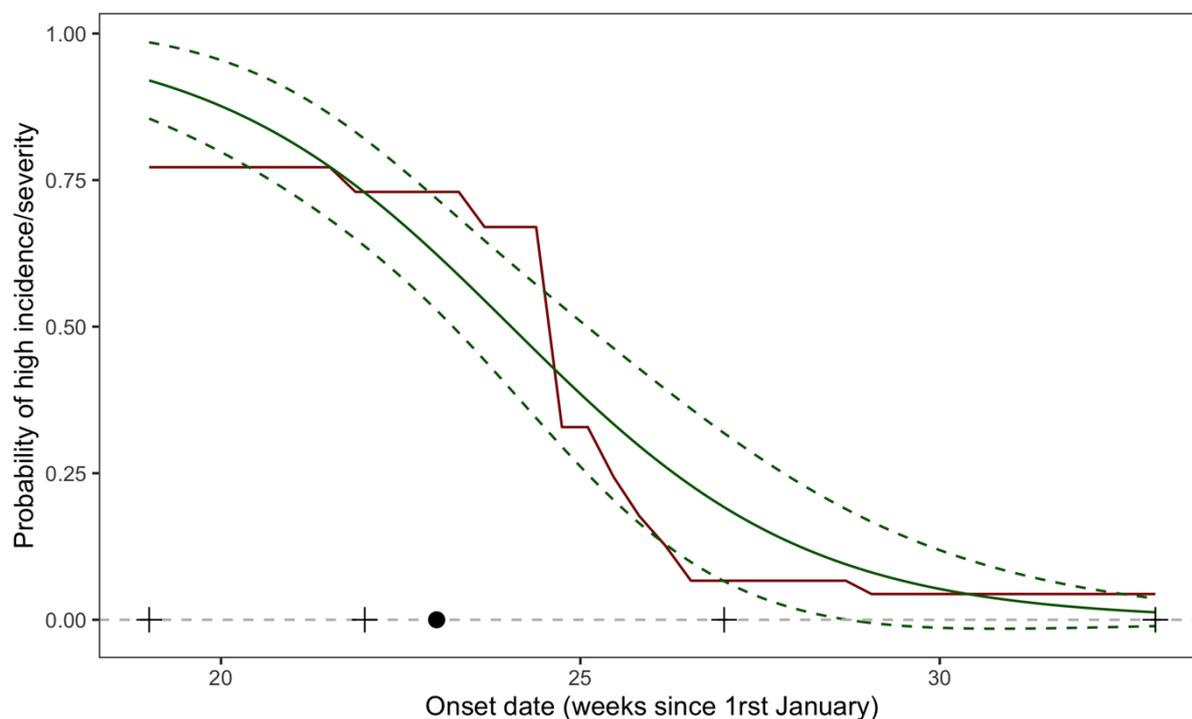
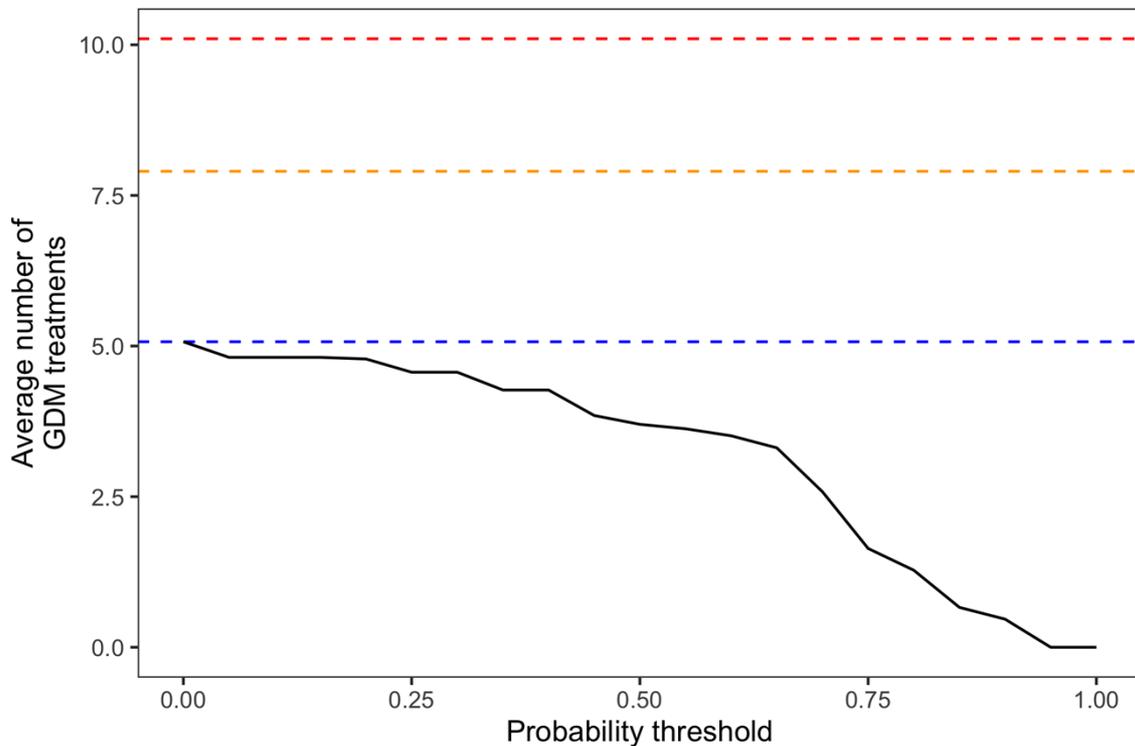


Figure 7.8: Response of probability of high severity on leaves to date of disease onset estimated with the GLM and its 95% confidence interval (in green), and partial dependence plot obtained with the gradient boosting algorithm including climate inputs and date of disease onset (in red). Median, minimum, 1st and 3rd quartiles, and maximum of observed onset dates are represented by a dot and four crosses, respectively.

The probability of high disease severity and incidence computed as a function of disease onset date can be used to trigger fungicide treatments. We consider here a decision rule in which the first treatment is applied only (i) when disease symptoms are observed and (ii) when the probability of high disease incidence/severity estimated as a function of the date of disease onset exceeds a certain threshold. With this decision rule, when the threshold is zero, the first treatment is applied in a plot as soon as some disease symptoms are observed in that plot. If the threshold is set to a value higher than zero, only the plots exceeding the corresponding probability value will receive a treatment. The resulting average numbers of treatments are reported in Figure 7.9. In this figure, the threshold corresponds to the probability of high disease severity, but very similar results are obtained with the probability of high disease incidence (see Annexe P).

Figure 7.9 shows that the number of treatments decreases substantially as a function of the decision threshold. For example, triggering first fungicide treatment when the probability of high GDM severity on leaves was higher than 0.5 allow saving 1.4 application in average, compared to a systematic application at disease onset (Figure 7.9). Setting this threshold to 0.75 could reduce further the average number of application to 1.6, i.e. 69% lower compared to a systematic application at disease onset (Figure 7.9). The potential reduction of GDM treatments is even more important when compared to the current practices observed in Bordeaux vineyards. According to the results of a survey conducted by the SSP, 7.9 and 10.1 fungicide treatments against GDM were applied in average in Bordeaux vineyards in 2010

and 2013, respectively (Service de la Statistique et de la Prospection, 2016b). By using the 0.5 and the 0.75 decision thresholds, it is thus possible to reduce by 53% and 80% the number of treatments applied in 2010 compared to current practices in the Bordeaux region. These reductions reach 63% and 84% were considering the average number of treatments against GDM sprayed in 2013 in this region.



*Figure 7.9: Number of fungicide treatments applied to control GDM in Bordeaux vineyards as a function of a predefined triggering probability threshold (probability of high GDM severity on leaves). The black curve indicates the average numbers of fungicide treatments in the vineyard plots of our dataset computed while assuming that the first treatment is triggered only when the GLM probability of high severity exceeds the value given in the x-axis. Blue line represents the number of treatments for threshold = 0, i.e. when the first treatment is applied in all plots as soon as GDM symptoms are detected. Red and orange lines correspond to the average numbers of treatments recorded by the SSP in 2013 and 2010, respectively.*

## **7.5. Discussion**

In our analysis, we were able to relate the risk of high GDM incidence and severity on leaves and on bunches to the disease onset date and to climatic conditions in spring. Our study shows that the date of appearance of GDM has a greater influence on GDM attack levels than climate variables. An early onset date, i.e. before the end of May or early June, leads to a higher probability of a strong attack, while later infections, i.e. after the end of June, are associated with a lower risk. This result is consistent with those of Kennelly et al. (Kennelly et al., 2005), who showed that late infection reduced the severity of GDM on bunches due to the development of ontogenic berry resistance. In addition, GDM is a polycyclic disease, which means that early first infection increases the number of asexual cycles and the infection rates.

The reason for the strong influence of the date of disease onset probably lies in the fact that this variable already integrates many factors, in particular climatic factors. Indeed, Chen et al. (Chen et al., 2018b) showed that the date of disease onset depends on spring precipitation. This is consistent with the fact that, among the climatic factors, we found that spring precipitation was the most influential. More generally, the climate conditions at the end of spring, and more particularly in May, were found to be decisive for the development of GDM in the Bordeaux vineyards.

Our analysis showed that a decrease in spring precipitation leads to a reduction in the risk of GDM. The development of oospores, the main source of inoculum of primary infection, is inhibited by dry periods of spring (Rossi and Caffi, 2007). Precipitation is also necessary for the dispersion and survival of GDM zoospores that cause infection in grape leaves, bunches and shoots (Gessler et al., 2011). The effect of temperature on GDM is more complex and depends on the period. Our results indicate that a temperature increase in late spring, i.e. June, tends to favor a high incidence or severity of GDM. On the contrary, an increase in temperature in April and May tends to reduce the risk of a serious attack of GDM. The positive effect of an increased temperature in June on disease incidence and severity is consistent with the results of Salinari et al. (2006) and Rossi et al. (2005) who found that high temperature accelerates oospores germination.

The results of our sensitivity analysis suggest that a climate change scenario characterized by a decrease in precipitation and an increase in temperature in the spring reduces the risk of a serious attack on GDM. These results are consistent with those of Launay et al. (2014), who show that a lower risk of infection with GDM can be expected in regions with oceanic climatic conditions, such as Bordeaux vineyards, in case of temperature increase and reduced leaf moisture duration. On the other hand, according to Salinari et al. (2006), increased air temperature and reduced precipitation in Bordeaux vineyards would advance the first symptoms of GDM, which could lead to a more serious infection due to the polycyclic nature of the pathogen. It should be noted that Salinari et al. (2006) considered a climate scenario in which the decrease in precipitation was insufficient to reduce the risk of GDM. Potentially, our models could thus be used to adapt grape disease management in different contexts of climatic change (Newbery et al., 2016). However, several factors are not taken into account by our statistical and machine learning tools. The high potential of adaptability of plants pathogen under new climatic conditions is not considered in our study (Garrett et al., 2006). Climatic inputs were limited to aggregated precipitation and temperature conditions during spring only. Other climatic variables such as solar radiation, moisture, hydro-thermal time, which are used in other epidemiological models (Menesatti et al., 2015; Rossi et al., 2008b), are omitted in our models. However, our approach is simple to implement as soon as disease observations are available. It could be applied to other pathogens for which such data are collected (Sine et al., 2010) like septoria leaf blotch of wheat (Michel, 2016). Our models can be easily updated with new observational data, providing an additional level of confidence to end users in terms of model accuracy (Olatinwo and Hoogenboom, 2014).

Our models could also be used for another type of application; they could be integrated in decision support systems to reduce the number of fungicide treatments in Bordeaux vineyards, where more than 10 treatments are commonly sprayed to control GDM (*Service de*

la Statistique et de la Prospection, 2015b). Forecasts of our models could be used to trigger treatment when the predicted risk of GDM at bunch closure is higher than a certain threshold, in order to avoid unnecessary fungicide treatments. Based on our model assessment, the most accurate model is the one including all features, i.e., both date of disease onset and climate inputs. However, this model poses some practical problems. As some of its climate inputs are not available before June, this model could be used in late spring only, i.e., after the start of the GDM epidemic. Since the omission of the climate variables from the set of inputs only slightly reduces the performance of the models, we recommend using the version of the GLM model including the date of disease onset as the only input variable. This model can be used as soon as the presence of GDM is detected and does not require any climate variables. A drawback of this approach is that it involves constant and frequent field scouting in order to determine GDM onset date. In the future, sensors on drones may become available for automatic disease detection (Mahlein, 2015; Rieder et al., 2014).

In Bordeaux vineyards, we show that more than 50% of the treatments could be avoided compared to current practices if GLM forecast were used to trigger first fungicide application. Our results are consistent with several previous studies conducted in other major vine producing countries. Several warning systems were indeed developed to identify periods when conditions are favorable for GDM development (infection or sporulation), and to schedule necessary fungicide applications (Caffi et al., 2010; Madden et al., 2000; Pellegrini et al., 2010). It was shown that the implementation of these tools could lead to a reduction in the number of fungicide applications compared to current practices. For example, the warning system developed by Caffi et al. (2010) led to a median reduction of 54% of the number of fungicide applications, compared to standard schedules in Italian vineyards. Similar results were obtained by Pellegrini et al. (2010) and Menesatti et al. (2015).

The practicality of our approach should be assessed in close collaboration with farmers and agricultural extension services. As long as automated disease detection is unavailable for grape growers, the proposed approach will require field scouting, which is time and labor consuming. Furthermore, delaying fungicide treatments can be perceived as risky by some grape growers because the disease sometimes progresses quickly soon after disease onset. Thus, the economic benefits and risks of reducing the number of fungicide treatments remain to be confirmed. Crop insurance could be proposed as a means of reducing economical losses, by providing a substitute for the risk management benefits of pesticides (Falconer, 1998). Our approach could also be assimilated as an insurance index to offer a market-based method of reducing the overuse or inefficient use of fungicides (Norton et al., 2016). Although the systematic use of fungicide treatments currently appears to be an effective solution for controlling GDM, regulations on pesticide use may become more restrictive in the future, forcing grape growers to reduce their use of fungicides.

## **Acknowledgments**

We thank the French Vine and Wine Institute (*Institut Français de la Vigne et du Vin*) and its technical partners for collecting and providing us with access to their data and to the EPIcure web platform (<https://www.vignevin-epicure.com>). We also thank M. Vergnes for data

collection coordination and C. Debord for database administration. This work received funding from the French Ministry of Agriculture (CAS DAR, SMART-PIC project), the *Institut Carnot Plant2Pro* (project L-i-cite) and from the Bordeaux Vine Council (CIVB). This work is part of the #DigitAg project (ANR-16-CONV-0004). The work of D. Makowski was partly funded by the CLAND Institute of Convergence (16-CONV-0003).

## **7.6. Complément au Chapitre 7**

Dans le Chapitre 4, nous avons montré que la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne était censurée dans 65 % des sites suivis. Ignorer ces données manquantes peut entraîner, outre une perte de précision, de forts biais dans l'analyse. Pour les inclure dans nos modèles, les données censurées ont été imputées. La qualité d'imputation de différentes méthodes de complétion a été au préalable évaluée.

Des données censurées ont été calculées à partir de 50 % des données non censurées. Chaque donnée censurée a été décrite par un intervalle de temps caractérisé par une date de début et une date de fin. Différents types de censure ont été simulés pour plusieurs tailles d'intervalles censurés (T) :

- Censures à gauche : pour chaque site, l'intervalle (t) entre la date non censurée et la date de fin de l'intervalle censuré a été tiré au hasard dans un vecteur  $\{1, \dots, T\}$ , avec T compris entre 2 et 7 semaines.
- Censures par intervalle : pour chaque site, l'intervalle (t) entre la date non censurée et la date de début de l'intervalle censuré a été tiré au hasard dans un vecteur  $\{1, \dots, T\}$  et l'intervalle entre la date non censurée et la date de fin d'intervalle a été défini tel que  $T - t$ , avec T compris entre 2 et 7 semaines.
- Censure à droite : pour chaque site, l'intervalle (t) entre la date non censurée et la date de début de l'intervalle censuré a été tiré au hasard dans un vecteur  $\{1, \dots, T\}$ , avec T compris entre 2 et 7 semaines.

Plusieurs méthodes d'imputation ont été utilisées pour imputer les données censurées transformées (Figure 7.10).

- Remplacer la donnée manquante par une des bornes de l'intervalle de temps caractérisant la donnée ; pour les données censurées à droite et à gauche, les données manquantes ont été imputées avec les dates de début et de fin de l'intervalle de temps, respectivement. La médiane des deux bornes de l'intervalle de temps a été utilisée pour remplacer les données censurées par intervalle (méthode « Borne »).
- Remplacer la donnée manquante par la médiane des deux bornes (méthode « Médiane »)
- Estimer la donnée grâce aux modèles semi-paramétrique et paramétriques incluant la précipitation moyenne entre mars et juin comme covariable développés dans le Chapitre 4. Ces modèles ont été ajustés sur le reste des données (50 % des données non censurées et données censurées).

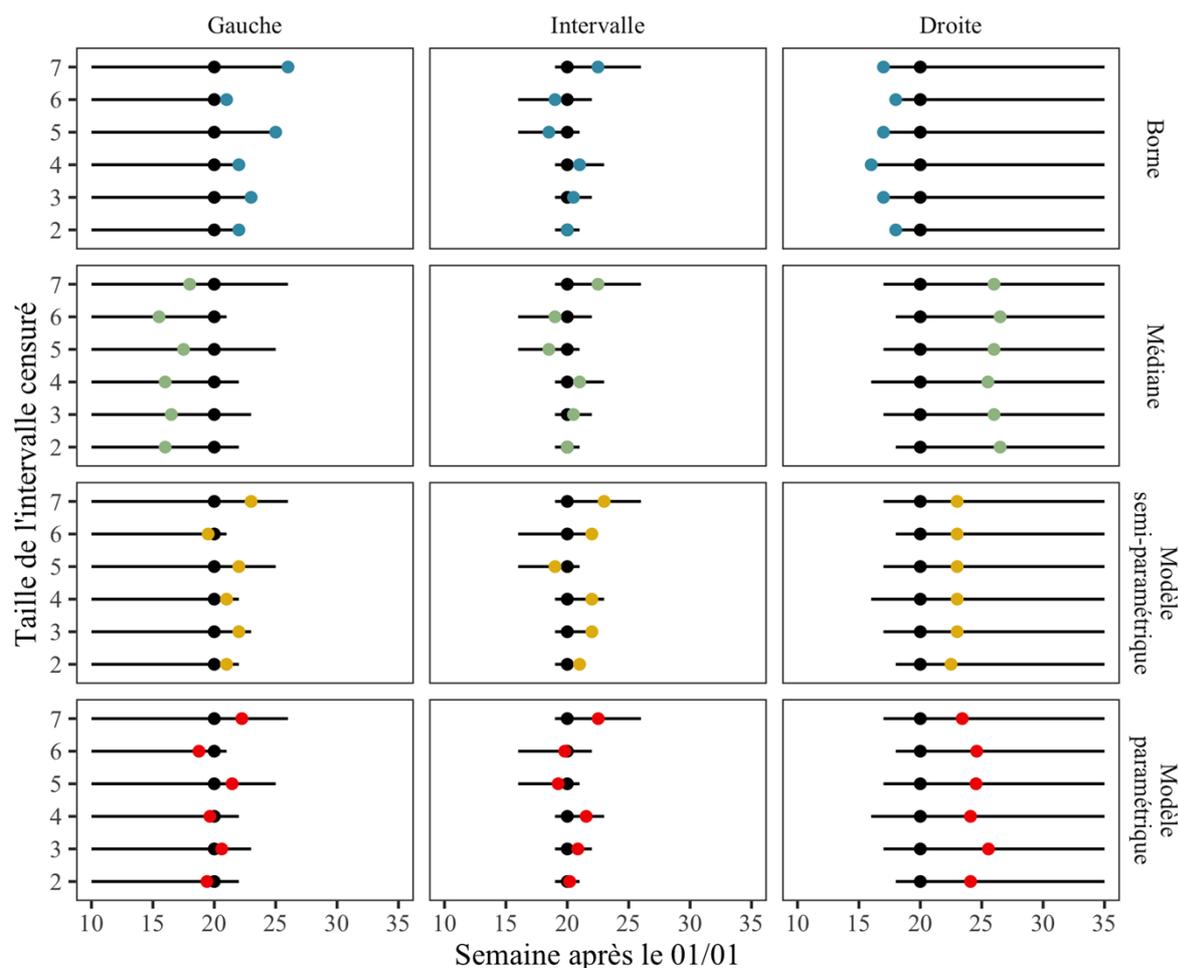


Figure 7.10 : Représentation des données censurées simulées et des données imputées pour un site. La date non censurée du site est représentée par le point noir. Pour une taille d'intervalle donnée et un type de censure donnée, l'intervalle censuré est représenté par le trait noir horizontal. La date imputée est représentée par un point de couleur.

Pour chaque parcelle, la date imputée a été confrontée à la date d'apparition non censurée. Pour évaluer la qualité de l'imputation de chaque modèle, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été calculée comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{(P_{TMi} - O_i)^2}{n}}$$

avec  $P_i$  la date d'apparition imputée du  $i^{\text{ème}}$  site par la méthode d'imputation  $M$  pour une taille d'intervalle censurée  $T$ ,  $O_i$  la date observée du  $i^{\text{ème}}$  site et  $n$  le nombre de sites (Figure 7.11).

*Impact de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou et du climat sur l'état sanitaire d'une parcelle en fin de saison*

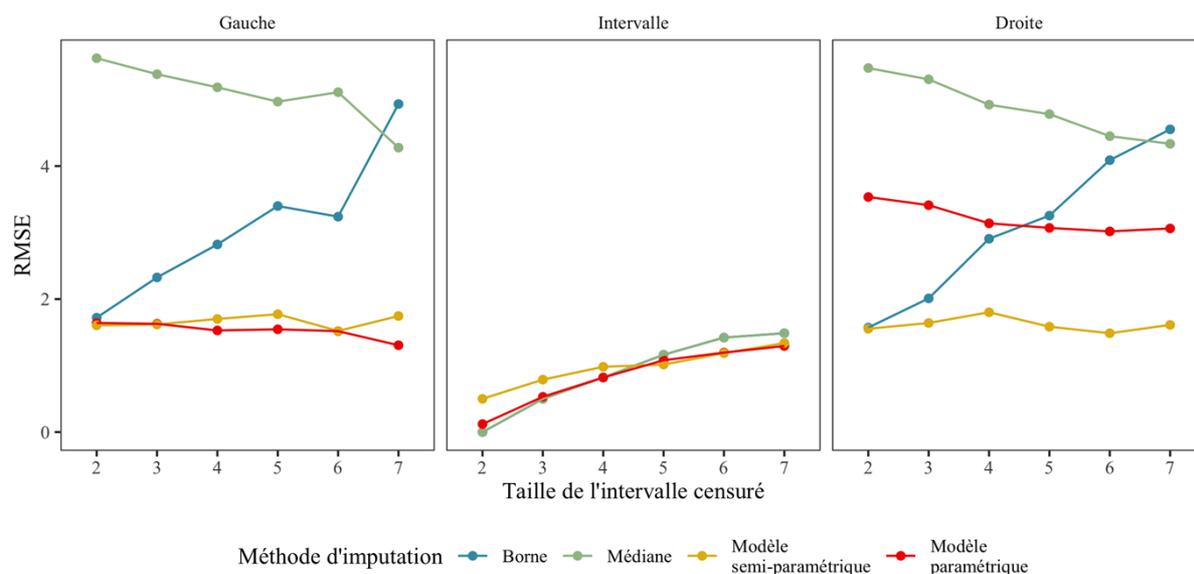


Figure 7.11 : Erreur d'imputation (RMSE) de différentes méthodes d'imputation estimée pour plusieurs types de censure et plusieurs taille d'intervalle censuré.

Ces estimations montrent que quelque soit le type de censure et la taille de l'intervalle censuré, les modèles de survie obtiennent la plus faible erreur d'imputation, par rapport aux autres méthodes de complétion. Pour les censures à gauche et par intervalle, les RMSE des deux modèles sont similaires. En revanche, l'erreur du modèle paramétrique est nettement plus élevée que celle du modèle semi-paramétrique dans le cas des censures à droite, quelle que soit la taille de l'échantillon censuré.

Ces résultats nous ont amené à choisir le modèle semi-paramétrique incluant les précipitations entre le 1<sup>er</sup> mars et le 31 juin pour imputer les données censurées dans notre analyse.

*Impact de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou et du climat sur l'état sanitaire d'une parcelle en fin de saison*



PARTIE IV

—

DISCUSSION

## Chapitre 8. Discussion générale

L'objectif de cette thèse est d'étudier la possibilité de réduire l'usage de fongicides contre le mildiou et d'anticiper l'état sanitaire d'une parcelle en fin de saison en s'appuyant sur la date d'apparition des premiers symptômes de la maladie.

Dans ce chapitre, je vais montrer comment les résultats obtenus répondent aux questions de recherche et à la problématique générale de la thèse (paragraphe 8.1 et 8.2). Cette partie sera l'occasion de mettre en relation les résultats obtenus avec la littérature existante et de discuter des méthodes utilisées.

Je discuterai ensuite des implications pratiques des approches développées dans les quatre chapitres de résultats (paragraphe 8.3). Le caractère générique de ces travaux sera également mis en avant ; je proposerai plusieurs exemples de pathosystèmes et de régions viticoles auxquels mon travail peut s'appliquer (paragraphe 8.4).

Nos travaux répondent en partie à la problématique globale que représente la réduction des traitements anti-mildiou dans le Bordelais. Pour finir, je présenterai d'autres leviers de réduction de l'usage des pesticides. Dans ce paragraphe, je discuterai des apports possibles des méthodes implémentées dans cette thèse à ces différents dispositifs (paragraphe 8.5).

### 8.1. La date d'apparition du mildiou : un indicateur pour raisonner les traitements et anticiper l'état sanitaire en fin de saison

#### 8.1.1. Dynamique d'apparition du mildiou dans le Bordelais

Dans un premier temps, nous avons utilisé les données issues d'observations hebdomadaires réalisées par l'IFV et ses partenaires pour décrire la distribution des dates d'apparition du mildiou dans le Bordelais (Chapitre 4).

Ces travaux apportent de nouveaux éléments quantitatifs sur les dates d'apparition des symptômes de mildiou dans le Bordelais et fournissent une analyse approfondie du risque de mildiou. Notre étude montre que, sur la période de temps étudiée, les premiers symptômes de la maladie apparaissent à partir de la semaine 19 (début mai). Ce résultat, issu des données du réseau IFV, est conforme aux observations réalisées entre 2010 et 2018 dans le réseau de parcelles non traitées du BSV (Tableau 8.1).

Tableau 8.1 Dates d'apparition des premiers symptômes de mildiou dans le réseau de témoins non traités suivis dans le cadre de la rédaction du BSV entre 2010 et 2018. La semaine correspondant à chaque date est indiquée entre parenthèse (source : Chambre d'Agriculture de Gironde, 2018a).

|          | 2010          | 2011          | 2012          | 2013          | 2014          | 2015          | 2016          | 2017          | 2018          |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Feuilles | 11/05<br>(19) | 03/05<br>(18) | 15/05<br>(20) | 22/05<br>(21) | 29/04<br>(18) | 11/05<br>(20) | 09/05<br>(19) | 30/05<br>(22) | 07/05<br>(19) |
| Grappes  | 08/06<br>(23) | 10/05<br>(19) | 30/05<br>(22) | 11/05<br>(19) | 03/06<br>(23) | 13/05<br>(20) | 23/05<br>(21) | 06/06<br>(23) | 22/05<br>(21) |

En outre, cette étude permet de décrire la dynamique d'apparition du mildiou dans cette région (Figure 8.1.A). En moyenne, près de 50 % des parcelles ne présentaient pas de symptômes à la mi-juin (semaine 24). Par ailleurs, le mildiou n'a pas été détecté dans plus de 29 % des parcelles suivies en moyenne.

La forte variabilité des épidémies de mildiou entre les années et entre les sites a également été observée dans cette région (Savary et al., 2009) et dans d'autres pays (Caffi et al., 2010 ; Carisse, 2016 ; Kennelly et al., 2007). Les travaux de l'IFV ont mis en évidence dès 1995 l'absence de symptômes de mildiou à la fin de la saison en Gironde (Raynal et Coulon, n.d.), mais la proportion de parcelles non atteintes n'avait pas été quantifiée. Ce phénomène a également été observé dans certaines parcelles non traitées suivies par Caffi et al. (2010) en Italie en 2009 et 2010.

Nos résultats montrent que la dynamique d'apparition des premiers symptômes de mildiou varie fortement selon les années (Figure 8.1.B). D'après nos estimations, le risque d'apparition des premiers symptômes a été le plus faible en 2011, ce qui est cohérent avec le bilan de fin de campagne du BSV. Les conditions climatiques observées jusqu'à la véraison ont défavorisé le développement de la maladie et les premières contaminations sur feuilles ont été détectées après les pluies des mois de juillet et août (Chambre d'Agriculture de Gironde, 2011). Au contraire, le risque d'apparition du mildiou a été le plus élevé en 2015, d'après nos travaux. Cette année-là, l'apparition du mildiou a été très soudaine : les premiers symptômes de mildiou ont été détectés dans 43 % des témoins non traités suivis dans le cadre du BSV entre le 4 et le 19 mai (Chambre d'Agriculture de Gironde, 2015).

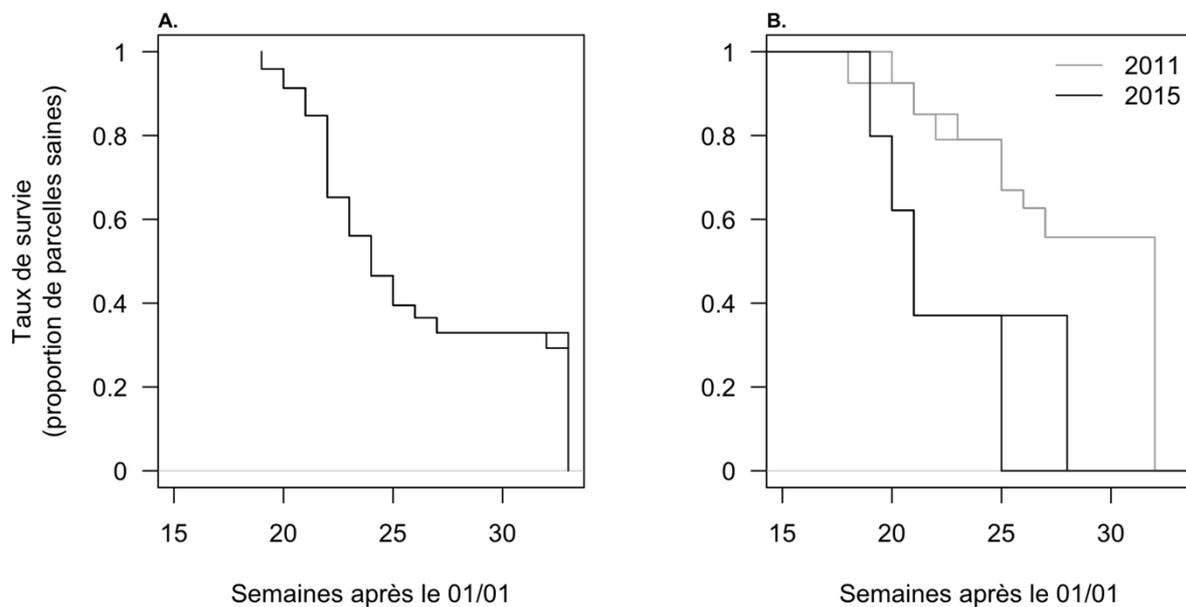


Figure 8.1 : Proportion de parcelles saines (parcelles sans symptômes sur ceps) au cours de la saison estimée par analyse de survie en moyenne entre 2010 et 2017 (A) et pour les millésimes 2011 et 2015 (B). Les courbes de survie estimées pour chaque millésime sont présentées en Annexe Q.

Nous avons estimé l'impact des conditions climatiques au printemps et à l'automne précédant l'épidémie sur l'apparition des premiers symptômes de mildiou (Chapitre 4). Les analyses présentées dans le Chapitre 4 montrent que la précocité d'apparition de la maladie est liée aux précipitations au cours du printemps.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de Caffi et al. (2014) qui montrent que la variabilité des épidémies de mildiou est liée aux conditions climatiques locales. La dépendance de *P. viticola* aux conditions climatiques, notamment à l'humidité, peut expliquer nos conclusions. L'humidité conditionne en effet la production, le déplacement et la survie des zoospores, responsables des contaminations et de l'apparition des premiers symptômes.

### **8.1.2. Impacts d'un report de la date du premier traitement anti-mildiou à la date d'apparition des premiers symptômes**

Dans un second temps, nous avons estimé la distribution des dates de premier traitement anti-mildiou dans le Bordelais à partir des données issues des enquêtes « Pratiques culturelles » sur trois campagnes (Chapitre 6).

Notre étude montre que dans cette région, la lutte phytosanitaire contre la maladie est déclenchée dans 90 % des cas avant le début du mois de mai (semaine 19), ce qui est cohérent avec les résultats de Mailly et al. (2017). Or, la proportion de parcelles présentant des symptômes de mildiou avant cette date était en moyenne inférieure à 5 % dans le réseau des témoins non traités IFV, d'après les estimations de nos analyses de survie (Chapitre 4). Nos travaux montrent que le 90<sup>ème</sup> centile de la distribution des dates de premier traitement était trois semaines plus précoce que la médiane de la distribution des dates d'apparition des premiers symptômes dans cette région.

Ces résultats mettent en évidence un décalage important entre l'apparition des premiers symptômes de mildiou de la vigne et le démarrage de la protection phytosanitaire contre cette maladie dans le Bordelais (Chapitre 6). Ce délai traduit une utilisation potentiellement inutile des fongicides anti-mildiou, notamment dans les parcelles ne présentant pas de symptôme jusqu'à la fin de la saison. Ce résultat nous permet de penser que le report du premier traitement contre le mildiou à l'apparition des premiers symptômes contribuerait à réduire substantiellement le nombre de traitements appliqués pour lutter contre cette maladie.

Nous avons évalué l'impact de la date de premier traitement sur le nombre d'interventions anti-mildiou et sur l'exposition des opérateurs dans le Bordelais (Chapitre 6). Nos résultats montrent que le nombre de traitements contre la maladie peut être réduit de 56 % en moyenne lorsque la première application est déclenchée à l'apparition des premiers symptômes, par rapport aux pratiques actuelles dans cette région. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus pour d'autres stratégies de report du premier traitement (Caffi et al., 2010 ; Delière et al., 2015; Pellegrini et al., 2010).

Nos résultats montrent en outre que cette stratégie de traitement réduit l'exposition des opérateurs aux principales molécules anti-mildiou épanchées dans le Bordelais. Le port d'EPI est aujourd'hui la principale mesure de prévention des risques phytosanitaires, mais elle présente plusieurs limites (Garrigou et al., 2012). Nous montrons que les opérateurs sont le mieux protégés lorsqu'ils portent des EPI et que le premier traitement est retardé à la date

d'apparition des premiers foyers épidémiques. En moyenne, combiner ces deux approches réduit l'exposition des opérateurs de plus de 70 % (Figure 8.2). Par ailleurs, reporter le premier traitement à la date d'apparition des premiers symptômes permet de réduire le risque d'exposition pour les résidents et les passants, qui ne sont pas protégés par les EPI.

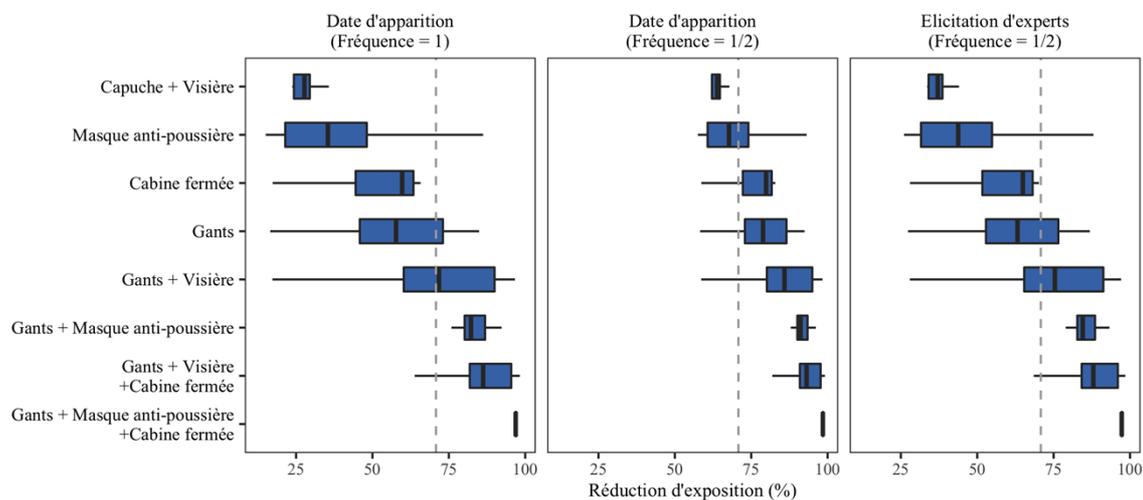


Figure 8.2 : Réduction d'exposition des opérateurs aux 13 molécules anti-mildiou les plus utilisées dans le Bordelais (Table 6.1). La réduction d'exposition est calculée en fonction des EPI portés, de la date du premier traitement anti-mildiou et de la fréquence de traitement (indiquée en semaine). La ligne verticale représente la réduction moyenne d'exposition (71 %).

Cependant, les conséquences d'un report du premier traitement à l'apparition des premiers symptômes sur le contrôle du mildiou restent incertaines. Les résultats de Menesatti et al. (2015) indiquent que cette stratégie permet non seulement de limiter l'usage de produits fongicides, mais aussi de réduire l'incidence et la sévérité du mildiou de la vigne de manière significative, par rapport à une parcelle non traitée.

Mais certains experts soulignent le risque de voir la maladie progresser rapidement après la détection des premiers symptômes, ce qui peut potentiellement induire une augmentation de la cadence de traitement afin de limiter son développement. Le nombre d'expérimentations factorielles comparant cette approche avec d'autres stratégies de lutte étant limité, il serait utile de réaliser de nouvelles études couvrant diverses conditions agricoles et environnementales afin de confirmer l'efficacité des traitements démarrant juste au moment de l'apparition des symptômes.

Cependant, nos résultats semblent robustes : en cas d'augmentation de la fréquence de traitement à une intervention par semaine – soit deux fois la fréquence actuellement observée

en France (SSP, 2016b), cette stratégie induit un nombre de traitements en moyenne 12 % inférieur à celui estimé à partir des pratiques actuelles dans le Bordelais<sup>1</sup>.

L'aspect économique et les contraintes opérationnelles n'ont pas été au cœur des travaux de cette thèse, mais quelques éléments ressortent des discussions avec les experts impliqués dans ces travaux. D'un point de vue économique, la stratégie de lutte consistant à ne traiter que lors de l'apparition des symptômes permettrait de réduire le coût des traitements pesticides via la réduction du nombre de traitement. Il a par ailleurs été montré que d'autres stratégies de report du premier traitement diminuaient substantiellement les coûts liés aux fongicides anti-mildiou (Caffi et al., 2010).

Le report du premier traitement anti-mildiou à la date d'apparition des premiers symptômes présente en revanche différentes limites dans sa mise en pratique. En effet, cette stratégie suppose un suivi régulier de l'ensemble des vignobles afin de détecter au plus tôt les premiers symptômes de mildiou, ce qui peut se révéler coûteux en temps. Cette contrainte pourrait être compensée par la mise en réseau et le partage en temps réel d'observations de terrain grâce aux outils d'alerte tels que Web Alerte Vigne.

A l'avenir, cette approche pourrait bénéficier du développement de méthodes de détection automatique des maladies (Martinelli et al., 2015). Par exemple, plusieurs entreprises et organismes de recherche étudient la possibilité de détecter les premières « taches d'huile » à l'aide de la reconnaissance d'images collectées par des drones (Rieder et al., 2014). D'autres méthodes visent à signaler la présence d'inoculum grâce à différents systèmes de détection en plein champ (Thiessen et al., 2016). Depuis 2019, les instituts techniques et scientifiques agricoles présents dans le Bordelais coordonnent une étude visant à évaluer l'intérêt d'utiliser la technologie LAMP PCR pour quantifier en temps réel la sporée aérienne mesurée sur le vignoble (INRA, 2019).

En raison de la variabilité de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou, déclencher la lutte fongicide à l'apparition de la maladie complexifie la logistique des traitements. En effet, cette stratégie implique de traiter les parcelles le jour où les premières taches sont détectées ; dans ce cas, le viticulteur ne peut pas planifier à l'avance la date de ses interventions.

Cette approche peut en outre impacter la lutte fongicide contre d'autres maladies de la vigne telles que l'oïdium ou le black rot. Dans la pratique, les traitements anti-mildiou et anti-oïdium sont appliqués en même temps par les vigneron afin de gagner du temps. Réduire le nombre d'applications anti-mildiou peut également entraîner une émergence du black rot, qui est habituellement contrôlé par ces traitements.

A l'avenir, il est envisageable que des méthodes de lutte alternatives – produits de biocontrôle, variétés résistantes – permettent aux vigneron de ne plus utiliser de fongicides

---

<sup>1</sup> Dates de premier traitement estimées à partir des données « Pratiques culturelles » pour les vignobles Bordelais des campagnes 2010, 2013 et 2016 et fréquence de traitement moyenne de un traitement toutes les deux semaines estimée par le SSP (2016b).

de synthèse. Ces leviers techniques étant en cours de développement ou d'expérimentation, reporter la date de la première intervention contre le mildiou à l'apparition des premiers symptômes semble être une option envisageable pour réduire l'usage des fongicides anti-mildiou dans le Bordelais. Cependant, les conséquences économiques et l'applicabilité de cette approche doivent être évaluées en étroite collaboration entre les instituts techniques et scientifiques, les viticulteurs, les chefs de culture et leurs conseillers.

### **8.1.3. Utilisation de la date d'apparition des premiers symptômes pour prédire le risque épidémique en fin de saison**

L'analyse du jeu de données fourni par l'IFV met en avant une forte variabilité du niveau d'incidence et de sévérité du mildiou sur feuilles et grappes à la mi-août. Nous avons étudié l'impact de la date d'apparition des premiers symptômes et des conditions météorologiques au printemps sur cette variabilité (Chapitre 7).

Nos résultats montrent qu'une apparition précoce des premiers symptômes de mildiou augmente la probabilité que l'incidence et la sévérité de la maladie soient supérieures à la médiane régionale en fin de saison. Cette probabilité est au contraire plus faible, c'est-à-dire inférieure à 0,5, si la maladie apparaît après la fin-juin. En outre, nous montrons que le climat des mois de mars, avril, mai et juin influence cette probabilité, ce qui est cohérent avec la littérature scientifique.

Les variables climatiques sont fréquemment utilisées dans la modélisation épidémique en santé du végétal (van Maanen et Xu, 2003). En effet, le développement du mildiou, comme d'autres pathogènes, est étroitement lié aux conditions climatiques, notamment l'humidité. Les observations épidémiologiques sont également couramment employées pour prévoir ou analyser la dynamique des maladies, mais leur collecte est coûteuse par rapport à celle des données climatiques.

Dans le Chapitre 7, nous avons évalué l'intérêt d'utiliser des données issues d'observation par rapport aux données climatiques dans la prédiction du risque épidémique en cours de saison. Nos résultats montrent en effet que la performance des modèles s'appuyant uniquement sur des variables climatiques était plus faible en comparaison de ceux tenant compte de la date d'apparition, soit seule soit en combinaison avec le climat.

Nous avons comparé la performance de méthodes d'estimation du risque de mildiou en fin de saison. Dans notre étude, les algorithmes de *machine learning* testés obtiennent la meilleure qualité prédictive. L'utilisation de ces techniques d'estimation est de plus en plus fréquente en agriculture (Liakos et al., 2018), notamment dans la prévision des épidémies de maladies des plantes (Harteveld et al., 2017 ; Mehra et al., 2016). En viticulture, quelques études impliquant ces méthodes ont été menées pour prédire le comportement du mildiou (par exemple Dalla Marta et al., 2005a ; Menesatti et al., 2015 ; Vercesi et al., 2000).

En dehors de ces travaux, le *machine learning* est encore peu répandu pour prédire les épidémies des maladies de la vigne. Ces algorithmes sont considérés comme peu transparents et difficiles à interpréter. Leur fonctionnement peut cependant être expliqué en s'appuyant sur de nombreux outils récemment développés, tels que les « *partial dependency plots* » ou les

« *ALE plots* », qui analysent l'effet d'une ou deux variables sur le résultat d'un modèle de *machine learning*.

Dans notre étude comparative, la performance des modèles linéaires généralisés était équivalente voire supérieure à celle de certains algorithmes de *machine learning*. Les modèles linéaires généralisés – en particulier, binomiaux – sont fréquemment utilisés en épidémiologie végétale (Garrett et al., 2004). En effet, ils s'adaptent bien aux données issues d'observations comme les données collectées dans le cadre de la surveillance biologique du territoire. Ils permettent également de prendre en compte d'autres facteurs telles que les pratiques agricoles (par exemple Michel et al., 2017b, 2016).

Les modèles linéaires généralisés présentent l'autre avantage d'être plus transparents que les algorithmes de *machine learning*, ce qui rend leur interprétation plus facile. Dans le cas où ils incluent seulement la date d'apparition comme covariable, ils peuvent être utilisés dès l'apparition des premiers symptômes. Ce phénomène survient le plus souvent avant la mi-juin (Chapitre 4), tandis que les prévisions des « modèles climatiques » ne peuvent être obtenues que fin juin.

Les prévisions de nos modèles peuvent être utilisées pour adapter la lutte fongicide contre le mildiou en fonction du risque de forte attaque (Chapitre 7). Nous avons défini une règle de décision s'appuyant sur la probabilité estimée ; le premier traitement est déclenché si les premiers symptômes ont été observés et si la valeur de la probabilité estimée à partir de la date d'apparition dépasse un certain seuil.

Nous montrons que l'application de cette règle probabiliste – avec un seuil de déclenchement correspondant à une probabilité de 0,5 – permet d'économiser en moyenne 26 % des traitements anti-mildiou par rapport à la stratégie consistant à reporter le premier traitement à la date d'apparition des premiers symptômes. La réduction du nombre de traitements par rapport aux pratiques actuelles est plus importante ; elle est de 52 et 63 % en comparaison du nombre d'interventions réalisés en 2010 et 2013, respectivement. Le nombre de traitements est d'autant plus faible que le seuil de déclenchement est élevé (Figure 8.3).

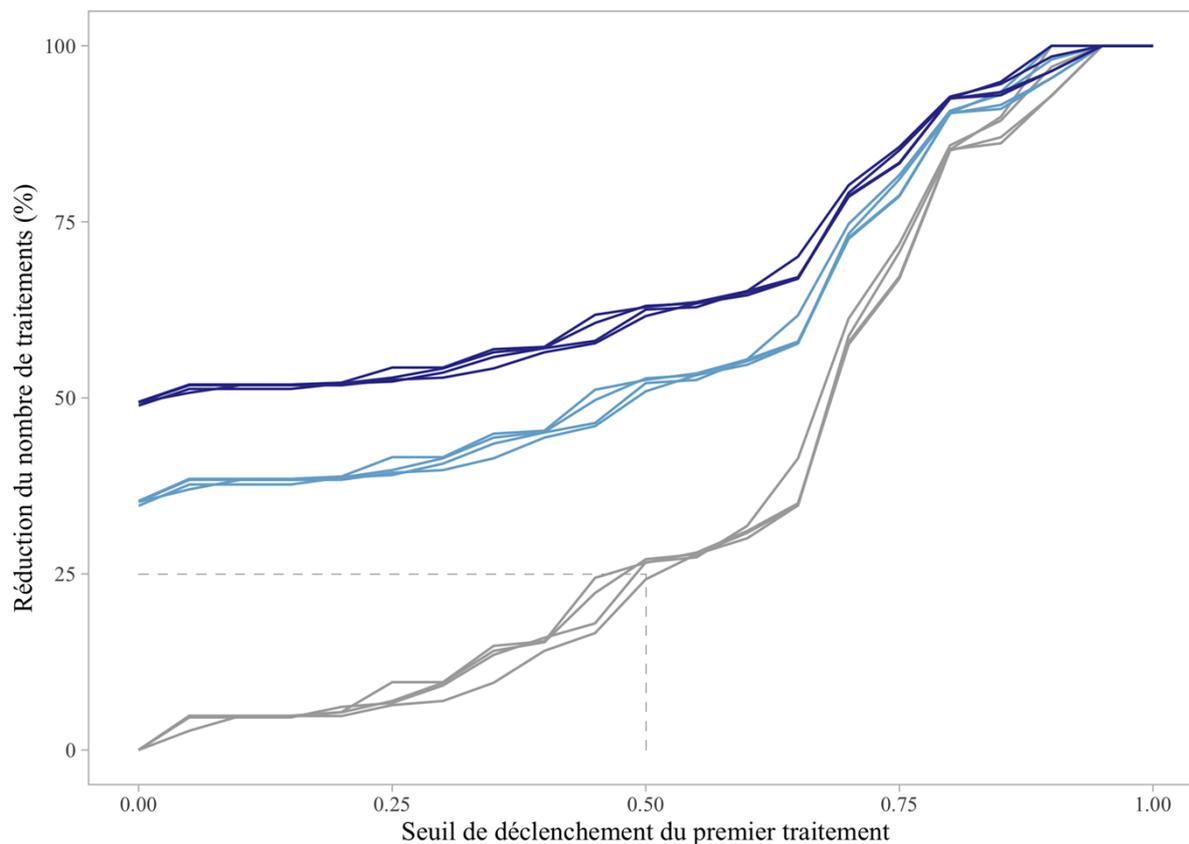


Figure 8.3 : Réduction du nombre de traitements anti-mildiou induit par l'application de la règle de décision étudiée dans le chapitre 4 de la thèse en fonction de la valeur du seuil de déclenchement du traitement (probabilité d'une incidence ou sévérité supérieure à la médiane en fin de saison). La réduction est calculée pour chaque type de dégât (incidence et sévérité sur feuilles et grappes, représentées par les différentes courbes d'une même couleur) par rapport au nombre de traitements induit par le seul report de la date du premier traitement à la date d'apparition (courbes grises) et par rapport au nombre de traitements anti-mildiou épanchés dans le Bordelais en 2010 (bleu clair) et en 2013 (bleu foncé) (SSP, 2015a).

## 8.2. Estimer la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou à partir de données régionales et d'information locale collectée en cours de saison

### 8.2.1. Approche basée sur les données issues d'observations de vignes non traitées

Les observations épidémiologiques sont une source d'information utilisable pour estimer la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou. Cependant, nous avons constaté que les données issues de ces observations étaient fréquemment censurées. Par exemple, entre 2010 et 2017, 40 % des parcelles ne présentaient pas de mildiou à la fin de la période de suivi et 17 % étaient déjà infectées au début de cette période (Chapitre 4).

La censure représente un cas particulier d'information manquante. Le traitement des données censurées requière la mise en œuvre des techniques d'analyse de survie, couramment utilisées en sciences médicales et en industrie mais encore peu en épidémiologie végétale (Scherin and Ojiambo, 2004). Il est également possible d'utiliser les techniques d'analyse traditionnelles pour prendre en compte ce type de données, mais ces méthodes fournissent des estimations biaisées ou négligent une partie de l'information disponible (Onofri et al., 2019).

Nos travaux montrent que les méthodes d'analyse de survie s'adaptent bien aux données d'épidémiologie végétale, comme celles collectées dans le Bordelais pour suivre le développement du mildiou de la vigne (Chapitre 4). Elles permettent d'estimer la durée entre le début de l'année et l'apparition des premiers symptômes de mildiou et d'évaluer l'impact de différents facteurs sur cette durée. En outre, nous avons montré que les modèles de survie peuvent être utilisés pour imputer les données censurées (voir le Complément au Chapitre 7), ce qui est cohérent avec d'autres études (Bernhardt et al., 2014).

Les paramètres des modèles de survie sont peu nombreux et facile à estimer, en comparaison d'autres modèles épidémiologiques tels que les modèles mécanistes (par exemple Magarey et al., 1991 ; Rossi et al., 2008b). L'approche mécaniste repose sur la modélisation de la dynamique épidémique d'un organisme nuisible et du comportement de la plante hôte (Magarey et Isard, 2017). Ce type de modèle repose sur l'estimation de nombreux paramètres et implique une bonne connaissance des mécanismes biologiques et de l'impact des différentes variables environnementales sur ces mécanismes. Les modèles de survie sont également plus transparents que les algorithmes de *machine learning*, qui peuvent également être utilisés pour prédire l'émergence du mildiou de la vigne (par exemple Menesatti et al., 2015 ; Vercesi et al., 2000).

### 8.2.2. Approche basée sur l'expertise locale

L'expertise est une autre source d'information utilisable en cours de saison pour estimer le risque d'apparition de maladies des plantes. Elle a déjà été mobilisée afin d'évaluer ce risque pour le mildiou de la vigne dans différents bulletins d'alerte régionaux, tels que l'édition Nord Aquitaine du BSV.

Dans ce travail, nous avons testé l'intérêt de collecter et synthétiser les avis d'experts à l'aide de l'élicitation probabiliste (Chapitre 5). En collaboration avec l'IFV, nous avons demandé à plusieurs experts d'estimer en cours de saison la distribution des dates probables d'apparition des premiers symptômes de mildiou pour une parcelle non traitée.

L'avis des experts a d'abord été utilisé individuellement afin de fournir une estimation de la date d'apparition du mildiou pour leur parcelle de référence (prévision localisée). Une estimation moyenne a ensuite été calculée à partir des pronostics des experts d'une même région (prévision régionale). Les prévisions des experts – localisée et régionale – ont été comparées aux dates d'apparition observées.

L'élicitation probabiliste d'expert permet de formaliser la distribution des dates d'apparition des premiers symptômes de mildiou en cours de saison, lorsque les observations ne sont pas encore disponibles. Cependant, nos travaux montrent qu'au début de chaque campagne d'élicitation, les experts ont eu tendance à fortement anticiper l'apparition du mildiou. Les prévisions s'ajustent progressivement au cours de la campagne et le biais initial diminue (Annexe R et Annexe S). Nos résultats montrent que la prévision collective basée sur les derniers pronostics des experts donne une image réaliste des dates probables d'apparition du mildiou à l'échelle d'un bassin de production (Figure 8.4 et Annexe T).

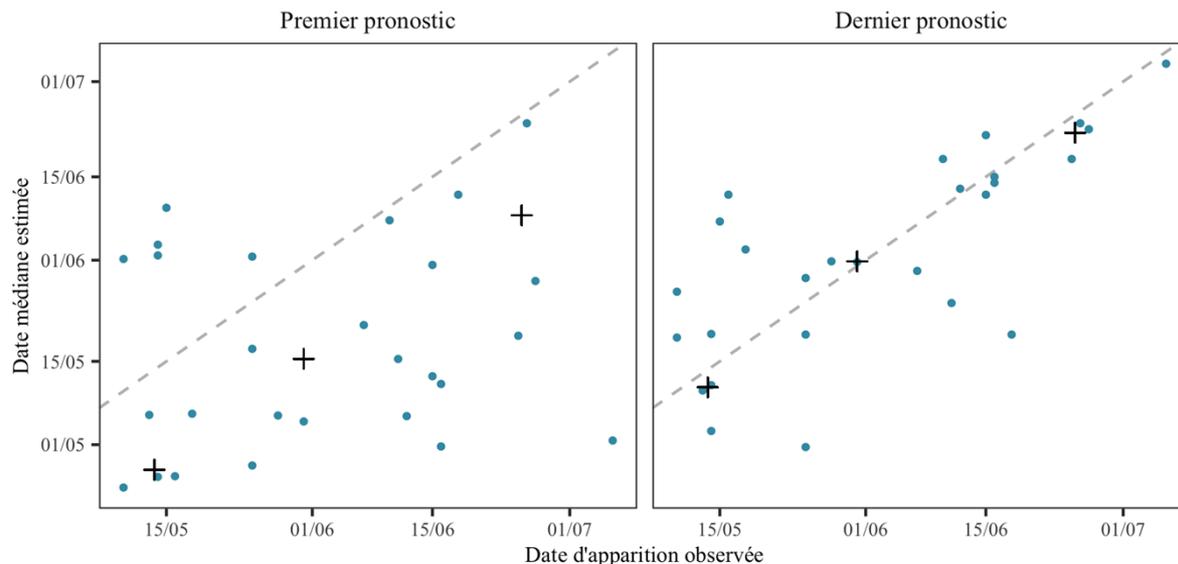


Figure 8.4 : Relation entre les dates estimées (axe des ordonnées) lors du premier et du dernier pronostic de chaque expert et les dates d'apparition observées sur le terrain (axe des abscisses) pour l'ensemble des experts du Bordelais élicités entre 2017 et 2019. Les croix matérialisent, pour l'ensemble des experts et des observations du terrain, les dates auxquelles le mildiou est apparu dans 10 (étoile de gauche), 50 (milieu) et 90 % (droite) des parcelles, respectivement. Les résultats par année sont présentés en Annexe T.

### 8.3. Implications pratiques

#### 8.3.1. Apport des méthodes d'estimation de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou aux bulletins d'alerte régionaux

Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé deux méthodes d'estimation de la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou : (i) une approche s'appuyant sur des observations régionales réalisées sur un réseau de parcelles non traitées et (ii) une approche mobilisant l'expertise locale en cours de saison. Ces deux outils pourraient être utilisés dans les bulletins d'alerte pour fournir aux viticulteurs et à leurs conseillers une information, en amont et en cours de saison, sur le risque d'apparition de la maladie à l'échelle régionale.

Par exemple, la distribution des dates d'apparition du mildiou dans le Bordelais estimée par nos modèles de survie permet de mieux connaître la dynamique d'apparition de la maladie à l'échelle régionale. La distribution des dates d'apparition pour chaque millésime a aussi été estimée (Annexe Q). Ces distributions permettent de comparer la dynamique d'apparition de l'année en cours avec les précédentes.

Les prévisions régionales de plusieurs membres de la communauté technique peuvent également fournir une information relative au risque d'apparition du mildiou. Par ailleurs, le jugement des rédacteurs des bulletins d'alerte concernant la date d'apparition du mildiou de la vigne peut être formalisée à partir de l'élicitation probabiliste.

En effet, cette expertise est fréquemment présentée dans les bulletins régionaux sous la forme d'un résumé et d'une note qualitative. Or, l'utilisation d'un tel système ne fournit pas d'information quantitative sur le niveau d'incertitude associé à l'avis de l'expert et rend l'interprétation des bulletins suggestive.

Nos travaux montrent que l'élicitation probabiliste permet de formaliser le jugement des experts sur le risque d'apparition des premiers symptômes de mildiou de manière transparente. En plus de fournir l'estimation de la date d'apparition la plus probable, cette méthode offre une information sur l'incertitude associée aux pronostics des experts. Présenter l'expertise sous la forme d'une distribution de probabilité diminue par ailleurs le risque de surestimation ou de sous-estimation de la pression épidémique estimée par les experts, par rapport à une évaluation qualitative.

En outre, cette méthode matérialise la perception que les membres de la communauté technique ont de l'épidémie en cours de saison. Chaque expert ayant sa propre vision de l'épidémie, cet outil leur permet de comparer leur ressenti à celui de la communauté technique.

En 2018 et 2019, les résultats des élicitations ont été édités dans un bulletin d'information actualisé chaque semaine en fonction des nouveaux pronostics (Annexe F). Ces bulletins, mis à disposition de l'ensemble des participants, ont permis aux lecteurs de confronter leur perception de l'épidémie à celle des experts élicités. Ils constituent une base d'échanges et un outil pédagogique qui pourrait à l'avenir assister les membres de la communauté technique dans leurs prévisions.

### **8.3.2. Apport des modèles de prévision du risque de mildiou en fin de saison à l'assurance indicielle**

L'assurance indicielle consiste à déclencher l'indemnisation par la présence de conditions fortement corrélées aux pertes de récolte. Dans ce type d'assurance, le dédommagement repose sur un indicateur, dont la valeur déclenche ou non le versement des indemnités (Banque mondiale, 2011).

Dans le Chapitre 7, nous avons développé un modèle prédisant la probabilité que l'incidence (la sévérité) de mildiou dans une parcelle dépasse l'incidence (la sévérité) médiane régionale à partir de la date d'apparition des premiers symptômes de la maladie. Les prévisions de ce modèle pourraient servir d'indicateur de risque dans le cadre d'une telle assurance (Figure 8.5).

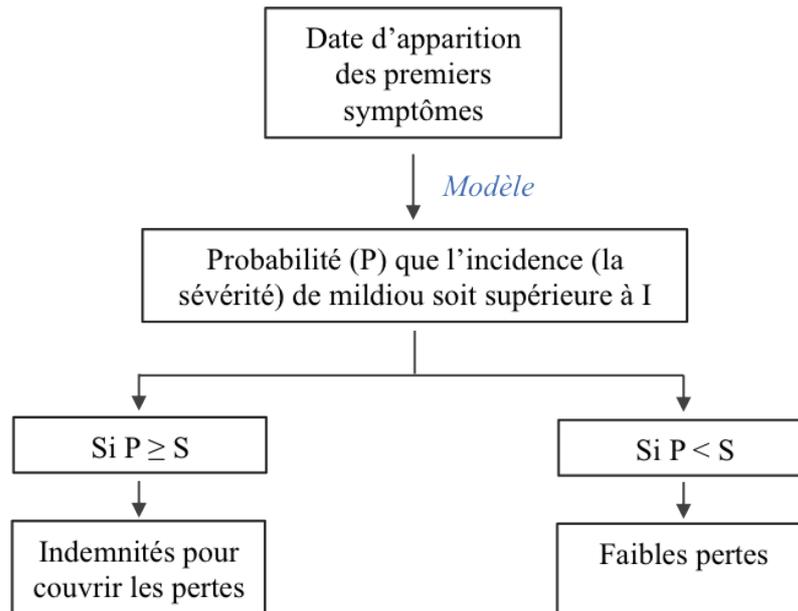


Figure 8.5 : Schéma d'un système d'assurance indicielle s'appuyant sur la prévision de la probabilité de forte attaque de mildiou estimée par les modèles présentés dans le Chapitre 7.

Dans notre étude, la relation entre le niveau de contamination du mildiou et la perte de rendement liée au mildiou n'a pas été établie ; nous ne pouvons pas affirmer qu'une incidence (sévérité) supérieure à la médiane régionale induise une baisse substantielle du rendement. Il serait donc nécessaire de confirmer que ces variables sont de bons témoins des pertes de rendements causées par le mildiou ; certains indicateurs, comme les variables climatiques, pourraient potentiellement être plus explicatifs. Si l'incidence ou la sévérité de mildiou en fin de saison prédisent correctement les pertes de production imputées au mildiou, il serait ensuite utile d'estimer le niveau d'incidence (de sévérité) à partir duquel une baisse significative de rendement est obtenue.

De plus, le seuil à partir duquel l'indemnisation est versée doit être étudié. D'après nos analyses, un seuil de déclenchement de 0,55 pour la sévérité sur grappe et de 0,5 pour les trois des variables épidémiques restantes permettrait d'économiser au moins un quart des traitements, par rapport à un report de la date de la première intervention anti-mildiou à l'apparition de la maladie. Il serait nécessaire de vérifier que ce seuil ne soit pas trop élevé ou trop faible.

La mise en pratique de ce système assurantiel requiert ainsi le développement de nouvelles connaissances afin de déterminer si l'indicateur et le seuil d'indemnisation sont adaptés. Un indice peu corrélé au risque à protéger ou un seuil mal calibré peuvent en effet entraîner des pertes non indemnisées pour l'assuré (Sarraud et Le Plat, 2017).

En outre, il faudrait pouvoir vérifier que le viticulteur assuré n'ait pas déclenché le premier traitement avant la date d'apparition des premiers symptômes. Notre approche suppose en effet que la parcelle reste non traitée au moins jusqu'à cette date.

### 8.3.3. Projection des épidémies de mildiou selon différents scénarios de changement climatique

L'agriculture doit faire face aux conséquences du changement climatique. L'une de ces conséquences est la modification du comportement des bioagresseurs, dont le développement dépend des conditions météorologiques (Garrett et al., 2006 ; Newbery et al., 2016). Dans notre étude, nous montrons qu'une diminution des précipitations et une augmentation des températures en avril et mai réduisent le risque de fortes attaques de mildiou en fin de saison (Chapitre 7).

Ainsi, il est possible qu'une modification du climat actuel en France affecte les épidémies de mildiou dans le Bordelais. Dans ce contexte, les modèles incluant seulement les variables climatiques développés dans notre étude pourraient être utilisés pour estimer les conséquences du changement climatique sur le risque épidémique en fin de saison.

## 8.4. Généricité des méthodes développées

### 8.4.1. Application à d'autres pathosystèmes

Plusieurs approches développées pour ce travail présentent l'intérêt d'être génériques ; en effet, elles ne nécessitent pas une connaissance précise du pathosystème et sont donc applicables à d'autres bioagresseurs de la vigne ou d'autres cultures.

L'oïdium est une autre maladie de la vigne causée par *Erysiphe necator*, un ascomycète introduit en Europe suite à l'importation massive de ceps américains. Les épidémies d'oïdium peuvent varier d'une année à l'autre et d'une région à l'autre (Delière et al., 2013 ; Moyer et al., 2016). La maladie est notamment favorisée par un climat sec et chaud, des températures comprises en 20 et 25 °C, une hygrométrie élevée la nuit et la présence d'inoculum issu des épidémies précédentes. Cette maladie est à l'origine de pertes de rendement et d'une baisse de la qualité des grappes (Calonnec et al., 2004). Le moyen le plus efficace pour contrôler l'oïdium est l'usage préventif et raisonné de produits fongicides.

Le raisonnement de la lutte fongicide contre l'oïdium dépend notamment du développement de la vigne (« Oïdium », n.d.). La période de sensibilité de la plante débute au stade « boutons floraux séparés » et se termine au stade « fermeture de la grappe ». Les inflorescences et les jeunes baies sont d'autant plus sensibles que les tissus sont jeunes. Elles acquièrent assez rapidement une résistance ontogénique, due à la transformation des stomates en lenticelles (Ficke et al., 2002). Il est donc possible de raisonner les traitements à la fin de la période de sensibilité de la vigne, en fonction du développement de la maladie durant la saison.

Au début de la période de sensibilité, l'utilisation préventive de fongicide est recommandée. En effet, les premiers symptômes d'oïdium sont très difficiles à détecter et peuvent se manifester plusieurs semaines après les premières contaminations. Dans ce cas, l'épidémie est trop avancée pour être contrôlée, même avec l'usage de fongicides (Bertocchi et al., 2010 ; Sozzani et al., 2010). Avant cette période de sensibilité, la date d'apparition des premiers symptômes peut être utilisée pour déclencher le premier traitement. Par exemple, dans la procédure Mildium<sup>®</sup>, l'observation des premiers symptômes avant le stade « boutons floraux séparés » déclenche le premier traitement (Laurent Delière et al., 2015).

Nos approches basées sur l'analyse de données d'épidémiologie ou d'expertise locale pourraient être utilisées dans ce cas afin d'estimer si l'apparition des premiers symptômes survient avant ou après le début de la période de sensibilité de la plante. De plus, la sévérité de l'épidémie est d'autant plus importante que les premiers symptômes sont détectés tôt dans la saison (Calonnec et al., 2006). L'approche présentée dans le Chapitre 7 de cette thèse pourrait être employée afin d'estimer le risque de forte attaque d'oïdium et de raisonner les traitements selon cette prévision.

Nos travaux sont également applicables à d'autres cultures. Avec 2,9 passages fongicides en moyenne en 2011, 2014 et 2017, le blé tendre (*Triticum aestivum*) est la céréale à paille la plus fréquemment traitée avec des fongicides (SSP, 2019b, 2016a), notamment pour lutter contre la rouille jaune (*Puccinia striiformis*). Le champignon passe l'hiver sous forme de mycélium ou de spores actives. Il résiste à des températures négatives et survit généralement à l'hiver sur des plants infectés – repousses de céréales ou cultures semées tôt à l'automne. Au printemps, la rouille jaune commence à se développer et produit des spores, et ce d'autant plus que le temps est frais et humide. Les spores sont disséminées principalement par le vent (Chen, 2005).

La lutte contre cette maladie repose essentiellement sur le choix variétal et l'usage de produits fongicides. Les traitements doivent être positionnés suffisamment tôt afin d'éviter les pertes. Selon le stade de développement de la plante, le premier traitement doit être déclenché dès la détection des premiers foyers actifs – stade épi 1 cm – ou dès l'observation des premiers symptômes de rouille – stade 1 nœud (« Rouille jaune : traiter tôt en cas d'attaque », 2016).

Le positionnement de ce traitement peut être effectué à partir des approches développées dans le Chapitre 4 et le Chapitre 5, en s'appuyant sur les données d'épidémiologie de la base de données Vigicultures<sup>®</sup>. Issue d'une collaboration entre les instituts techniques agricoles français et les acteurs locaux, Vigicultures<sup>®</sup> est constituée d'observations réalisées dans le cadre de la rédaction des BSV (Sine et al., 2010). Ces observations, effectuées sur une grande partie du territoire, concernent l'état sanitaire des cultures – stades de développement, observations des ravageurs et maladies, présence de symptômes – et sont complétées par des informations sur les pratiques agricoles des parcelles suivies.

#### **8.4.2. Application à d'autres régions viticoles**

Nos travaux peuvent également être appliqués aux autres régions viticoles. Par exemple, le mildiou était à l'origine de 45 % des traitements en Charentes-Cognac et de 43 % traitements dans les vignobles en Champagne<sup>1</sup> en 2013 (SSP, 2015a). La plupart des approches développées durant cette thèse repose sur des données d'épidémiologie collectées sur des sites non traités. Or, ce type de données est collecté dans les régions viticoles couvertes via le réseau de témoins non traités de l'IFV, notamment en Charentes-Cognac et en Midi-

---

<sup>1</sup> Charentes-Cognac : 11 traitements anti-mildiou sur 24,2 traitements au total ; Champagne : 10 traitements anti-mildiou sur 23 traitements au total.

Pyrénées. Il est également possible que ce type de données soit collecté via d'autres réseaux de témoins non traités, comme par exemple les suivis réalisés pour la rédaction des BSV.

Dans les vignobles où ces données ne sont pas disponibles, il est possible d'employer l'élicitation probabiliste d'expert. En effet, cette approche est notamment utile en cas d'absence de données (Morris et al., 2014 ; O'Hagan, 2012). Nos travaux ont montré que cette approche était facile à mettre en place ; les outils d'élicitation mobilisés durant nos trois campagnes sont disponibles en ligne et le pronostic est en général très rapide à réaliser (cinq à dix minutes par pronostic). Les résultats obtenus à l'échelle régionale nous semblent suffisamment robustes à partir de la mi-mai pour pouvoir effectuer des pronostics régionaux.

## **8.5. Autres dispositifs de raisonnement des traitements**

### **8.5.1. Variétés résistantes**

Les viticulteurs peuvent faire appel à d'autres méthodes de lutte pour réduire l'usage des fongicides anti-mildiou. Parmi ces méthodes, les cépages résistants sont une perspective intéressante. Les résultats du dispositif ResIntBio, implanté sur le site de l'INRA de Bordeaux, montrent en effet que l'utilisation de variétés résistantes ResDur a provoqué une réduction de l'IFT comprise entre 90 et 100 % entre 2013 et 2015 (Delière et al., 2015).

Leur déploiement dans les vignobles soulève cependant de nouvelles questions – durabilité des résistances (Delmotte et al., 2014), qualité organoleptique du vin issu de ces variétés (Espinoza et al., 2018), gestion des autres bioagresseurs – et suppose la mise en place de nouveaux itinéraires techniques.

En plus d'assurer la durabilité des résistances variétales, ces nouvelles pratiques devront garantir l'efficacité du contrôle des bioagresseurs tout en réduisant le recours aux pesticides. Si les résistances disponibles concernent le mildiou et l'oïdium, elles ne contrôlent pas les autres bioagresseurs de la vigne comme le black-rot, habituellement contrôlé par les traitements anti-mildiou et anti-oïdium.

Les méthodes de lutte développées pour des cépages non résistants, majoritairement utilisés dans la pratique, ne sont potentiellement pas adaptées pour ces nouvelles variétés. Des travaux visant à apporter des connaissances et des outils pour l'élaboration de ces nouveaux itinéraires techniques sont actuellement en cours (Delière et al., 2015). Les approches développées dans le Chapitre 4 et le Chapitre 5 peuvent être mobilisées pour apporter des éléments concernant le comportement du mildiou ou d'autres bioagresseurs face aux cépages résistants.

### **8.5.2. Leviers économiques et réglementaires**

#### *8.5.2.1. Systèmes de taxation des pesticides*

L'instauration de mesures réglementaires est un levier de réduction des risques et des effets associés à l'application des pesticides dans l'agriculture. Entre autres, les taxes sur les pesticides peuvent être des composantes efficaces d'une politique de réduction de l'usage des pesticides.

En France, la taxation des pesticides est établie à deux niveaux ; ils sont soumis à la TVA et à la redevance pour pollution diffuse. Pour chaque pesticide, le montant de cette taxe<sup>1</sup> dépend de critères toxicologiques et écotoxicologiques et de la dose par hectare de pesticide. Six catégories de produits ont été définies, les plus toxiques – mutagènes, cancérigènes ou dangereux pour la reproduction – étant imposés au niveau le plus élevé (Article L213-10-8 du Code de l'environnement).

Ce régime fiscal donne un avantage comparatif à l'agriculture biologique ; les pesticides autorisés dans l'agriculture biologique sont en effet imposés à un taux de TVA réduit (Direction générale des finances publiques, 2012) et au niveau le plus faible dans le système de redevance. D'autre part, les bénéfices de cet impôt sont utilisés pour financer des initiatives de réduction de la pollution de l'eau par les pesticides et des actions du plan Ecophyto (Article L213-10-8 du Code de l'environnement).

En raison du fait que la taxe dépend de la toxicité du produit et de la dose à laquelle il est utilisé par hectare, l'application de produits efficaces à faibles doses, souvent plus toxiques, peut cependant devenir moins chère que l'utilisation d'un produit moins nocif, mais moins efficace et nécessitant des doses plus élevées à l'hectare. Ce système est cohérent avec l'objectif du plan Ecophyto 2, qui est de réduire l'usage des pesticides, mais pas avec la réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides (Böcker et Finger, 2016). De plus, ce type de mesure est très impopulaire auprès des agriculteurs ; ces derniers considèrent actuellement avoir peu de solutions alternatives pour éviter de payer cette redevance, qui constitue une nouvelle charge à déduire de leur revenu.

Cependant, il est possible que dans un contexte d'augmentation des taxes sur les pesticides, le report du premier traitement à la date d'apparition des premiers symptômes devienne plus rentable qu'une stratégie de contrôle conventionnel reposant sur l'application préventive de traitements anti-mildiou. Les approches développées dans notre travail pourraient être employées afin d'étudier l'impact de différents niveaux de redevance sur la rentabilité de cette stratégie de traitement.

Ainsi, la taxation des pesticides constitue un instrument de politique environnementale efficace à long terme (Finger et al., 2017 ; Lescot et al., 2013 ; Skevas et al., 2012). Afin de réduire sensiblement la dépendance à l'égard des pesticides, ce régime fiscal nécessite toutefois que des mesures favorisant les méthodes de lutte intégrée soient instaurées en complément d'un tel régime fiscal (Böcker et Finger, 2016).

#### *8.5.2.2. Assurance agricole*

L'assurance récolte est actuellement utilisée par les agriculteurs vis-à-vis du risque climatique pour prévenir d'éventuelles chutes de revenu. Elle peut être un outil important pour accompagner la réduction de l'usage des pesticides et encourager de meilleures pratiques de lutte antiparasitaire (Falconer, 1998 ; Gren, 1994).

---

<sup>1</sup> Le montant de cette taxe s'échelonne de 0,90 euros à 9,0 euros par kilo de substance active.

Il existe différents types d'assurances agricoles. Les assurances agricoles traditionnelles, aussi appelées assurances basées sur l'indemnisation, versent des indemnités en fonction des pertes réelles subies par l'assuré. Dans le cas de l'assurance indicielle (*index insurance*), le paiement est déclenché par la présence de conditions défavorables fortement corrélées aux pertes de récolte (Banque mondiale, 2011).

Si l'impact du recours aux assurances traditionnelles sur l'usage des intrants est encore incertain (Chakir et Hardelin, 2010 ; Mishra et al., 2005), il a été montré que l'assurance indicielle basée sur des prévisions probabilistes améliore l'efficacité de leur utilisation (Carriquiry et Osgood, 2012).

Traditionnellement, l'assurance indicielle repose sur des indicateurs météorologiques. Comme le risque de maladie et d'invasion de ravageurs est souvent lié aux conditions climatiques, Norton et al. (2016) proposent d'étendre l'assurance indicielle météorologique à la gestion des attaques d'insectes et de maladies des plantes et à l'assurance de l'usage des pesticides. Les auteurs montrent que cette approche offre un mécanisme de marché (non réglementaire) pour réduire la sur-application ou la mauvaise application des pesticides.

Cette approche présente plusieurs avantages par rapport à une assurance traditionnelle. Tout d'abord, elle permet de réduire le risque d'aléa moral<sup>1</sup> (Norton et al., 2016). L'aléa moral survient lorsque, parce qu'ils ont souscrit une assurance, les assurés modifient leur comportement de telle sorte que la probabilité ou l'ampleur d'une perte augmentent. Dans le cas de l'assurance indicielle, le versement de l'indemnité dépend de la valeur d'un indicateur et du seuil à partir duquel l'assureur considère qu'il y a une perte, qui sont définis au préalable. Il n'y a donc pas de mesure directe de la perte que subit l'agriculteur. Seule la valeur de l'indice est mesurée. Si l'indice ne peut être manipulé par l'agriculteur, le risque d'aléa moral est fortement réduit. Le risque d'aléa moral est plus élevé dans l'assurance récolte traditionnelle (Chakir et Hardelin, 2010). En effet, il est difficile de distinguer la perte de récolte issue de conditions climatiques défavorables de celle résultant de mauvaises pratiques de culture.

L'application de ce système d'assurance fait cependant face à certaines limitations. L'assurance agricole est encore peu utilisée par les agriculteurs français ; seules 30,6% des surfaces agricoles assurées étaient assurées en France en 2013 (Enjolras et Santeramo, 2016). Le taux de participation des agriculteurs pourrait être augmenté par la mise en place d'un programme d'assurance au niveau régional ou national, comme par exemple aux Etats-Unis (Glauber, 2004).

Par ailleurs, les épidémies de mildiou sont des événements annuels qui sont contrôlés par l'utilisation de pesticide ; cette situation va à l'encontre du principe d'assurance interannuelle, qui laissant les bonnes années payer les mauvaises années. Il serait peut-être plus réaliste

---

<sup>1</sup> L'aléa moral survient lorsque, parce qu'ils ont souscrit une assurance, les assurés modifient leur comportement de telle sorte que la probabilité et/ou l'ampleur d'une perte augmentent, ce qui entraîne un transfert du risque des assurés sur les assureurs.

d'assurer le nombre d'applications fongicides nécessaires plutôt que de considérer les traitements comme des événements rares qui doivent être assurés (Norton et al., 2016).

Une possibilité serait d'utiliser l'assurance agricole pour contrebalancer les effets négatifs de l'application d'une réglementation plus stricte de l'utilisation de certains pesticides. Par exemple, en cas de restriction de la quantité de substance active utilisée – comme pour le cuivre – ou du nombre de traitements appliqués, les viticulteurs peuvent être indemnisés si le niveau de dégâts estimé par un indice est très élevé. Comme évoqué dans le paragraphe 8.3.2, l'estimation du niveau de dégât peut être réalisée à l'aide des approches développées dans le Chapitre 7.

Ainsi, l'assurance récolte indicielle est une perspective intéressante pour encourager un meilleur usage des pesticides mais requiert de nouvelles connaissances concernant sa mise en pratique. Le développement d'outils d'assurance innovants est au cœur du programme VitiREV, porté par la région Nouvelle-Aquitaine afin de réduire l'usage des pesticides dans la région (Région Nouvelle Aquitaine, n.d.). Ce programme mobilise l'ensemble des interprofessions viticoles (CIVB, cognac, vins du Sud Ouest), les chambres d'agriculture, les organismes de recherche et de transfert (INRA, IFV, l'Institut des sciences de la vigne et du vin à Bordeaux).

Dans ce cadre, une expérimentation a été lancée en 2019 sur 60 ha pour tester les conditions de mise en œuvre d'un plan de traitement assurable et amorcer l'étude des critères d'assurance. Le report du déclenchement du premier traitement jusqu'à l'apparition des premiers symptômes et l'exploitation des modèles de prédiction proposés dans ce travail constituent deux outils d'aide à la décision qui pourraient être intégrés dans ce dispositif.

#### 8.5.2.3. Certificats d'économie de produits phytopharmaceutiques

Le dispositif des Certificats d'économie de produits phytopharmaceutiques (CEPP), instauré en France depuis 2017, implique les distributeurs de pesticides dans la mise en place d'actions de réduction d'utilisation de ces produits<sup>1</sup>. Pour chaque filière, la liste de ces actions est arrêtée par le ministre chargé de l'agriculture. Par exemple, en viticulture, certaines actions visent à promouvoir l'utilisation de produits de biocontrôle pour lutter contre les bioagresseurs de la vigne ou encore à « optimiser les traitements fongicides sur les maladies de la vigne au moyen d'un OAD » (« Optimiser les traitements fongicides sur les maladies de la vigne au moyen d'un outil d'aide à la décision » | EcophytoPIC, 2019)

La date d'apparition des premiers symptômes de mildiou peut être incluse dans ce dispositif comme un OAD permettant de réduire l'usage des fongicides contre le mildiou. En effet, nous avons montré que reporter la première application fongicide à cette date réduisait de manière significative le nombre de traitements contre le mildiou et l'exposition des opérateurs (Chapitre 6).

---

<sup>1</sup> Voir le site d'EcophytoPIC dédié aux CEPP : <http://www.ecophytopic.fr/tr/cepp/cepp-dispositif>

## **Chapitre 9. Conclusion générale**

Nos travaux montrent que positionner le premier traitement anti-mildiou à l'apparition des premiers symptômes permet de réduire l'usage des fongicides pour lutter contre cette maladie de 56 % en moyenne dans le Bordelais. D'après nos estimations, cette stratégie diminue également l'exposition des opérateurs aux fongicides appliqués pour contrôler le mildiou de manière équivalente à certains équipements de protection individuels. Enfin, nos travaux montrent que la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou est un indicateur intéressant pour prévoir l'état sanitaire d'une parcelle à la mi-août.

Bien que la date d'apparition du mildiou semble être un indicateur pertinent, il serait néanmoins nécessaire de confirmer qu'un report de la date du premier traitement au moment de l'apparition des symptômes n'ait pas d'impact substantiel sur le rendement et le revenu des viticulteurs.

Ce travail apporte de nouveaux éléments concernant les épidémies de mildiou et les pratiques de lutte phytosanitaire dans les vignobles bordelais. Il contribue également au développement de nouvelles approches très peu utilisées jusqu'à présent en phytopathologie comme l'analyse de survie et l'élicitation probabiliste d'experts. Ces méthodes présentent plusieurs avantages ; elles sont notamment simples à mettre en place et elles permettent d'analyser les incertitudes. Par ailleurs, elles sont génériques et applicables à d'autres pathosystèmes et à d'autres régions viticoles en France.

Nos travaux ont plusieurs implications pratiques. Ils peuvent notamment être mobilisés pour fournir des estimations précises du risque d'apparition du mildiou de la vigne dans les bulletins d'alerte régionaux. En outre, les modèles développés dans le cadre de ce travail peuvent également bénéficier au développement de nouvelles connaissances ou de nouveaux outils de raisonnement des traitements contre le mildiou de la vigne.





# PARTIE VI

—

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACTA, 2018. Index acta phytosanitaire, Edition 2019. ed. Acta.
- Akbar-Khanzadeh, F., Bisesi, M.S., Rivas, R.D., 1995. Comfort of personal protective equipment. *Appl Ergon* 26, 195–198. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(95\)00017-7](https://doi.org/10.1016/0003-6870(95)00017-7)
- Alavanja, M.C.R., 2009. Pesticides Use and Exposure Extensive Worldwide. *Rev Environ Health* 24, 303–309.
- Anderson-Bergman, C., 2017a. An Efficient Implementation of the EMICM Algorithm for the Interval Censored NPMLE. *Journal of Computational and Graphical Statistics* 26, 463–467. <https://doi.org/10.1080/10618600.2016.1208616>
- Anderson-Bergman, C., 2017b. *icenReg : Regression Models for Interval Censored Data in R*. *Journal of Statistical Software* 81. <https://doi.org/10.18637/jss.v081.i12>
- Andriamampianina, L., Temple, L., de Bon, H., Malézieux, E., Makowski, D., 2018. Évaluation pluri-critères de l'agriculture biologique en Afrique subsaharienne par élicitation probabiliste des connaissances d'experts. *Cahiers Agricultures* 27, 45002. <https://doi.org/10.1051/cagri/2018030>
- ANSES, 2019. E-Phy - Le catalogue des produits phytopharmaceutiques et de leurs usages, des matières fertilisantes et des supports de culture autorisés en France [WWW Document]. URL <https://ephy.anses.fr/> (accessed 4.30.19).
- ANSES, 2018. Risque phytosanitaire portant sur *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* pour les départements d'outre-mer (Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective). Agence Nationale de Sécurité Sanitaire alimentation, environnement travail.
- ANSES, 2014. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'efficacité de vêtements de protection portés par les applicateurs de produits phytopharmaceutiques - Saisine n° 2011-SA-0216.
- Arena, M., Auteri, D., Barmaz, S., Bellisai, G., Brancato, A., Brocca, D., Bura, L., Byers, H., Chiusolo, A., Marques, D.C., Crivellente, F., Lentdecker, C.D., Egsmose, M., Erdos, Z., Fait, G., Ferreira, L., Goumenou, M., Greco, L., Ippolito, A., Istace, F., Jarrah, S., Kardassi, D., Leuschner, R., Lythgo, C., Magrans, J.O., Medina, P., Miron, I., Molnar, T., Nougadere, A., Padovani, L., Morte, J.M.P., Pedersen, R., Reich, H., Sacchi, A., Santos, M., Serafimova, R., Sharp, R., Stanek, A., Streissl, F., Sturma, J., Szentes, C., Tarazona, J., Terron, A., Theobald, A., Vagenende, B., Verani, A., Villamar-Bouza, L., 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* 16, e05152. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5152>
- Arena, M., Sgolastra, F., 2014. A meta-analysis comparing the sensitivity of bees to pesticides. *Ecotoxicology* 23, 324–334. <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1190-1>
- Association Technique Viticole 49, 2017. Fiche Tech'Viti - Mildiou.
- Aubertot, J.-N., Barbier, J.-M., Carpentier, A., Gril, J.-J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Voltz, M., Savini, I., 2005. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Rapport de l'expertise réalisée par l'INRA et le Cemagref à la demande du Ministère de l'agriculture et de la pêche (MAP) et du Ministère de l'écologie et du développement durable (MEDD), décembre.
- Australian Government - Department of Agriculture and Water Resources, 2014. Final report for the non-regulated analysis of existing policy for table grapes from Japan.
- Aveline, N., 2019. Liste des produits de biocontrôle homologués en viticulture (janvier

2019).

Baker, R.H.A., Anderson, H., Bishop, S., MacLeod, A., Parkinson, N., Tuffen, M.G., 2014. The UK Plant Health Risk Register: a tool for prioritizing actions. *EPPO Bulletin* 44, 187–194. <https://doi.org/10.1111/epp.12130>

Baker Ruth E., Peña Jose-Maria, Jayamohan Jayaratnam, Jérusalem Antoine, 2018. Mechanistic models versus machine learning, a fight worth fighting for the biological community? *Biology Letters* 14, 20170660. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0660>

Baldacci, E., 1947. Epifitite di *Plasmopara viticola* (1941-46) nell'Oltrepò Pavese ed adizione del calendario di incubazione come strumento di lotta.

Baldi, I., Cantagrel, A., Lebailly, P., Tison, F., Dubroca, B., Chrysostome, V., Dartigues, J.-F., Brochard, P., 2003a. Association between Parkinson's disease and exposure to pesticides in southwestern France. *Neuroepidemiology* 22, 305–310. <https://doi.org/10.1159/000071194>

Baldi, I., Filleul, L., Mohammed-Brahim, B., Fabrigoule, C., Dartigues, J.-F., Schwall, S., Drevet, J.-P., Salamon, R., Brochard, P., 2001. Neuropsychologic effects of long-term exposure to pesticides: results from the French Phytoneer study. *Environmental Health Perspectives* 109, 6.

Baldi, I., Gruber, A., Rondeau, V., Basler, P., Brochard, P., Fabrigoule, C., 2011. Neurobehavioral effects of long-term exposure to pesticides: results from the 4-year follow-up of the PHYTONER Study. *Occupational and Environmental Medicine* 68, 108–115. <https://doi.org/10.1136/oem.2009.047811>

Baldi, I., Lebailly, P., Jean, S., Rougetet, L., Dulaurent, S., Marquet, P., 2006. Pesticide contamination of workers in vineyards in France. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 16, 115–124. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500443>

Baldi, I., Lebailly, P., Mohammed-Brahim, B., Letenneur, L., Dartigues, J.-F., Brochard, P., 2003b. Neurodegenerative diseases and exposure to pesticides in the elderly. *American Journal of Epidemiology* 157, 409–414. <https://doi.org/10.1093/aje/kwf216>

Baldi, I., Lebailly, P., Rondeau, V., Bouchart, V., Blanc-Lapierre, A., Bouvier, G., Canal-Raffin, M., Garrigou, A., 2012. Levels and determinants of pesticide exposure in operators involved in treatment of vineyards: results of the PESTEXPO Study. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 22, 593–600. <https://doi.org/10.1038/jes.2012.82>

Banque mondiale, 2011. Weather index insurance for agriculture : guidance for development practitioners (No. 66274). The World Bank.

Barbottin, A., Makowski, D., Le Bail, M., Jeuffroy, M.-H., Bouchard, C., Barrier, C., 2008. Comparison of models and indicators for categorizing soft wheat fields according to their grain protein contents. *European Journal of Agronomy* 29, 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.05.004>

Barnett, G.D., Wakeling, H.C., Howard, P.D., 2010. An Examination of the Predictive Validity of the Risk Matrix 2000 in England and Wales. *Sexual Abuse: A Journal of Research and Treatment* 22, 443–470. <https://doi.org/10.1177/1079063210384274>

Beketov, M.A., Kefford, B.J., Schäfer, R.B., Liess, M., 2013. Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. *PNAS* 110, 11039–11043. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305618110>

Benford, D., Halldorsson, T., Jeger, M.J., Knutsen, H.K., More, S., Naegeli, H., Noteborn, H., Ockleford, C., Ricci, A., Rychen, G., Schlatter, J.R., Silano, V., Solecki, R., Turck, D.,

- Younes, M., Craig, P., Hart, A., Goetz, N.V., Koutsoumanis, K., Mortensen, A., Ossendorp, B., Martino, L., Merten, C., Mosbach-Schulz, O., Hardy, A., 2018. Guidance on Uncertainty Analysis in Scientific Assessments. *EFSA Journal* 16, e05123. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5123>
- Bernhardt, P.W., Wang, H.J., Zhang, D., 2014. Flexible Modeling of Survival Data with Covariates Subject to Detection Limits via Multiple Imputation. *Comput Stat Data Anal* 69. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2013.07.027>
- Bertocchi, D., Cattaneo, L., Pizzatti, C., Cortesi, P., 2010. Protection of grapevine against powdery mildew with fungicides applied at increasing disease incidence thresholds. *Giornate Fitopatologiche 2010, Cervia (RA), Italia, 9-12 marzo 2010. Atti, volume secondo* 305–310.
- Blaise, P., Gessler, C., 1992. Vinemild: toward a management tool for grape downy mildew. *Acta horticulturae*.
- Blouin, 2007. *Les parasites de la vigne: stratégies de protection raisonnée*. Dunod.
- Böcker, T., Finger, R., 2016. European pesticide tax schemes in comparison: An analysis of experiences and developments. *Sustainability* 8, 378.
- Bonicelli, B., Naud, O., Rousset, S., Sinfort, C., 2010. The challenge for precision spraying 12.
- Bouquet, A., 1980. *Vitis X Muscadinia hybridization: a new way in grape breeding for disease resistance in France*. Presented at the Proceedings of the 3rd International Symposium on Grape Breeding, Davis, Calif. (USA), 15-18 Jun 1980, Dept. of Vitic. and Enology.
- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Brittain, C.A., Vighi, M., Bommarco, R., Settele, J., Potts, S.G., 2010. Impacts of a pesticide on pollinator species richness at different spatial scales. *Basic and Applied Ecology* 11, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.11.007>
- Busi, R., Vila-Aiub, M.M., Beckie, H.J., Gaines, T.A., Goggin, D.E., Kaundun, S.S., Lacoste, M., Neve, P., Nissen, S.J., Norsworthy, J.K., Renton, M., Shaner, D.L., Tranel, P.J., Wright, T., Yu, Q., Powles, S.B., 2013. Herbicide-resistant weeds: from research and knowledge to future needs. *Evol Appl* 6, 1218–1221. <https://doi.org/10.1111/eva.12098>
- Butault, J.-P., Dedryver, C.-A., Gary, C., Guichard, L., Jacquet, F., Meynard, J.-M., Nicot, P., Pitrat, M., Reau, R., Sauphanor, B., 2010. *Ecophyto R&D - Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides* 92.
- Caffi, T., Leger, S., Carotenuto, E., Rossi, V., 2014. Year-to-year weather variability affects downy mildew epidemics in vineyards and should guide decisions regarding fungicide applications. *Agrochimica* 58, 77–90. <https://doi.org/DOI:10.1400/226733>
- Caffi, T., Rossi, V., Bugiani, R., 2010. Evaluation of a warning system for controlling primary infections of grapevine downy mildew. *Plant disease* 94, 709–716.
- Caffi, T., Rossi, V., Bugiani, R., Spanna, F., Flamini, L., Cossu, A., Nigro, C., 2009. A model predictiong primary infections of *Plasmopara viticola* in different grapevine-growing areas of Italy. *Journal of Plant Pathology* 14.
- Calonnec, A., Cartolaro, P., Delière, L., Chadoeuf, J., 2006. Powdery mildew on grapevine: the date of primary contamination affects disease development on leaves and damage on grape. *IOBC/wprs Bulletin* 29, 67–73.

- Calonnec, A., Cartolaro, P., Poupot, C., Dubourdiou, D., Darriet, P., 2004. Effects of *Uncinula necator* on the yield and quality of grapes (*Vitis vinifera*) and wine. Blackwell Publishing Ltd.
- Carisse, O., 2016. Development of grape downy mildew (*Plasmopara viticola*) under northern viticulture conditions: influence of fall disease incidence. *European Journal of Plant Pathology* 144, 773–783. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0748-y>
- Carriquiry, M.A., Osgood, D.E., 2012. Index insurance, probabilistic climate forecasts, and production. *Journal of Risk and Insurance* 79, 287–300.
- Chakir, R., Hardelin, J., 2010. Crop Insurance and Pesticides in French agriculture: an empirical analysis of multiple risks management (Cahiers de recherche).
- Chambre d'Agriculture de Gironde, 2018a. Bilan de campagne 2018 (Bilan de campagne No. 19).
- Chambre d'Agriculture de Gironde, 2018b. Bulletin de Santé du Végétal Nouvelle Aquitaine / Edition Centre Nouvelle Aquitaine Vigne - N°06 du 15 mai 2018 (Bulletin de Santé du Végétal No. 6).
- Chambre d'Agriculture de Gironde, 2015. Bilan de campagne 2015 (Bilan de campagne No. 24).
- Chambre d'Agriculture de Gironde, 2011. Bilan de campagne 2011 (Bilan de campagne No. 21).
- Chambre d'Agriculture du Tarn, Chambre d'Agriculture de Haute-Garonne, Chambre d'Agriculture du Lot, Chambre d'Agriculture du Tarn-et-Garonne, 2019. Tableau fongicides (2019).
- Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Makowski, D., 2018a. Timing of grape downy mildew onset in Bordeaux vineyards. *Phytopathology* PHYTO-12170412R. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-17-0412-R>
- Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Makowski, D., 2018b. Timing of grape downy mildew onset in Bordeaux vineyards. *Phytopathology*. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-17-0412-R>
- Chen, M., Chang, C.-H., Tao, L., Lu, C., 2015. Residential Exposure to Pesticide During Childhood and Childhood Cancers: A Meta-Analysis. *PEDIATRICS* 136, 719–729. <https://doi.org/10.1542/peds.2015-0006>
- Chen, W.-J., Delmotte, F., Cervera, S.R., Douence, L., Greif, C., Corio-Costet, M.-F., 2007. At Least Two Origins of Fungicide Resistance in Grapevine Downy Mildew Populations. *Applied and Environmental Microbiology* 73, 5162–5172. <https://doi.org/10.1128/AEM.00507-07>
- Chen, X.M., 2005. Epidemiology and control of stripe rust [*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*] on wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology* 27, 314–337.
- Clerjeau, M., 2005. La vigne. Aubertot JN, JM Barbier, A. Carpentier, JJ Gril, L. Guichard, P. Lucas, S. Savary, I. Savini, M. Voltz (éditeurs). Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Rapport d'Expertise scientifique collective, INRA et Cemagref (France).
- Code de l'environnement - Article L213-10-8, n.d. , Code de l'environnement.
- Commission européenne, 2007. The use of plant protection products in the European Union, data 1992-2003., Statistical books.

- Cooper, J., Dobson, H., 2007. The benefits of pesticides to mankind and the environment. *Crop Protection* 26, 1337–1348. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.03.022>
- Copes, W.E., Thomson, J.L., 2008. Survival analysis to determine the length of the incubation period of *Camellia* twig blight caused by *Colletotrichum gloeosporioides*. *Plant disease* 92, 1177–1182.
- Cox, D.R., 1972. Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 34, 187–220.
- Cox, L.A. (Tony), Babayev, D., Huber, W., 2005. Some Limitations of Qualitative Risk Rating Systems. *Risk Analysis* 25, 651–662. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00615.x>
- Dagostin, S., Schärer, H.-J., Pertot, I., Tamm, L., 2011. Are there alternatives to copper for controlling grapevine downy mildew in organic viticulture? *Crop Protection* 30, 776–788. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.02.031>
- Dalla Marta, A., De Vincenzi, M., Dietrich, S., Orlandini, S., 2005a. Neural network for the estimation of leaf wetness duration: application to a *Plasmopara viticola* infection forecasting. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 30, 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.08.016>
- Dalla Marta, A., Magarey, R.D., Orlandini, S., 2005b. Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.003>
- Dallot, S., Gottwald, T., Labonne, G., Quiot, J.-B., 2004. Factors affecting the spread of Plum pox virus strain M in peach orchards subjected to roguing in France. *Phytopathology* 94, 1390–1398.
- Damalas, C.A., Abdollahzadeh, G., 2016. Farmers' use of personal protective equipment during handling of plant protection products: Determinants of implementation. *Science of The Total Environment* 571, 730–736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.042>
- Damalas, C.A., Eleftherohorinos, I.G., 2011. Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 8, 1402–1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>
- Davy, A., 2008. Programme optidose. Des baisses de doses de 20 à 50% en moyenne. *Viti: de la vigne au vin* 14.
- Davy, A., Aveline, N., Davidou, L., Thiery, D., Delbac, L., Laveau, C., 2015. Une filière engagée dans des démarches de viticulture durable. *Union girondine des vins de Bordeaux* 6–8.
- de Almeida, R.A.C. dos S., Veiga, M.M., de Castro Moura Duarte, F.J., Meirelles, L.A., Veiga, L.B.E., 2012. Thermal comfort and personal protective equipment (PPE). *Work* 41 Suppl 1, 4979–4982. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0042-4979>
- Debord, C., Vergnes, M., Raynal, M., Dufour, M.-C., 2017. Web Alerte Vigne: un réseau de surveillance collaboratif.
- Delière, L., Cartolaro, P., Goutouly, J.-P., Barbier, J.-M., Bonicel, L., Forget, D., Leroy, P., Naud, O., Alonso Ugaglia, A., Del'homme, B., Davy, A., Davidou, L., Guilbault, P., Guisset, M., Guillois, F., 2013. Conception et transfert de systèmes décisionnels pour la réduction des traitements en viticulture : le projet SyDÉRÉT. *Innovations Agronomiques* 28, 155–168.
- Delière, Laurent, Cartolaro, P., Léger, B., Naud, O., 2015. Field evaluation of an expertise-

- based formal decision system for fungicide management of grapevine downy and powdery mildews: Decision system for management of grapevine mildews. *Pest Management Science* 71, 1247–1257. <https://doi.org/10.1002/ps.3917>
- Delière, L., Petitgenet, M., Delmotte, F., Forget, D., 2015. Itinéraires techniques et culture des variétés résistantes - Adaptation dans le cadre d'une viticulture à faible impact environnemental. *Revue des œnologues et des techniques viticoles et œnologiques*.
- Delmotte, F., Mestre, P., Schneider, C., Kassemeyer, H.-H., Kozma, P., Richart-Cervera, S., Rouxel, M., Delière, L., 2014. Rapid and multiregional adaptation to host partial resistance in a plant pathogenic oomycete: Evidence from European populations of *Plasmopara viticola*, the causal agent of grapevine downy mildew. *Infection, Genetics and Evolution* 27, 500–508. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2013.10.017>
- DeLorenzo, M.E., Scott, G.I., Ross, P.E., 2001. Toxicity of pesticides to aquatic microorganisms: A review. *Environmental Toxicology and Chemistry* 20, 84–98. <https://doi.org/10.1002/etc.5620200108>
- Develee, J.L.A., Knol, A.B., 2011. Software to support expert elicitation 100.
- D'hondt, B., Vanderhoeven, S., Roelandt, S., Mayer, F., Versteirt, V., Adriaens, T., Ducheyne, E., San Martin, G., Grégoire, J.-C., Stiers, I., Quoilin, S., Cigar, J., Heughebaert, A., Branquart, E., 2015. Harmonia+ and Pandora+: risk screening tools for potentially invasive plants, animals and their pathogens. *Biol Invasions* 17, 1869–1883. <https://doi.org/10.1007/s10530-015-0843-1>
- Direction générale des finances publiques, 2012. Taux de la taxe sur la valeur ajoutée (TVA) applicable aux produits phytopharmaceutiques et aux produits biocides.
- Directive 91/414/CEE du Conseil, du 15 juillet 1991, concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques, n.d.
- Dubos, B., 2002. Maladies cryptogamiques de la vigne - Les champignons parasites des organes herbacés et du bois de la vigne, Féret. ed, Collection des Usuels Féret de la Vigne et du Vin.
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., Martin, E., 1993. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of glaciology* 18, 65–71.
- Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Mérimol, L., Martin, E., 1999. A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journal of Glaciology* 45, 469–484.
- Esker, P.D., Gibb, K.S., Padovan, A., Dixon, P.M., Nutter, F.W., 2006. Use of survival analysis to determine the postincubation time-to-death of papaya due to yellow crinkle disease in Australia. *Plant Disease* 90, 102–107. <https://doi.org/10.1094/PD-90-0102>
- Espinoza, A.F., Hubert, A., Raineau, Y., Franc, C., Giraud-Héraud, É., 2018. Resistant grape varieties and market acceptance: an evaluation based on experimental economics. *OENO One* 52. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.3.2316>
- European Citizens' Initiative: Commission registers 'Save the bees!' initiative" [WWW Document], 2019. . europa.eu. URL [https://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-19-2472\\_en.htm](https://europa.eu/rapid/press-release_IP-19-2472_en.htm) (accessed 10.23.19).
- European Food Safety Authority, 2014a. Guidance on the assessment of exposure of operators, workers, residents and bystanders in risk assessment for plant protection products:

- Guidance on pesticides exposure assessment of operators, workers, residents and bystanders. EFSA Journal 12, 3874. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2014.3874>
- European Food Safety Authority, 2014b. Guidance on Expert Knowledge Elicitation in Food and Feed Safety Risk Assessment: Guidance on expert knowledge elicitation. EFSA Journal 12, 3734. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2014.3734>
- European Food Safety Authority, 2010. Guidance on a harmonised framework for pest risk assessment and the identification and evaluation of pest risk management options by EFSA. EFSA Journal 8, 1495. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1495>
- Evans, J.S., Gray, G.M., Sielken, R.L., Smith, A.E., Valdez-Flores, C., Graham, J.D., 1994. Use Probabilistic Expert Judgement in Uncertainty Analysis of Carcinogenic Potency. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 15–36.
- Falconer, K.E., 1998. Managing diffuse environmental contamination from agricultural pesticides: An economic perspective on issues and policy options, with particular reference to Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 69, 37–54. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(98\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00095-4)
- Falette, N., Kiss, A., Bayle, M.-L., Bouaoun, L., Scalbert, A., Fervers, B., 2018. Seasonal variations of exposure to agricultural pesticides in residents proximate to vineyards: SIGEXPOSOME study. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique, European Congress of Epidemiology "Crises, epidemiological transitions and the role of epidemiologists"* 66, S340. <https://doi.org/10.1016/j.respe.2018.05.279>
- Ficke, A., Gadoury, D.M., Seem, R.C., 2002. Ontogenic Resistance and Plant Disease Management: A Case Study of Grape Powdery Mildew. *Phytopathology* 92, 671–675. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2002.92.6.671>
- Finger, R., Möhring, N., Dalhaus, T., Böcker, T., 2017. Revisiting Pesticide Taxation Schemes. *Ecological Economics* 134, 263–266. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.12.001>
- FranceAgriMer, 2019. Vins et spiritueux - Commerce extérieur - Bilan 2018 (No. 52), Les Synthèses de FranceAgriMer.
- Friedman, J., Hastie, T., Tibshirani, R., 2010. Regularization Paths for Generalized Linear Models via Coordinate Descent. *J Stat Softw* 33, 1–22.
- Friedman, J.H., 2002. Stochastic gradient boosting. *Computational Statistics & Data Analysis, Nonlinear Methods and Data Mining* 38, 367–378. [https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(01\)00065-2](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(01)00065-2)
- Fungicide Resistante Action Commitee, 2019. FRAC Code List ©\*2019: Fungal control agents sorted by cross resistance pattern and mode of action.
- Galet, P., 1977. Les maladies et les parasites de la vigne : les maladies dues à des végétaux (champignons, bactéries, viroses et phanérogames)., Broché. ed, Les maladies et les parasites de la vigne. Imprimerie du Paysan du Midi, Montpellier.
- Garrett, K.A., Dendy, S.P., Frank, E.E., Rouse, M.N., Travers, S.E., 2006. Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. *Annu Rev Phytopathol* 44, 489–509. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143420>
- Garrett, K.A., Madden, L.V., Hughes, G., Pfender, W.F., 2004. New applications of statistical tools in plant pathology. *Phytopathology* 94, 999–1003.
- Garrigou, A., Baldi, I., Jackson, M., 2012. The use of pesticides in French viticulture: a badly

- controlled technology transfert. Work 19–25. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0130-19>
- Garthwaite, P.H., Kadane, J.B., O’Hagan, A., 2005. Statistical Methods for Eliciting Probability Distributions. *Journal of the American Statistical Association* 100, 680–701. <https://doi.org/10.1198/016214505000000105>
- Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., Weisser, W.W., Emmerson, M., Morales, M.B., Ceryngier, P., Liira, J., Tschardtke, T., Winqvist, C., Eggers, S., Bommarco, R., Pärt, T., Bretagnolle, V., Plantegenest, M., Clement, L.W., Dennis, C., Palmer, C., Oñate, J.J., Guerrero, I., Hawro, V., Aavik, T., Thies, C., Flohre, A., Hänke, S., Fischer, C., Goedhart, P.W., Inchausti, P., 2010. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic and Applied Ecology* 11, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.12.001>
- Gessler, C., Pertot, I., Perazzolli, M., 2011. *Plasmopara viticola*: a review of knowledge on downy mildew of grapevine and effective disease management. *Phytopathologia Mediterranea* 50, 3–44.
- Ghule, M.R., Sawant, I.S., Sawant, S.D., Sharma, R., Shouche, Y.S., 2018. Identification of *Fusarium* species as putative mycoparasites of *Plasmopara viticola* causing downy mildew in grapevines. *Australasian Plant Dis. Notes* 13, 16. <https://doi.org/10.1007/s13314-018-0297-2>
- Glauber, J.W., 2004. Crop insurance reconsidered. *American Journal of Agricultural Economics* 86, 1179–1195.
- Gobbin, D., Jermini, M., Loskill, B., Pertot, I., Raynal, M., Gessler, C., 2005. Importance of secondary inoculum of *Plasmopara viticola* to epidemics of grapevine downy mildew. *Plant Pathology* 54, 522–534. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01208.x>
- Goulson, D., 2013. REVIEW: An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology* 50, 977–987. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12111>
- Gren, I.-M., 1994. Regulating the Farmers’ use of Pesticides in Sweden, in: Opschoor, H., Turner, K. (Eds.), *Economic Incentives and Environmental Policies: Principles and Practice*, Environment, Science and Society. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 153–173. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-0856-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0856-0_8)
- Grigore, B., Peters, J., Hyde, C., Stein, K., 2016. A comparison of two methods for expert elicitation in health technology assessments. *BMC Medical Research Methodology* 16. <https://doi.org/10.1186/s12874-016-0186-3>
- Grillet, J.P., Adjémian, A., Bernadac, G., Bernon, J., Brunner, F., Garnier, R., 2004. Arsenic exposure in the wine growing industry in ten French departments. *Int Arch Occup Environ Health* 77, 130–135. <https://doi.org/10.1007/s00420-003-0490-1>
- Grimbuhler, S., Viel, J.-F., 2018. Physiological strain in French vineyard workers wearing protective equipment to conduct re-entry tasks in humid conditions. *Annals of Work Exposures and Health* 62, 1040–1046. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxy056>
- Großkopf, C., Mielke, H., Westphal, D., Erdtmann-Vourliotis, M., Hamey, P., Bouneb, F., Rautmann, D., Stauber, F., Wicke, H., Maasfeld, W., Salazar, J.D., Chester, G., Martin, S., 2013. A new model for the prediction of agricultural operator exposure during professional application of plant protection products in outdoor crops. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit* 8, 143–153. <https://doi.org/10.1007/s00003-013-0836-x>
- Grünzel, H., 1961. Untersuchungen über die Oosporenbildung beim Falschen Mehltau der Weinrebe (*Peronospora viticola* de Bary). *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten*

(Pflanzenpathologie) und Pflanzenschutz 68, 65–80.

Harteveld, D.O.C., Grant, M.R., Pscheidt, J.W., Peever, T.L., 2017. Predicting Ascospore Release of *Monilinia vaccinii-corymbosi* of Blueberry with Machine Learning. *Phytopathology* 107, 1364–1371. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-17-0162-R>

Hill, G.K., 2000. Simulation of *P. viticola* oospore-maturation with the model SIMPO. *Simulation of P. viticola oospore-maturation with the model SIMPO*. 23, 7–8.

Hossard, L., Guichard, L., Pelosi, C., Makowski, D., 2017. Lack of evidence for a decrease in synthetic pesticide use on the main arable crops in France. *Science of The Total Environment* 575, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.008>

IFV, n.d. Quelles solutions pour la maîtrise des maladies ? La modélisation des risques parasitaires.

Imfeld, G., Vuilleumier, S., 2012. Measuring the effects of pesticides on bacterial communities in soil: A critical review. *European Journal of Soil Biology, Bioindication in Soil Ecosystems* 49, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.010>

INAO, 2016. Guide du demandeur d'une Appellation d'origine contrôlée / Appellation d'origine protégée (AOC/AOP) ou d'une Indication géographique protégée (IGP).

INRA, 2019. UMT SEVEN - Capture de la sporée aérienne [WWW Document]. URL <https://www6.inra.fr/umt-seven/Actualites/Commencement-d-une-these/Capture-de-la-sporée-aérienne> (accessed 10.21.19).

INSERM, 2013. Pesticides - Effets Sur La Santé. Inserm.

Jensen, J.E., 2015. Perspectives on the implementation of IPM in EU – An advisory perspective.

Jensen, S.E., 2000. Insecticide Resistance in the Western Flower Thrips, *Frankliniella occidentalis*. *Integrated Pest Management Reviews* 5, 131–146. <https://doi.org/10.1023/A:1009600426262>

Jermi, M., Blaise, P., Gessler, C., 2010. Quantitative effect of leaf damage caused by downy mildew (*Plasmopara viticola*) on growth and yield quality of grapevine “Merlot” (*Vitis vinifera*). *Vitis* 77–85.

Jha, K., Doshi, A., Patel, P., Shah, M., 2019. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture* 2, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2019.05.004>

Journal officiel de l'Union européenne, 2009. Directive 2009/128/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), 309.

Kab, S., Moisan, F., Spinosi, J., Chaperon, L., Elbaz, A., 2018. Incidence de la maladie de Parkinson chez les agriculteurs et en population générale en fonction des caractéristiques agricoles des cantons français. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire* 157–167.

Kab, S., Spinosi, J., Chaperon, L., Dugravot, A., Singh-Manoux, A., Moisan, F., Elbaz, A., 2017. Agricultural activities and the incidence of Parkinson's disease in the general French population. *European Journal of Epidemiology* 32, 203–216. <https://doi.org/10.1007/s10654-017-0229-z>

Kenis, M., Bacher, S., Baker, R.H.A., Branquart, E., Brunel, S., Holt, J., Hulme, P.E.,

- MacLeod, A., Pergl, J., Petter, F., Pyšek, P., Schrader, G., Sissons, A., Starfinger, U., Schaffner, U., 2012. New protocols to assess the environmental impact of pests in the EPPO decision-support scheme for pest risk analysis\*. *EPPO Bulletin* 42, 21–27. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2012.02527.x>
- Kennelly, M.M., Gadoury, D.M., Wilcox, W.F., Magarey, P.A., Seem, R.C., 2007. Primary infection, lesion productivity, and survival of sporangia in the grapevine downy mildew pathogen *Plasmopara viticola*. *Phytopathology* 97, 512–522.
- Kennelly, M.M., Gadoury, D.M., Wilcox, W.F., Magarey, P.A., Seem, R.C., 2005. Seasonal development of ontogenic resistance to downy mildew in grape berries and rachises. *Phytopathology* 95, 1445–1452.
- Kiefer, B., Riemann, M., Büche, C., Kassemeyer, H.-H., Nick, P., 2002. The host guides morphogenesis and stomatal targeting in the grapevine pathogen *Plasmopara viticola*. *Planta* 215, 387–393. <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0760-2>
- Kim, K.-H., Kabir, E., Jahan, S.A., 2017. Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Science of The Total Environment* 575, 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>
- Lacombe, T., Audeguin, L., Boselli, M., Bucchetti, B., Cabello, F., Chatelet, P., Crespan, M., D’Onofrio, C., Dias, J.E., Ercisli, S., Gardiman, M., Grando, M.S., Imazio, S., Jandurova, O., Jung, A., Kiss, E., Kozma, P., Maul, E., Maghradze, D., Martinez, M.C., Muñoz, G., Pátková, J.K., Pejic, I., Peterlunger, E., Pitsoli, D., Preiner, D., Raimondi, S., Regner, F., Savin, G., Savvides, S., Schneider, A., Spring, J.L., Szoke, A., Veres, A., Boursiquot, J.M., Bacilieri, R., This, P., 2011. Grapevine European catalogue: Towards a comprehensive list. *Vitis - Journal of Grapevine Research* 50, 65–68.
- Lamichhane, J.R., Dachbrodt-Saaydeh, S., Kudsk, P., Messéan, A., 2015. Toward a Reduced Reliance on Conventional Pesticides in European Agriculture. *Plant Disease* 100, 10–24. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-15-0574-FE>
- Launay, M., Caubel, J., Bourgeois, G., Huard, F., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Bancal, M.-O., Brisson, N., 2014. Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate change impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 197, 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.020>
- Launès, S., Reulet, P., Delière, L., Petitgenet, M., 2015. Tour d’horizon des outils disponibles en viticulture et perspectives. *Union girondine des vins de Bordeaux* 89–92.
- Le Magueresse-Battistoni, B.L., Labaronne, E., Vidal, H., Naville, D., 2017. Endocrine disrupting chemicals in mixture and obesity, diabetes and related metabolic disorders. *WJBC* 8, 108. <https://doi.org/10.4331/wjbc.v8.i2.108>
- Le Moigne, P., 2002. Description de l’analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN.
- Lebailly, P., Bouchart, V., Baldi, I., Lecluse, Y., Heutte, N., Gislard, A., Malas, J.-P., 2009. Exposure to pesticides in open-field farming in France. *Ann Occup Hyg* 53, 69–81. <https://doi.org/10.1093/annhyg/men072>
- Leroy, P., Smits, N., Cartolaro, P., Delière, L., Goutouly, J.-P., Raynal, M., Alonso Ugaglia, A., 2013. A bioeconomic model of downy mildew damage on grapevine for evaluation of control strategies. *Crop Protection* 53, 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.05.024>
- Lescot, J.-M., Rouire, M., Raynal, M., Rousset, S., 2013. Bio-economic modelling of wine grape protection strategies for environmental policy assessment. Presented at the 133rd EAAE

- Seminar «Developing Integrated and Reliable Modelling Tools for Agricultural and Environmental Policy Analysis», Chania, Crete, Greece.
- Lessler, J., Cummings, D.A.T., 2016. Mechanistic Models of Infectious Disease and Their Impact on Public Health. *Am J Epidemiol* 183, 415–422. <https://doi.org/10.1093/aje/kww021>
- Liakos, K.G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., Bochtis, D., 2018. Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors* 18, 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Liang, C., Zang, C., McDermott, M.I., Zhao, K., Yu, S., Huang, Y., 2016. Two imide substances from a soil-isolated *Streptomyces atratus* strain provide effective biocontrol activity against grapevine downy mildew. *Biocontrol Science and Technology* 26, 1337–1351. <https://doi.org/10.1080/09583157.2016.1199014>
- Libery, B., Kneafsey, M., 1998. Product and Place: Promoting Quality Products and Services in the Lagging Rural Regions of the European Union. *European Urban and Regional Studies* 5, 329–341. <https://doi.org/10.1177/096977649800500404>
- Lichtenstein, S., Fischhoff, B., Phillips, LD., 1982. Calibration of Probabilities: The State of the Art to 1980, in: *Judgement under Uncertainty: Heuristics and Biases*. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, p. 69.
- Lucas, J.A., Hawkins, N.J., Fraaije, B.A., 2015. The evolution of fungicide resistance. *Adv. Appl. Microbiol.* 90, 29–92. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2014.09.001>
- MacFarlane, E., Carey, R., Keegel, T., El-Zaemay, S., Fritschi, L., 2013. Dermal Exposure Associated with Occupational End Use of Pesticides and the Role of Protective Measures. *Safety and Health at Work* 4, 136–141. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2013.07.004>
- Madden, L.V., Ellis, M.A., Lalancette, N., Hughes, G., Wilson, L.L., 2000. Evaluation of a Disease Warning System for Downy Mildew of Grapes. *Plant Disease* 84, 549–554. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.5.549>
- Magarey, P.A., Wachtel, M.F., Weir, P.C., Seem, R.C., 1991. A computer-based simulator for rational management of grapevine downy mildew (*Plasmopara viticola*). *Plant Protection Quarterly* 6, 29–33.
- Magarey, R.D., Isard, S.A., 2017. A Troubleshooting Guide for Mechanistic Plant Pest Forecast Models. *J Integr Pest Manag* 8. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmw015>
- Magnien, C., Jacquin, D., Muckensturm, N., Guillemard, P., 1991. MILVIT: un modèle descriptif et quantitatif de la phase asexuée du mildiou de la vigne. Présentation et premiers résultats de validation1. *EPPO Bulletin* 21, 451–459. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.1991.tb01275.x>
- Mahlein, A.-K., 2015. Plant Disease Detection by Imaging Sensors – Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping. *Plant Disease* 100, 241–251. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>
- Mailly, F., Hossard, L., Barbier, J.-M., Thiollet-Scholtus, M., Gary, C., 2017. Quantifying the impact of crop protection practices on pesticide use in wine-growing systems. *European Journal of Agronomy* 84, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.12.005>
- Makowski, D., Mittinty, M.N., 2010. Comparison of Scoring Systems for Invasive Pests Using ROC Analysis and Monte Carlo Simulations: Comparison of Scoring Systems for Invasive Pests Using ROC Analysis and Monte Carlo Simulations. *Risk Analysis* 30, 906–915. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01393.x>
- Makowski, D., Tichit, M., Guichard, L., Van Keulen, H., Beaudoin, N., 2009. Measuring the

- accuracy of agro-environmental indicators. *Journal of Environmental Management* 90, S139–S146. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.023>
- Mamane, A., Raheison, C., Tessier, J.-F., Baldi, I., Bouvier, G., 2015. Environmental exposure to pesticides and respiratory health. *Eur Respir Rev* 24, 462–473. <https://doi.org/10.1183/16000617.00006114>
- Maqbool, F., Mostafalou, S., Bahadar, H., Abdollahi, M., 2016. Review of endocrine disorders associated with environmental toxicants and possible involved mechanisms. *Life Sciences* 145, 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2015.10.022>
- Martinelli, F., Scalenghe, R., Davino, S., Panno, S., Scuderi, G., Ruisi, P., Villa, P., Stroppiana, D., Boschetti, M., Goulart, L.R., Davis, C.E., Dandekar, A.M., 2015. Advanced methods of plant disease detection. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 1–25. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0246-1>
- McDougall, P., 2013. R&D trends for chemical crop protection products and the position of the European Market - A consultancy study undertaken for ECPA.
- McMahon, T.A., Halstead, N.T., Johnson, S., Raffel, T.R., Romansic, J.M., Crumrine, P.W., Rohr, J.R., 2012. Fungicide-induced declines of freshwater biodiversity modify ecosystem functions and services. *Ecol. Lett.* 15, 714–722. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01790.x>
- Mehra, L.K., Cowger, C., Gross, K., Ojiambo, P.S., 2016. Predicting Pre-planting Risk of *Stagonospora nodorum* blotch in Winter Wheat Using Machine Learning Models. *Front. Plant Sci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00390>
- Menesatti, P., Antonucci, F., Costa, C., Mandalà, C., Battaglia, V., la Torre, A., 2015. Multivariate forecasting model to optimize management of grape downy mildew control. *VITIS - Journal of Grapevine Research* 52, 141–148.
- Mézière, D., Gary, C., Barbier, J.-M., Bernos, L., Clément, C., Constant, N., Delière, L., Forget, D., Grosman, J., Molot, B., Rio, P., Sauvage, D., Sentenac, G., 2009. Analyse comparative de différents systèmes en viticulture. *Ecophyto R&D III*, 84.
- Michel, L., 2016. Mieux valoriser les réseaux d'épidémiologie lors de l'élaboration du Bulletin de Santé du Végétal. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech).
- Michel, L., Brun, F., Makowski, D., 2017a. A framework based on generalised linear mixed models for analysing pest and disease surveys. *Crop Protection* 94, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.12.013>
- Michel, L., Brun, F., Makowski, D., 2017b. A framework based on generalised linear mixed models for analysing pest and disease surveys. *Crop Protection* 94, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.12.013>
- Michel, L., Brun, F., Piraux, F., Makowski, D., 2016. Estimating the incidence of *Septoria* leaf blotch in wheat crops from in-season field measurements. *European journal of plant pathology* 146, 17–35.
- Mildiou [WWW Document], n.d. . [www.vignevin-charentes.com](http://www.vignevin-charentes.com). URL [http://www.vignevin-charentes.com/fileadmin/users/charente/Protection\\_du\\_vignoble/maladies\\_et\\_ravageurs/Fichiers/MILDIOU.pdf](http://www.vignevin-charentes.com/fileadmin/users/charente/Protection_du_vignoble/maladies_et_ravageurs/Fichiers/MILDIOU.pdf) (accessed 10.21.19).
- Millner, A., Calel, R., Stainforth, D.A., MacKerron, G., 2013. Do probabilistic expert elicitation capture scientists' uncertainty about climate change? *Climatic Change* 116, 427–

436. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0620-4>

Mineau, P., 2005. A Review and Analysis of Study Endpoints Relevant to the Assessment of “Long Term” Pesticide Toxicity in Avian and Mammalian Wildlife. *Ecotoxicology* 14, 775–799. <https://doi.org/10.1007/s10646-005-0028-2>

Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt, 2018a. Le plan Écophyto, qu’est-ce que c’est? | Alim’agri [WWW Document]. Alim’agri. URL <http://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest> (accessed 10.4.18).

Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt, 2018b. Infographie - La viticulture [WWW Document]. URL <https://agriculture.gouv.fr/infographie-la-viticulture> (accessed 10.22.19).

Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt, 2015. Plan ECOPHYTO II.

Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt, 2008. écophyto 2018.

Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt, n.d. A propos des enquêtes pratiques culturelles [WWW Document]. agreste - Les statistique, l’évaluation et la prospective agricole. URL <http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/pratiques-culturelles/a-propos-des-enquetes-pratiques/> (accessed 10.22.19).

Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt, Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018. Ecophyto - Note de suivi 2017.

Mishra, A.K., Wesley Nimon, R., El-Osta, H.S., 2005. Is moral hazard good for the environment? Revenue insurance and chemical input use. *Journal of Environmental Management* 74, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.08.003>

Moisan, F., Spinosi, J., Delabre, L., Gourlet, Mazurie, J.-L., Bénatru, I., Goldberg, M., Weisskopf, M., Imbernon, Tzourio, C., Elbaz, A., 2015. Association of Parkinson’s Disease and Its Subtypes with Agricultural Pesticide Exposures in Men: A Case–Control Study in France. *Environmental Health Perspectives* 123, 1123–1129. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307970>

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

Morgan, M.G., 2014. Use (and abuse) of expert elicitation in support of decision making for public policy. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 7176–7184. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319946111>

Morris, D.E., Oakley, J.E., Crowe, J.A., 2014. A web-based tool for eliciting probability distributions from experts. *Environmental Modelling & Software* 52, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.010>

Morrissey, C.A., Mineau, P., Devries, J.H., Sanchez-Bayo, F., Liess, M., Cavallaro, M.C., Liber, K., 2015. Neonicotinoid contamination of global surface waters and associated risk to aquatic invertebrates: A review. *Environment International* 74, 291–303. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.024>

Mostafalou, S., Abdollahi, M., 2017. Pesticides: an update of human exposure and toxicity. *Arch Toxicol* 91, 549–599. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1849-x>

Moyer, M.M., Gadoury, D.M., Wilcox, W.F., Seem, R.C., 2016. Weather During Critical Epidemiological Periods and Subsequent Severity of Powdery Mildew on Grape Berries. *Plant Disease* 100, 116–124. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-14-1278-RE>

- Nelder, J.A., Wedderburn, R.W.M., 1972. Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)* 135, 370–384. <https://doi.org/10.2307/2344614>
- Newbery, F., Qi, A., Fitt, B.D., 2016. Modelling impacts of climate change on arable crop diseases: progress, challenges and applications. *Current Opinion in Plant Biology, Biotic interactions* 32, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.07.002>
- Norton, M., Sprundel, G.-J. van, Turvey, C.G., Meuwissen, M.P.M., 2016. Applying weather index insurance to agricultural pest and disease risks. *International Journal of Pest Management* 62, 195–204. <https://doi.org/10.1080/09670874.2016.1184773>
- Oakley, J.E., 2018. SHELF: tools to support the Sheffield elicitation framework. R package version 1.4.0.
- Oerke, E.-C., Dehne, H.-W., 2004. Safeguarding production—losses in major crops and the role of crop protection. *Crop Protection* 23, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.10.001>
- O’Hagan, A., 2012. Probabilistic uncertainty specification: Overview, elaboration techniques and their application to a mechanistic model of carbon flux. *Environmental Modelling & Software* 36, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.03.003>
- O’Hagan, A., Buck, C.E., Daneshkhah, A., Eiser, J.R., Garthwaite, P.H., Jenkinson, D.J., Oakley, J.E., Rakow, T., 2006. *Uncertain Judgements: Eliciting Experts’ Probabilities*. John Wiley & Sons.
- Oïdium [WWW Document], n.d. . [www.vignevin-charentes.com](http://www.vignevin-charentes.com). URL [http://www.vignevin-charentes.com/fileadmin/users/charente/Protection\\_du\\_vignoble/maladies\\_et\\_ravageurs/Fichiers/OIDIUM.pdf](http://www.vignevin-charentes.com/fileadmin/users/charente/Protection_du_vignoble/maladies_et_ravageurs/Fichiers/OIDIUM.pdf)
- Ojiambo, P.S., Kang, E.L., 2013. Modeling spatial frailties in survival analysis of cucurbit downy mildew epidemics. *Phytopathology* 103, 216–227.
- Olatinwo, R., Hoogenboom, G., 2014. Chapter 4 - Weather-based Pest Forecasting for Efficient Crop Protection, in: Abrol, D.P. (Ed.), *Integrated Pest Management*. Academic Press, San Diego, pp. 59–78. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398529-3.00005-1>
- OMS, 2018. Pesticide residues in food [WWW Document]. URL <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/pesticide-residues-in-food> (accessed 7.16.19).
- Onofri, A., Piepho, H.-P., Kozak, M., 2019. Analysing censored data in agricultural research: A review with examples and software tips. *Annals of Applied Biology* 174, 3–13. <https://doi.org/10.1111/aab.12477>
- Optimiser les traitements fongicides sur les maladies de la vigne au moyen d’un outil d’aide à la décision | EcophytoPIC [WWW Document], 2019. . EcophytoPIC. URL <http://www.ecophytopic.fr/tr/cepp/cepp-viti-oad2> (accessed 10.22.19).
- Organisation Internationale du Vin, 2019. 2019 Statistical report on world vitiviniculture (Rapport statistique annuel).
- Orlandini, S., Gozzini, B., Rosa, M., Egger, E., Storchi, P., Maracchi, G., Miglietta, F., 1993. PLASMO: a simulation model for control of *Plasmopara viticola* on grapevine1. *EPPO Bulletin* 23, 619–626. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.1993.tb00559.x>
- Otway, H., Winterfeldt, D. von, 1992. Expert Judgment in Risk Analysis and Management: Process, Context, and Pitfalls. *Risk Analysis* 12, 83–93. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1992.tb01310.x>

- Park, E.W., Seem, R.C., Gadoury, D.M., Pearson, R.C., 1997. DMCAST: a prediction model for grape downy mildew development. *Viticultural and Enological Sciences* 52, 182–189.
- Pedneault, K., Provost, C., 2016. Fungus resistant grape varieties as a suitable alternative for organic wine production: Benefits, limits, and challenges. *Scientia Horticulturae* 208, 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.03.016>
- Pellegrini, A., Prodorutti, D., Frizzi, A., Gessler, C., Pertot, I., 2010. Development and evaluation of a warning model for the optimal use of copper in organic viticulture. *Journal of Plant Pathology* 14.
- Pelosi, C., Barot, S., Capowiez, Y., Hedde, M., Vandebulcke, F., 2014. Pesticides and earthworms. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 199–228. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0151-z>
- Pertot, I., Caffi, T., Rossi, V., Mugnai, L., Hoffmann, C., Grando, M.S., Gary, C., Lafond, D., Duso, C., Thiery, D., Mazzoni, V., Anfora, G., 2017. A critical review of plant protection tools for reducing pesticide use on grapevine and new perspectives for the implementation of IPM in viticulture. *Crop Protection* 97, 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.025>
- Pezzoli, G., Cereda, E., 2013. Exposure to pesticides or solvents and risk of Parkinson disease. *Neurology* 80, 2035. <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e318294b3c8>
- Pheloung, P.C., Williams, P.A., Halloy, S.R., 1999. A weed risk assessment model for use as a biosecurity tool evaluating plant introductions. *Journal of Environmental Management* 57, 239–251. <https://doi.org/10.1006/jema.1999.0297>
- Pibouleau, L., Chevret, S., 2014. An Internet-based method to elicit expert's beliefs for Bayesian priors: a case study in intracranial stent evaluation. *International Journal of Technology Assessment in Health Care* 30, 446–453. <https://doi.org/10.1017/S0266462314000403>
- Pimentel, D., 2005. Environmental and Economic Costs of the Application of Pesticides Primarily in the United States. *Environment, Development and Sustainability* 7, 229–252. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-7314-2>
- Provost, D., Cantagrel, A., Lebailly, P., Jaffre, A., Loyant, V., Loiseau, H., Vital, A., Brochard, P., Baldi, I., 2007. Brain tumours and exposure to pesticides: a case-control study in southwestern France. *Occupational and Environmental Medicine* 64, 509–514. <https://doi.org/10.1136/oem.2006.028100>
- Quintana Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 92–107. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>
- R Core Team, 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Raherison, C., Baldi, I., Pouquet, M., Berteaud, E., Moesch, C., Bouvier, G., Canal-Raffin, M., 2019. Pesticides exposure by air in vineyard rural area and respiratory health in children: a pilot study. *Environ. Res.* 169, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.002>
- Raynal, M., Coulon, T., n.d. De la lutte raisonnée à la production intégrée.
- Raynal, M., Debord, C., Guittard, S., Vergnes, M., 2010. Epicure, a geographic information system applied on downy and powdery mildew risks of epidemics on the Bordeaux vineyard. Presented at the INRA-ISVV, ed. sixth international workshop on the grapevine downy and powdery mildew, Bordeaux, France, pp. 144–146.

- Raynal, M., Debord, C., Vergnes, M., Delfour, B., Bennabi, A., Georges, M., Fulchic, R., Servant, J., 2015. Etude des variations de sensibilité d'un vignoble contre les principales maladies cryptogamiques de la vigne: zonage d'Unités de Fonctionnement Physiologique à priori homogènes.
- Raynal, M., Guittard, S., Debord, C., Davy, A., Plancq, T., Vergnes, M., Codis, S., Hebrard, O., 2012. Decision Support Systems in viticulture: Current situation and perspectives. Presented at the MoDeM\_IVM conference at Vinitech, Bordeaux.
- Région Nouvelle Aquitaine, n.d. VitiREV: Innovons pour des territoires VITicoles REspectueux de l'EnVironnement - Présentation du projet.
- Ridgeway, G., n.d. Generalized Boosted Models: A guide to the gbm package 15.
- Rieder, R., Pavan, W., Carré Maciel, J.M., Cunha Fernandes, J.M., Sarroglia Pinho, M., 2014. A virtual reality system to monitor and control diseases in strawberry with drones: a project. Presented at the 7th International Congress on Env. Modelling and Software, Daniel P. Ames, Nigel W.T. Quinn and Andrea E. Rizzoli, San Diego.
- Robin, X., Turck, N., Hainard, A., Tiberti, N., Lisacek, F., Sanchez, J.-C., Müller, M., 2011. pROC: an open-source package for R and S+ to analyze and compare ROC curves. *BMC Bioinformatics* 12, 77. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-77>
- Rosa, M., Gozzini, B., Orlandini, S., Seghi, L., 1995. A computer program to improve the control of grapevine downy mildew. *Computers and Electronics in Agriculture* 12, 311–322. [https://doi.org/10.1016/0168-1699\(95\)00007-Q](https://doi.org/10.1016/0168-1699(95)00007-Q)
- Ross, J., Driver, J., Lunchick, C., O'Mahony, C., 2015. Models for estimating human exposure to pesticides. *Outlooks on Pest Management* 26, 33–37. [https://doi.org/10.1564/v26\\_feb\\_09](https://doi.org/10.1564/v26_feb_09)
- Rossi, V., Caffi, T., 2007. Effect of water on germination of *Plasmopara viticola* oospores. *Plant Pathology* 56, 957–966. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01685.x>
- Rossi, V., Caffi, T., Bugiani, R., Spanna, F., Della Valle, D., 2008a. Estimating the germination dynamics of *Plasmopara viticola* oospores using hydro-thermal time. *Plant Pathology* 57, 216–226. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01738.x>
- Rossi, V., Caffi, T., Giosuè, S., Bugiani, R., 2008b. A mechanistic model simulating primary infections of downy mildew in grapevine. *Ecological Modelling* 212, 480–491. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.10.046>
- Rossi, V., Caffi, T., Melandri, M., Pradolesi, G., 2005. Aggiornamenti sulla peronospora della vite 38–56.
- Rossi, V., Giosuè, S., Girometta, B., Bugiani, R., 2002. Influenza delle condizioni meteorologiche sulle infezioni primarie di *Plasmopara viticola* in Emilia-Romagna. *Atti Giornate Fitopatologiche* 263–270.
- Rossi, V., Salinari, F., Poni, S., Caffi, T., Bettati, T., 2014. Addressing the implementation problem in agricultural decision support systems: the example of vite.net®. *Computers and Electronics in Agriculture* 100, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.011>
- Rouille jaune : traiter tôt en cas d'attaque [WWW Document], 2016. . Arvalis-info.fr. URL <https://www.arvalis-infos.fr/la-rouille-jaune-une-maladie-a-caractere-explosif-@/view-12560-arvarticle.html> (accessed 10.22.19).
- Rouzet, J., Jacquin, D., 2003. Development of overwintering oospores of *Plasmopara viticola* and severity of primary foci in relation to climate\*. *EPPO Bulletin* 33, 437–442.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2003.00670.x>

Salinari, F., Giosuè, S., Tubiello, F.N., Rettori, A., Rossi, V., Federico, S., Cynthia, R., Maria Lodovica, G., 2006. Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biol* 12, 1299–1307. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01175.x>

Sánchez-Bayo, F., Goka, K., Hayasaka, D., 2016. Contamination of the Aquatic Environment with Neonicotinoids and its Implication for Ecosystems. *Front. Environ. Sci.* 4. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00071>

Sarraudy, M.-C., Le Plat, C., 2017. Les journées IARD - L'assurance indicielle.

Savary, S., Delbac, L., Rochas, A., Taisant, G., Willocquet, L., 2009. Analysis of Nonlinear Relationships in Dual Epidemics, and Its Application to the Management of Grapevine Downy and Powdery Mildews. *Phytopathology* 99, 930–942. <https://doi.org/10.1094/PHTO-99-8-0930>

Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S.J., Esker, P., McRoberts, N., Nelson, A., 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat Ecol Evol* 3, 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>

Scherm, H., Ojiambo, P.S., 2004. Applications of survival analysis in botanical epidemiology. *Phytopathology* 94, 1022–1026.

Schmidt, R.J., Kogan, V., Shelton, J.F., Delwiche, L., Hansen, R.L., Ozonoff, S., Ma, C.C., McCanlies, E.C., Bennett, D.H., Hertz-Picciotto, I., Tancredi, D.J., Volk, H.E., 2017. Combined Prenatal Pesticide Exposure and Folic Acid Intake in Relation to Autism Spectrum Disorder. *Environ Health Perspect* 125, 097007. <https://doi.org/10.1289/EHP604>

Schneider, C., Prado, E., Onimus, C., Ley, L., Forget, D., Barbeau, G., Audeguin, L., Merdinoglu, D., 2014. ResDur, le programme Inra de création de variétés de vigne de cuve résistantes aux maladies cryptogamiques et de bonne qualité œnologique. *UGVB* 62–68.

Seidler, A., Hammer, G., Husmann, G., König, J., Krtschil, A., Schmidtman, I., Blettner, M., 2008. Cancer risk among residents of Rhineland-Palatinate winegrowing communities: a cancer-registry based ecological study. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* 3, 12. <https://doi.org/10.1186/1745-6673-3-12>

Service de la Statistique et de la Prospection, 2019a. Enquête Pratiques phytosanitaires en viticulture en 2016 (No. 2019–2), Agreste Les Dossiers.

Service de la Statistique et de la Prospection, 2019b. Pratiques culturelles en grandes cultures 2017 (No. 2019–3), Agreste Chiffres et Données.

Service de la Statistique et de la Prospection, 2018. Les résultats économiques des exploitations agricoles en 2017 - Données du Réseau d'Information Comptable Agricole, Rapport annuel RICA.

Service de la Statistique et de la Prospection, 2017. La viticulture - Memento 2017.

Service de la Statistique et de la Prospection, 2016a. L'évolution des traitements phytosanitaires entre 2011 et 2014 (No. 36), Agreste Les Dossiers.

Service de la Statistique et de la Prospection, 2016b. Pratiques culturelles en viticulture 2013 - Réduire la dose, une pratique répandue pour les traitements fongicides (No. 343), Agrest Primeur.

Service de la Statistique et de la Prospection, 2015a. Enquête Pratique culturelles en viticulture

- 2013 - Nombre de traitements phytosanitaires (No. 28), Les Dossiers. Service de la Statistique et de la Prospective (SSP).
- Service de la Statistique et de la Prospection, 2015b. Enquête Pratiques culturales en viticulture 2013. Nombre de traitements phytosanitaires. Agreste Les Dossiers.
- Service de la Statistique et de la Prospection, 2012. Fortes disparités de protection contre l'oïdium et le mildiou (No. 298), Agrest Primeur.
- Service de la Statistique et de la Prospection, 2009. Pratiques culturales en viticulture en 2006. Agreste Chiffres et Données 47.
- Shunthirasingham, C., Oyiliagu, C.E., Cao, X., Gouin, T., Wania, F., Lee, S.-C., Pozo, K., Harner, T., Muir, D.C.G., 2010. Spatial and temporal pattern of pesticides in the global atmosphere. *Journal of environmental monitoring: JEM* 12, 1650–1657. <https://doi.org/10.1039/c0em00134a>
- Sine, M., Morin, E., Simonneau, D., Cosnac, G.D., Escriou, H., 2010. VIGICULTURES – An early warning system for crop pest management 9.
- Sinfort, C., Cotteux, E., Bonicelli, B., Ruelle, B., Douchin, M., Berenger, M., Lagrevol, J., Liet, O., 2009. Influence des conditions et matériels de pulvérisation sur les pertes de pesticides au sol et dans l'air en viticulture Languedocienne 5.
- Skakkebaek, N.E., Rajpert-De Meyts, E., Buck Louis, G.M., Toppari, J., Andersson, A.-M., Eisenberg, M.L., Jensen, T.K., Jørgensen, N., Swan, S.H., Sapra, K.J., Ziebe, S., Priskorn, L., Juul, A., 2016. Male Reproductive Disorders and Fertility Trends: Influences of Environment and Genetic Susceptibility. *Physiol Rev* 96, 55–97. <https://doi.org/10.1152/physrev.00017.2015>
- Skevas, T., Stefanou, S.E., Lansink, A.O., 2012. Can economic incentives encourage actual reductions in pesticide use and environmental spillovers? *Agric. Econ.* 43, 267–276. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2012.00581.x>
- Sozzani, F., Morando, A., Lavezzaro, S., 2010. Grapevine protection against powdery mildew in piedmont: control of on-going infections. *Giornate Fitopatologiche 2010, Cervia (RA), Italia, 9-12 marzo 2010. Atti, volume secondo* 311–316.
- Statut des résistances en France – R4P, n.d. URL <https://www.r4p-inra.fr/fr/statut-des-resistances-en-france/> (accessed 7.18.19).
- Strizyk, S., 1994. Une deuxième génération de modèles systémiques: les potentiels systèmes. Vers une utilisation appuyée sur réseaux de stations météorologiques, in: Groupe de Travail 'Biosystèmes En Viticulture', *Annales ANPP, 3e Conférence Internationale Sur Les Maladies Des Plantes*. pp. 1447–54.
- Stryzik, S., 1983. Modèle d'état potentiel d'infection: application a *Plasmopara viticola*.
- Taylor, A.S., Cook, D.C., 2018. An economic assessment of the impact on the Western Australian viticulture industry from the incursion of grapevine downy mildew. *J Plant Dis Prot* 125, 397–403. <https://doi.org/10.1007/s41348-018-0152-x>
- Thakur, A.K., 1991. Model: Mechanistic vs Empirical, in: Rescigno, A., Thakur, A.K. (Eds.), *New Trends in Pharmacokinetics, NATO ASI Series*. Springer US, Boston, MA, pp. 41–51. [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8053-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8053-5_3)
- Thiessen, L.D., Keune, J.A., Neill, T.M., Turechek, W.W., Grove, G.G., Mahaffee, W.F., 2016. Development of a grower-conducted inoculum detection assay for management of grape powdery mildew. *Plant Pathology* 65, 238–249. <https://doi.org/10.1111/ppa.12421>

- Thouvenin, I., Bouneb, F., Mercier, T., 2017. Operator dermal exposure and protection provided by personal protective equipment and working coveralls during mixing/loading, application and sprayer cleaning in vineyards. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 23, 229–239. <https://doi.org/10.1080/10803548.2016.1195130>
- Tibshirani, R., 1996. Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 58, 267–288.
- Tran Manh Sung, C., Strizyk, S., Clerjeau, M., 1990. Simulation of the Date of Maturity of *Plasmopora viticola* Oospores to Predict the Severity of Primary Infections in Grapevine. *Plant Disease* 74, 120–124.
- Urruty, N., Deveaud, T., Guyomard, H., Boiffin, J., 2016. Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture. *European Journal of Agronomy* 80, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.07.004>
- van Maanen, A., Xu, X.-M., 2003. Modelling Plant Disease Epidemics. *European Journal of Plant Pathology* 109, 669–682. <https://doi.org/10.1023/A:1026018005613>
- Venables, W.N., Ripley, B.D., n.d. *Modern Applied Statistics with S* 504.
- Vercesi, A., Sirtori, C., Vavassori, A., Setti, E., Liberati, D., 2000. Estimating germinability of *Plasmopara viticola* oospores by means of neural networks. *Med. Biol. Eng. Comput.* 38, 109–112. <https://doi.org/10.1007/BF02344698>
- Vercesi, A., Toffolatti, S.L., Zocchi, G., Guglielmann, R., Ironi, L., 2010. A new approach to modelling the dynamics of oospore germination in *Plasmopara viticola*. *European Journal of Plant Pathology* 128, 113–126. <https://doi.org/10.1007/s10658-010-9635-8>
- Vercesi, A., Tornaghi, R., Sant, S., Burruano, S., Faoro, F., 1999. A cytological and ultrastructural study on the maturation and germination of oospores of *Plasmopara viticola* from overwintering vine leaves. *Mycological Research* 103, 193–202. <https://doi.org/10.1017/S095375629800700X>
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.-M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30, 1627–1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- Viel, J.F., Challier, B., 1995. Bladder cancer among French farmers: does exposure to pesticides in vineyards play a part? *Occupational and Environmental Medicine* 52, 587–592. <https://doi.org/10.1136/oem.52.9.587>
- Wallsten, T., Budescu, D., Rapoport, A., Zwick, R., Forsyth, B., 1986. Measuring the Vague Meanings of Probability Terms. *Journal of Experimental Psychology* 115, 348–365.
- Westra, A.A.G., Arneson, C.P., Slack, S.A., 1994. Effect of Interaction of Inoculum Dose, cultivar, and geographic location on the development of foliar symptoms of bacterial ring rot of potato. *Phytopathology* 84, 410–415.
- Winter, J.R., Green, L.E., 2018. Quantifying the beliefs of key players in the UK sheep industry on the efficacy of two treatments for footrot. *The Veterinary Journal* 239, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2018.07.009>
- Wong, F.P., Burr, H.N., Wilcox, W.F., 2001. Heterothallism in *Plasmopara viticola*. *Plant Pathology* 50, 427–432. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2001.00573.x>
- Wright, M.N., Ziegler, A., 2017. ranger: A Fast Implementation of Random Forests for High Dimensional Data in C++ and R. *Journal of Statistical Software* 77, 1–17. <https://doi.org/10.18637/jss.v077.i01>

- Zachos, D.G., 1959. Recherches sur la biologie et l'épidémiologie du mildiou de la vigne en Grèce. Ann. Inst. Phytopathol. Benaki 2, 193–335.
- Zadoks, J.C., Schein, R.D., 1979. Epidemiology and plant disease management. Epidemiology and plant disease management.
- Zhang, X., Zhou, Y., Li, Y., Fu, X., Wang, Q., 2017. Screening and characterization of endophytic Bacillus for biocontrol of grapevine downy mildew. Crop Protection 96, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.02.018>



PARTIE VII

—

ANNEXES

## Annexes de l'introduction

Annexe A : Annexe III de la directive 2009/128/CE - Principes généraux de la lutte intégrée des cultures. Par soucis de commodité, le titre de chaque principe a été abrégé. Tableau tiré de Barzman et al. (2015).

| Principe                       | Actions possibles  |
|--------------------------------|--|
| 1 – Prévention et suppression  | <p>La prévention et/ou la suppression des organismes nuisibles devraient être réalisées ou soutenues parmi d'autres options, en particulier par :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• La rotation des cultures,</li><li>• L'utilisation de techniques de culture adéquates (faux-semis, dates et densités de semis, sur-semis, travail de conservation du sol, semis direct, taille etc.),</li><li>• L'utilisation, le cas échéant, de cultivars résistants ou tolérants et de semences et plants certifiés,</li><li>• L'utilisation de pratiques de fertilisation équilibrée, de chaulage et d'irrigation ou de drainage,</li><li>• La prévention de la propagation d'organismes nuisibles par des mesures d'hygiène (nettoyage régulier des machines et du matériel, etc.),</li><li>• La protection et la favorisation d'organismes auxiliaires importants, par exemple par des mesures phytosanitaires adéquates ou l'utilisation d'infrastructures écologiques à l'intérieur et à l'extérieur des sites de production.</li></ul> |
| 2 – Suivi                      | <p>Les organismes nuisibles doivent être suivis au moyen de méthodes et d'outils adéquats, le cas échéant. Sont compris dans ces outils :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Les observations sur le terrain</li><li>• Les systèmes d'alerte, de prévision et de diagnostic précoce scientifiquement fondés, lorsque cela est possible,</li><li>• Le recours aux recommandations de conseillers professionnels qualifiés.</li></ul>   |
| 3 – Décision de l'intervention | <p>A partir des résultats de la surveillance, l'utilisateur doit décider si une intervention est nécessaire et si oui, à quel moment doit-elle avoir lieu. La prise de décision doit se baser sur des seuils fiables et scientifiquement solides. En ce qui concerne les organismes nuisibles, les niveaux seuils définis pour la région, le bassin de production, les cultures et les conditions climatiques spécifiques doivent être pris en compte avant les traitements, si possible.</p>  |

|  |  |
|--|--|
| 4 – Utilisation de méthodes non chimiques        | Les méthodes biologiques, physiques et autres méthodes non chimiques doivent être préférées aux méthodes chimiques si elles permettent une lutte antiparasitaire satisfaisante.  |
| 5 – Choix d'un produit adapté                    | Les pesticides appliqués doivent être aussi spécifiques que possible pour la cible et avoir le moins d'effets secondaires possibles sur la santé humaine, les organismes non cibles et l'environnement.  |
| 6 – Raisonnement des traitements                 | <p>L'utilisateur doit limiter l'utilisation de pesticides et autres formes d'intervention à ce qui est nécessaire en considérant que le niveau de risque dans la végétation est acceptable et qu'il n'augmente pas le risque de développement d'une résistance chez les populations d'organismes nuisibles. Le raisonnement des traitements peut s'effectuer à travers :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La réduction de la dose appliquée,</li> <li>• La réduction de la fréquence d'application,</li> <li>• L'application partielle des traitements.</li> </ul> |
| 7 – Limiter l'apparition de résistances          | Lorsque le risque de résistance à une mesure phytosanitaire est connu et que le niveau d'organismes nuisibles exige l'application répétée de pesticides sur les cultures, les stratégies anti-résistance disponibles devraient être appliquées pour maintenir l'efficacité des produits. Cela peut inclure l'utilisation de plusieurs pesticides ayant des modes d'action différents.  |
| 8 – Evaluation de l'efficacité de l'intervention | Le succès de l'intervention doit être évaluée sur la base des données relatives à l'utilisation des pesticides et à la surveillance des organismes nuisibles.  |

Annexe B : Bulletin de Santé du Végétal Nouvelle Aquitaine Edition Nord Aquitaine n° 6 édité le 30 avril 2019 (source : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt Nouvelle Aquitaine).



# Bulletin de Santé du Végétal

## Nouvelle-Aquitaine



### Vigne

**N°06**  
**30/04/2019**



**Animateur filière**  
Marie-Hélène MARTIGNE  
Chambre d'agriculture  
de Gironde  
[mh.martigne@gironde.chambagri.fr](mailto:mh.martigne@gironde.chambagri.fr)

Suppléance :  
François BALLOUHEY  
Chambre d'agriculture  
de Dordogne  
[Francois.ballouhey@dordogne.chambagri.fr](mailto:Francois.ballouhey@dordogne.chambagri.fr)

**Directeur de publication**  
Dominique GRACIET  
Président de la Chambre  
Régionale Nouvelle-Aquitaine  
Boulevard des Arcades  
87060 LIMOGES Cedex 2  
[accueil@na.chambagri.fr](mailto:accueil@na.chambagri.fr)

**Supervision**  
DRAAF  
Service Régional  
de l'Alimentation  
Nouvelle-Aquitaine  
22 Rue des Pénitents Blancs  
87000 LIMOGES  
Supervision site de Bordeaux

Reproduction intégrale  
de ce bulletin autorisée.  
Reproduction partielle autorisée  
avec la mention « extrait du  
bulletin de santé du végétal  
Nouvelle-Aquitaine Vigne /  
Edition Nord Aquitaine  
N°6 du 30/04/19 »



**Edition Nord Aquitaine**  
(Départements 24/33/47)

Bulletin disponible sur [bsv.na.chambagri.fr](http://bsv.na.chambagri.fr) et sur le site de la DRAAF  
[draaf.nouvelle-aquitaine.agriculture.gouv.fr/Bulletin-de-sante-du-vegetal](http://draaf.nouvelle-aquitaine.agriculture.gouv.fr/Bulletin-de-sante-du-vegetal)

Recevez le Bulletin de votre choix **GRATUITEMENT**  
en cliquant sur [Formulaire d'abonnement au BSV](#)

Consultez les **événements agro-écologiques** près de chez vous !

### Ce qu'il faut retenir

#### Phénologie

- Stade moyen « **F12 – 5 à 6 Feuilles étalées, grappes visibles** ».

#### Prévisions météorologiques

- **Temps instable vendredi (prévisions météo incertaines, à surveiller).**

#### Mildiou

**Risque faible (contaminations pré-épidémiques) pouvant évoluer à favorable (contaminations épidémiques) selon les secteurs et les conditions climatiques annoncées.**

#### Black-rot

- **Contaminations prévues en cas de pluie.**

#### Oïdium

- **Contaminations pré-épidémiques prévues sur parcelle à historique.**

#### Cicadelles vertes

- **Premiers adultes observés**

#### Vers de la grappe

**Vois se poursuivent. Pontes observées.**

- ☞ **Remontez-nous vos relevés de pièges !**

Le bulletin de cette semaine est réalisé à partir des données d'observations du réseau de parcelles, complétées par des données « tour de plaine ».

La qualité des données du BSV dépend, en grande partie, de la qualité et de la taille du réseau d'observations du vignoble Aquitain. Participez, vous aussi, tout au long de la saison à l'amélioration du réseau d'observations du BSV en multipliant vos signalements (maladies, ravageurs, événements climatiques...) sur le site [Web Alerte Vigne](#) ou sur l'[application smartphone Web Alerte Vigne](#)

## Données météorologiques de la semaine passée

### • Températures

Les températures ont été plus fraîches la semaine dernière. En effet, la température moyenne observée en nord Aquitaine a perdu 2°C par rapport à la semaine précédente, soit 12,6°C (entre 11,3°C à Monbazillac (24) et 13,6°C à St Livrade (47)). Les températures moyennes minimales les plus basses ont été enregistrées à Villefranche de Lonchat (24), 8,1°C (9,2°C en moyenne sur le nord Aquitaine), et les températures moyennes maximales les plus élevées ont été enregistrées Parempuyre (33), 18,5°C (17,2°C en moyenne sur le nord Aquitaine).

### • Pluviométries

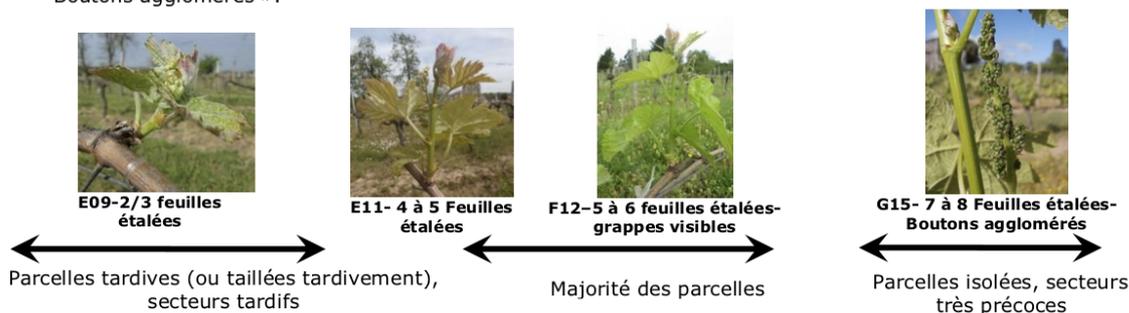
La semaine passée a été particulièrement pluvieuse. Le cumul moyen est de 44,5 mm. Sur nos stations, le plus fort cumul a été enregistré à Listrac (33) avec 81 mm. Le vignoble Girondin a été le plus arrosé (50mm), suivi de près par le Lot-et-Garonne et la Dordogne (env. 40 mm).

## Etat général du vignoble

### • Stades phénologiques

Le temps pluvieux et frais a ralenti la pousse de la vigne (3 à 15 cm, et 1 feuille en moyenne gagnée en 1 semaine). Malgré cela, la surface foliaire des feuilles existantes a continué à augmenter et les inflorescences se sont allongées. Le stade moyen observé, en nord Aquitaine, est le stade « F12 - 5 à 6 Feuilles étalées, grappes visibles ».

De plus, nous observons toujours, sur des parcelles isolées et abritées, et sur secteurs plus précoces un stade plus avancé « F13- 6 à 7 Feuilles étalées, grappes visibles » voire « G15 - 7 à 8 Feuilles étalées - Boutons agglomérés ».



Les pampres sont de plus en plus visibles et nombreuses aux pieds et dans la tête.

**Sur les vignes gelées ou zone gelée**, les contre-bourgeons continuent à sortir et se trouvent entre le stade « C03 - Bourgeons dans le coton » et « D06 - Eclatement du Bourgeon »



Bourgeon gelé - Contre-bourgeons  
© M-Charlotte MICHAUD - CA33

## Maladies fongiques

### • Mildiou

#### Rappel des éléments de biologie

Les conditions nécessaires pour les contaminations de mildiou sont les suivantes :

- Œufs de Mildiou mûrs,
- Vigne réceptive (au moins 1 feuille étalée),
- Températures moyennes supérieures à 11°C,
- Pluviométrie suffisante.

#### Méthodes alternatives :

- Éliminez les pampres qui sont plus particulièrement sensibles aux contaminations primaires de par leur proximité avec le sol (surtout en début de saison).
- Limiter la vigueur des vignes au potentiel de récolte nécessaire et suffisant aux objectifs de production.
- Réduire l'humidité des parcelles (enherbement maîtrisé, gérer les couverts semés, drainage, combler les mouillères...).

#### Modélisation (source IFV)

Les simulations sont établies à partir d'hypothèses météorologiques avec des hauteurs moyennes de pluie suivantes :

- |                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| • H1 : absence de pluie        | soit 0 mm.   |
| • H2 (la plus probable) : 1 mm | soit 1 mm.   |
| • H3 : 0.5 mm, 3 mm et 6 mm    | soit 9.5 mm. |

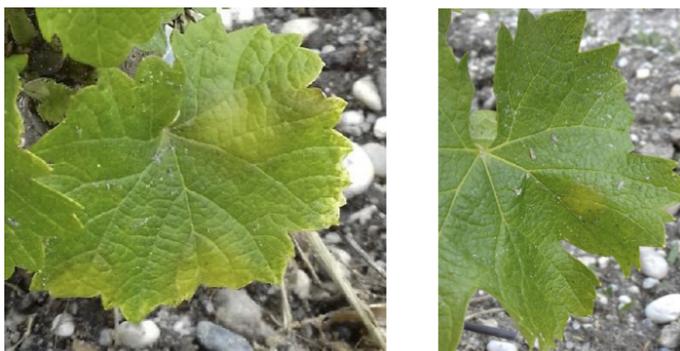
Les températures restent assez constantes. Les minimales seront de 7°C et les maximales de 21 °C.

Les deux hypothèses météorologiques H1 et H3 n'ont que 10% de chance d'être dépassées et constituent une limite à la zone d'incertitude due à la prévision météorologique.

| Situation de J-7 à J  | Simulation de J à J+3   |
|---|---|
| <p>Les hauteurs de pluie enregistrées sont très proches des prévisions de mardi dernier. Cela s'est donc traduit par l'installation d'un risque potentiel fort sur les vignobles médocain, du nord du blayais, du Libournais-Fronsadais, des Graves-Sauternais, des Côtes du Marmandais, Ouest du Buzet et Ouest des Côtes du Brulhois.</p> <p>Les indices décrivant la phase préparatoire de l'épidémie suivent une évolution plus lente que celles prévues initialement mardi dernier. Les températures plus fraîches que celles annoncées en sont probablement la cause.</p> <p>Le <b>modèle</b> a enregistré des contaminations pré épidémiques sur tout le territoire. Il a <b>indiqué</b> également des <b>contaminations épidémiques liées aux hauteurs de pluie de mardi dernier qu'il considère comme un événement atypique et favorisant</b>. Elles ont été peu nombreuses : la FTA atteint aujourd'hui 0.01% ce qui est très faible.</p> | <p>La quasi absence de précipitations devraient favoriser une baisse du niveau de risque potentiel de fort à faible. Seuls le Sud Est du Bordelais, le centre du Médoc, et le Libournais resteront à un niveau fort. En cas de pluies plus abondantes et proches de H3, le risque potentiel s'aggraverait partout en passant à un niveau fort voire très fort à l'exception de l'Est Entre Deux Mers où il serait encore faible.</p> <p>Cette semaine, les petites pluies pourraient favoriser le développement pour l'ensemble du territoire des contaminations pré épidémiques et déclencher les toutes premières contaminations épidémiques sur la moitié Sud du Médoc. La FTA sur ce secteur n'augmente que de 0.002 point. <b>En cas de pluies plus fortes (H3), les contaminations se généraliserait quasiment sur la presque totalité du territoire.</b> Les valeurs de FTA resterait encore très faible et parviendrait jusqu'à 0.07 %.</p> |

Observation :

Une tache de Mildiou a été observée le 25/04 sur une feuille, d'un jeune plant de Sémillon, située proche du sol (cf. photo, source CA33), secteur sauternais. Depuis, aucune nouvelle tâche ne nous a été remontée sur cette même parcelle.



Tache de Mildiou  
© E. LAVEAU - CA33

**Evaluation du risque 2019 :**

Suite à des conditions exceptionnelles liées aux orages du 23 et 24/04, le modèle a détecté des contaminations dites « atypiques ». Des éventuelles taches pourraient sortir d'ici début de semaine prochaine.

**Selon le modèle, des contaminations pré-épidémiques sont annoncées en cas de petites pluies (< à 2mm) sauf pour la moitié du sud médoc où il s'agirait de faibles contaminations épidémiques. Cependant, en cas de pluies un peu plus importantes, les premières contaminations épidémiques pourront se généraliser sur le vignoble.**

La réceptivité de la vigne est atteinte.

A ce jour, un temps instable est annoncé Vendredi prochain pour cette semaine (prévisions météo incertaines). **Vérifiez bien les prévisions météo sur votre secteur.**

**Situation globale**

▲ **Risque faible (contaminations pré-épidémiques) pouvant devenir favorable (contaminations épidémiques) en cas de pluies plus importantes**

**Situation sur vignoble situé sur la moitié du Sud Médoc**

▲ **Risque favorable (contaminations épidémiques) en cas de pluies**

\*Cf. *Rappel Modélisation BSV n°3 du 9/04/18*

## • Black-rot

### Rappel des éléments de biologie

**Le black-rot se conserve l'hiver sur les baies momifiées** (grappillons non récoltés, restés accrochés au palissage, ou tombés sur le sol), les vrilles, les feuilles infectées tombées au sol et sur les chancres présents sur les sarments, sous forme de conceptacles indifférenciés qui évoluent en périthèces durant l'hiver et au printemps. Au printemps l'augmentation de la température, associée à une humidité importante, induit la production d'ascospores qui sont projetées durant plusieurs mois des périthèces matures ; celles-ci contaminent la vigne, notamment les feuilles et les jeunes baies, et sont responsables des contaminations primaires en présence d'une humidité relative suffisante pendant au minimum 6 heures. Les contaminations primaires peuvent se faire sur de longues distances grâce au vent qui transporte les ascospores. Par la suite, des ponctuations brunes à noires apparaissent sur les tissus altérés, ce sont les pycnides qui contiennent des conidies qui assureront des contaminations secondaires surtout sur les jeunes baies situées en dessous. Les contaminations secondaires se font sur de courtes distances grâce aux pluies et aux éclaboussures qui projettent les conidies.

Le black-rot a besoin de pluies fréquentes et durables et de températures comprises entre 9°C et au maximum 32°C, son optimum se situant autour de 26°C.

**Le feuillage de la vigne est réceptif de la sortie des premières feuilles à quelques jours après la floraison.**

### Facteurs favorisants :

- Présence de baies contaminées momifiées (grappillons non récoltés, restés accrochés au palissage, ou tombés sur le sol) sur la parcelle. Proximité d'une parcelle abandonnée et contaminée.
- Humidité stagnante sur les parcelles.

### Fiche pratique en ligne : INRA

#### Méthodes alternatives :

- Éliminez les baies momifiées (grappillons non récoltés, restés accrochés au palissage) lors de la taille ou du pliage.
- Réduire l'humidité des parcelles (enherbement maîtrisé, drainage, combler les mouillères...).

### Modélisation (source IFV)

| Situation de J-7 à J   | Simulation de J à J+3  |
|--|--|
| Les conditions climatiques ont affaibli le risque potentiel sur la grande majorité du territoire et plus particulièrement le Médoc, le Bourgeais-Blayais et le Libournais. Sur cette grande zone, le niveau est faible alors que le reste du territoire conserve un niveau fort. Le modèle a indiqué des contaminations épidémiques au cours de la semaine passée. | Le Nord devrait connaître une hausse graduelle de son niveau de risque potentiel durant les jours à venir.<br><br>Aucune réelle évolution de l'installation de la maladie n'est annoncée : la FTA n'augmente en moyenne que de 0.09 point. Dans des conditions plus humides (H3), la FTA progresserait de 1.3 point. |

**FTA : Fréquence Théorique d'Attaque**

### Observation :

Quelques rares taches marron sans pycnides ou décolorées sont observées au vignoble. Cela demandera une confirmation plus précise dans les jours à venir, si cela correspond bien à du Black rot.

#### Evaluation du risque 2019 :

**Selon le modèle, des contaminations sont annoncées qu'en cas de pluie.**



**Risque favorable en cas de pluie**

## • Oïdium

### Rappel des éléments de biologie

En façade Atlantique, le champignon se conserve, l'hiver, sous forme d'œufs appelés cléistothèces qui, une fois mures, libèrent des ascospores (organes de contamination primaire). Les contaminations suivantes sont réalisées par des conidies qui sont disséminées par voie aérienne, essentiellement par le vent. Ce champignon ne nécessite pas d'eau liquide pour germer et se développer, cependant il requiert une hygrométrie élevée et une faible luminosité. Les pluies fines sont favorables à l'oïdium tandis que les pluies fortes les lessivent. Les spores germent en conditions naturelles à des températures comprises entre 4°C et 35-40°C, avec un optimum de l'ordre de 25 à 30°C avec une humidité relative comprise entre 40 % et 100 %.

[Fiche pratique en ligne : INRA](#)

### Facteurs favorisants :

Vigne vigoureuse, entassement de végétation et forte épaisseur de rognage.

### Méthodes alternatives :

- Limitez la vigueur des vignes,
- Privilégiez les conduites favorisant l'aération de la vigne : Dédoublage, Epamprage de la tête.

### Modélisation (source IFV)

| Situation de J-7 à J  | Simulation de J à J+3   |
|---|---|
| Exceptés les secteurs du centre du Médoc, du Libournaise, le modèle indique un niveau de risque potentiel toujours fort. D'après le modèle, les contaminations pré-épidémiques sont généralisées. Les contaminations épidémiques ont débuté un peu partout sur le vignoble mais sont encore très faibles: la FTA est inférieure à 0.01 %. | La quasi absence de pluie de cette semaine tendra à positionner la presque totalité du territoire à un niveau de risque potentiel fort. Le modèle n'annonce que quelques nouvelles contaminations pré-épidémiques pour ces prochains jours. |

FTA : Fréquence Théorique d'Attaque

### Evaluation du risque 2019 :

Le stade de sensibilité des grappes (G15- Boutons agglomérés) n'est toujours pas atteint. **Selon le modèle, des contaminations pré-épidémiques sont toujours prévues qu'en cas de nouvelles pluies.**

#### Situation globale :



#### Parcelle à historique ayant atteint le stade 5 à 6 Feuilles étalées :



## Ravageurs

### • Erinose

Quelques symptômes d'Erinose sont toujours observés restant de faible intensité. Pour rappel, ces symptômes sont sans grande conséquence pour la vigne mais plutôt un problème d'esthétisme. La pousse de la vigne va diluer sa présence et les auxiliaires de la vigne vont maîtriser leur développement.

#### Lutte prophylactique

Favoriser les populations de Typhlodromes.



**Symptôme d'Erinose**

© A. LOUSSOUARN – FRAB AGROBIO GIRONDE

 Consultez la fiche « [érinose](#) » du Guide de l'Observateur

### • Cigariers

Sur certaines parcelles historiques (hors réseau BSV), des cigares (Cf. photo ci-contre) sont toujours observés ponctuellement, pouvant devenir réguliers.

Pour rappel, ils sont formés par des cigariers (Cf. photo ci-dessous) qui enroulent les feuilles pour pondre leurs œufs. Le seul moyen efficace est d'éliminer les cigares en les ramassant, lors de vos épamprages ou ébourgeonnage, en les mettant dans une poche que vous brûlerez.



**Cigariier**

© M-Charlotte MICHAUD - CA33

### • Escargots, mange-bourgeons, limaces

De rares dégâts d'escargots et de mange-bourgeons sont toujours observés sur certaines parcelles du réseau BSV, sans grande incidence pour la vigne. En parallèle, il nous été signalé sur une parcelle située dans les Graves la présence de manière importante de limaces (source Ets Touzan, cf. photo ci-dessous).



**Dégâts d'escargots et de mange-bourgeons**

© A. KEREBEL – FREDON Aquitaine

**Limace**

© N. POPPE – ETS TOUZAN

### • Cicadelles vertes

Les premiers adultes sont observés au vignoble. A ne pas confondre avec la cicadelle italienne (cf. photo ci-dessous).



Cicadelle verte adulte et Cicadelle italienne adulte  
© E. LAVEAU -CA33

### • Vers de la grappe

Les réseaux de piégeage sexuel sont mis en place sur le Nord Aquitaine. Les relevés de pièges permettent de suivre la dynamique du vol des tordeuses. Ceci nous indiquera les périodes pour aller réaliser les observations sur le terrain (pontes, dégâts) qui permettront d'estimer le niveau pression de ce ravageur.



© INRA

[Eudémis : Fiche pratique INRA](#)



© CTIFL

[Eulia : Fiche pratique en ligne](#)



© A. KEREBEL-FREDON AQUITAINE

[Cnephasia sp](#)



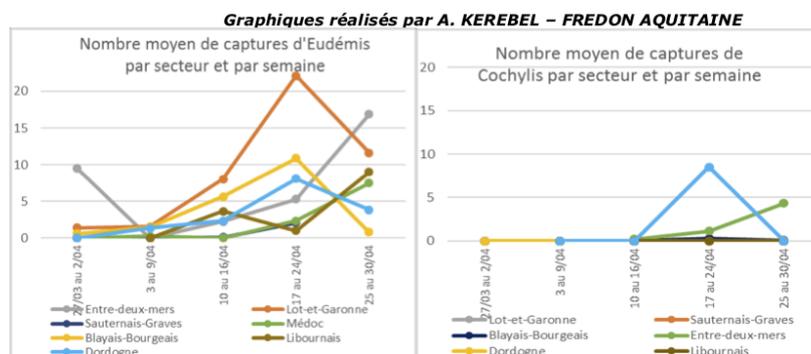
© INRA

[Cochylis : Fiche pratique INRA](#)

#### ☛ Attention à ne pas confondre l'Eudémis avec :

- **le papillon d'Eulia (Cf. photo)**, comme la chenille d'ailleurs, ressemble au papillon d'Eudémis mais il est plus massif. Eulia est une tordeuse jusque-là plutôt rare dans notre région mais qui est apparue de façon beaucoup plus notable en 2016.
- **Cnephasia sp (Cf. photo)** qui est plus sur des tons grisâtres, et de plus grande taille (1 à 1,5 cm). Cette tordeuse n'est pas un ravageur de la vigne mais consomme diverses plantes de la bande enherbée.

#### ➤ Suivi des vols :



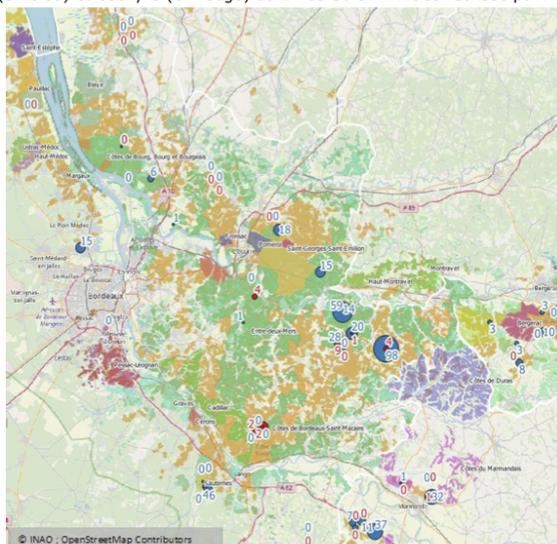
⚠ Pour cette semaine, ces données sont à prendre avec précautions car les relevés des pièges ne sont pas systématiques réalisés et peuvent ainsi induire une augmentation du vol. **Remontez-nous vos relevés de pièges !**

- **Eudémis** : Le nombre de captures a significativement diminué sur l'ensemble du vignoble au cours des derniers jours. Les conditions météorologiques (baisse températures et précipitations) ont perturbé le vol des tordeuses. Des captures élevées ont toutefois été observées sur certaines parcelles (Entre-Deux-Mers, Médoc et Libournais).

- **Cochylis** :

La dynamique de vol de Cochylis est difficile à définir, car le nombre de pièges relevé est relativement faible. Toutefois, dans l'Entre-Deux-Mers, où le nombre de pièges suivis est le plus important, le nombre de captures a significativement augmenté au cours des 7 derniers jours. Ailleurs, les captures semblent avoir diminué.

Carte des captures d'Eudémis (en bleu) et Cochylis (en rouge) du 24 au 30 avril inclus réalisée par Anthony KEREBEL (FREDON)



Observation :

Des pontes d'Eudémis ont été à nouveau observées cette semaine dans les secteurs des Graves (source Ets TOUZAN) et Sauternais (source CA33). Concernant, la parcelle du Sauternais, il s'agit d'une parcelle à fort historique Vers de grappe qui a été fortement grêlée l'année dernière.



**Ponte sur bractée d'une inflorescence**  
© C. DELACROIX – DA Conseil et E. LAVEAU –CA33

☞ Pour rappel, ces observations sont à effectuer en ce moment au niveau des bractées florales (25 inflorescences minimum) à l'aide d'une loupe.

➔ **Aucun risque à ce jour. Ce n'est qu'à l'approche de la floraison que l'évaluation des risques, basée sur des observations de dégâts sur les inflorescences, peut être effective.**

#### Méthodes alternatives :

Les mises en place des diffuseurs de phéromones utilisés pour la confusion sexuelle doivent être effectuées avant le démarrage du 1<sup>er</sup> vol.

### **Prochain bulletin : le mardi 7 mai**

**Les structures partenaires dans la réalisation des observations nécessaires à l'élaboration du Bulletin de santé du végétal Nouvelle-Aquitaine - Vigne / Edition Nord Aquitaine sont les suivantes :** Adar de Castillon et de Ste Foy, Adar de Coutras, Adar des 2 Rives, Adar Haute Gironde, Adar de Langon, Adar du Médoc, Agrobio Gironde, Agrobio Périgord, Antenne Saint Emilion, BGD Conseils, Cave Sauveterre-Blasimon-Espiet, Cave de Buzet, Cave Louis Vallon, Cave du Marmandais, Cave de Monbazillac, Cave des Vignerons de Tutiac, Caves de Rauzan-Grangeneuve, Cave de Sigoules, CDA24, CDA33, Chrysope eurl, DAconseil, Ets Touzan, Euralis, Fredon Aquitaine, Gdon du Libournais, Grains d'Raisins, Groupe Isidore, IFV, Inovitis, Groupement d'Employeurs du Pays de l'Entre-Deux-Mers, SCA Alliance Aquitaine, Soufflet Vigne, SRA Cadillac, Terres du Sud, Urabl Grézillac, Univitis, Vitivista. Fermes du réseau DEPHY, Viticulteurs.

*Ce bulletin est produit à partir d'observations ponctuelles réalisées sur un réseau de parcelles. S'il donne une tendance de la situation sanitaire régionale, celle-ci ne peut pas être transposée telle quelle à chacune des parcelles. La Chambre Régionale d'Agriculture Nouvelle-Aquitaine dégage donc toute responsabilité quant aux décisions prises par les agriculteurs pour la protection de leurs cultures. Celle-ci se décide sur la base des observations que chacun réalise sur ses parcelles et s'appuie le cas échéant sur les préconisations issues de bulletins techniques (la traçabilité des observations est nécessaire).*

*" Action pilotée par le Ministère chargé de l'agriculture et le Ministère de l'Ecologie, avec l'appui financier de l'Agence Française de Biodiversité, par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du plan Ecophyto ".*

Annexe C : Bulletin d'information n° 5 de la semaine n° 18 (29 avril au 6 mai 2019) édité hebdomadairement par l'IFV avec le soutien du CIVB (source : plateforme Epicure de l'IFV).

Bulletin n° 5 Semaine n°18 du 29 avril au 6 mai 2019 / Aquit...

<https://www.vignevin-epicure.com/index.php/re/Bulletin/Aqu...>



La base de données Epicure est sous maintenance actuellement. Possibilité d'interruption.

Epicure Cartographie Optidose Météo Communauté Saisie Consultation Bulletin

## Bulletin n° 5 Semaine n°18 du 29 avril au 6 mai 2019

Semaine n°18 du 29 avril 2019 au 06 mai 2019

Blanquefort, le lundi 29 avril 2019 - Marc Vergnes

Toute reproduction ou diffusion totale ou partielle est soumise à l'autorisation de l'IFV

Les calculs sont effectués sur les données mesurées de 190 points de grille météorologiques et des prévisionnelles établies à 7 jours par Météo France. Les données simulées sont comparées aux observations de terrain recueillies la semaine précédente par l'IFV et ses partenaires sur un réseau de parcelles témoins non traités répartis sur le vignoble. Elles s'appuient également sur le BSV Vigne et alimentent ce bulletin au niveau de l'évaluation des risques épidémiques.

Cette prévision des risques analysée par l'IFV est élaborée uniquement à partir de données météorologiques ; elle est donc délivrée à titre indicatif car les décisions à la parcelle doivent être prises en fonction de vos observations et des conditions propres à chaque exploitation. Malgré le soin apporté dans l'interprétation des modèles et l'élaboration de ces bulletins, l'IFV et le CIVB ne sauraient être tenus responsables d'éventuelles divergences possibles entre l'analyse globale faite sur ces réseaux et vos observations particulières conduites à l'échelle de votre vignoble.

L'IFV et le CIVB vous invitent à devenir partenaire du réseau modélisation Epicure ([vignevin-epicure.com](http://vignevin-epicure.com)) pour partager vos informations avec la communauté technique et contribuer ainsi à l'amélioration des outils de prévision des risques.

Ce bulletin prend en compte les informations du Bulletin de Santé du végétal Vigne, N° 5 du 24 avril 2019, consultable en totalité sur le site de la CRANA <https://nouvelle-aquitaine.chambres-agriculture.fr/agro-environnement/ecophyto/surveillance-biologique-du-territoire/bsv-vigne/>, de la DRAAF <http://draaf.nouvelle-aquitaine.agriculture.gouv.fr/Vigne-Nord-Aquitaine>

### Météorologie

#### Météorologie de la semaine passée

La semaine dernière a été marquée par des quantités de pluie dont l'intensité a diminué au cours du temps. Hormis la moitié Nord du Médoc, ce sont la rive gauche de l'Estuaire et celle de la Garonne qui enregistrent les cumuls les plus élevés de 55 à 58 mm de pluie. Excepté le Bourgeois-Blayais (37mm), les autres secteurs totalisent de 42 à 49mm.

#### Cumul Pluviométrique des 7 derniers jours



### Prévisions

#### Temps ensoleillé avec quelques rares ondées

##### Pluies :

Globalement le temps sera beau, seul un court passage pluvieux pourra être observé vendredi et peut être samedi. Au total 2mm de pluie pourraient être relevés en moyenne.

La prévision la plus sèche H1 ne signale qu'une ondée de 0.1mm samedi. Le scénario météorologique H3 prévoit de petites averses aujourd'hui (0.3mm), puis un deuxième épisode pluvieux de 4 jours et débutant mercredi. Dans ce cas, près de 13mm de pluie pourraient être enregistrés.

Globalement quel que soit l'hypothèse envisagée, la tendance météorologique de cette semaine devrait être plutôt sèche ou faiblement pluvieuse.

##### Températures :

Les températures sont relativement constantes durant la semaine. Les minimales avoisineront 7°C et les maximales 19°C ce qui est proche des normales saisonnières.

### Observations du réseau expérimental semaine n°17

#### Observations du réseau semaine n°17 du 22 au 28 avril 2019:

88 parcelles ont été observées sur le réseau, représentant un total de 2353 cepcs contrôlés.

#### Stades phénologiques sur le réseau de parcelles "témoin non traité":

Le stade moyen est 4-5 feuilles étalées. Il varie de éclatement du bourgeon à 8-9 feuilles étalées. Une hétérogénéité de développement entre les rameaux

peut être constatée au sein d'un même cep sans pour autant que la période de pliage des astes (ou baguettes) puisse en être l'explication.

**Situation sanitaire du vignoble:**

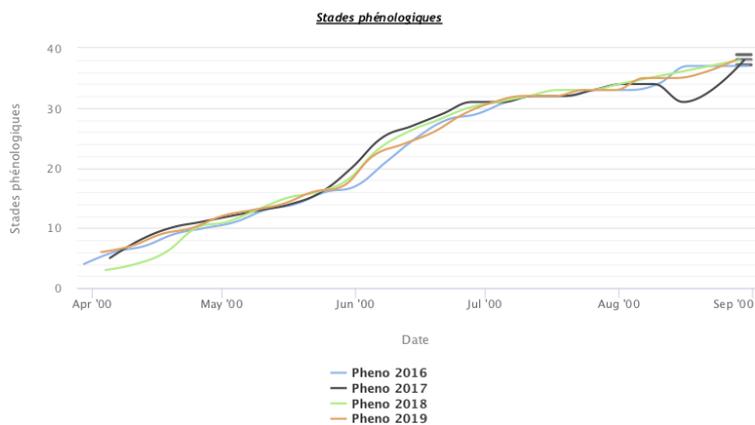
Aucun symptôme de maladie fongique n'est relevé à ce jour.

**Rappel :**

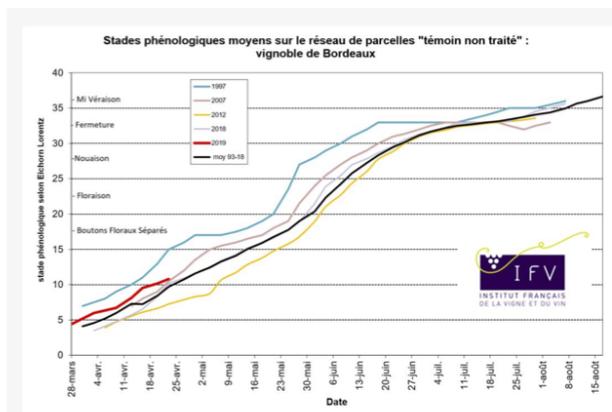
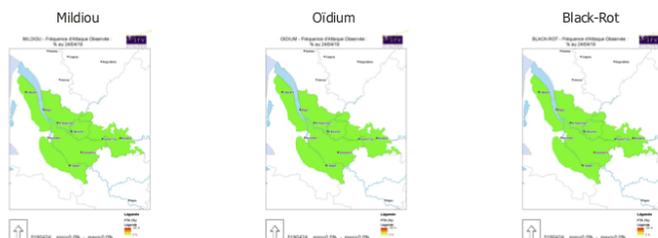
La plateforme Web Alerte Vigne (WAVE), outil participatif est à votre disposition pour informer la communauté professionnelle de vos observations des premiers foyers de maladies et de leur évolution ou de la localisation d'accidents climatiques : <http://www.vignevin-epicure.com/index.php/fre/Saisie/Alertes> ou <https://www.webalertevigne.com/>.

Le Web Alerte Vigne permet de saisir une information simple (foyers mildiou, etc...) sur une parcelle directement géo-référencée via GoogleMaps. Ces informations sont automatiquement insérées dans une couche cartographique libre d'accès sur Epicure, qui permet à l'ensemble de la communauté technique de visualiser la localisation des premiers foyers.

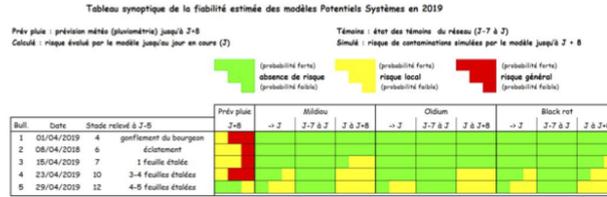
La saisie directe des observations depuis la parcelle est possible via le module décliné pour Smartphones. L'IFV garantit la confidentialité des informations saisies par l'impossibilité de localiser exactement vos observations et identifier l'observateur.



**Observations sur Témoins Non Traités semaine n° 17**



**Tableau synoptique de la validation temps réel des modèles**



**Préconisations générales issues des modèles**

**Mildiou**

**Pour rappel :** Les contaminations pré épidémiques ne nécessitent pas de traitement.

**Lutte conventionnelle :**

Les parcelles sont indemnes de symptômes, un report de démarrage ou de renouvellement de la protection peut être réalisé compte tenu de la quasi absence de pluies prévues (2mm) et de l'absence de contaminations épidémiques sur la très grande majorité du vignoble.

**Lutte biologique :**

Le renouvellement peut être normalement reporté à la semaine prochaine ou envisagé préventivement si une dégradation pluvieuse totalisant plus de 10mm se produirait d'ici à lundi prochain.

**Oïdium**

**Lutte conventionnelle et biologique :**

Aucun traitement n'est à prévoir pour le moment compte tenu des trop faibles niveaux de contaminations.

**Black-rot**

**Lutte conventionnelle et biologique :**

Le démarrage d'une protection n'est pas à envisager.

**Préconisation générale Optidose**

Les tableaux suivants proposent une préconisation de traitements pour les vignobles conduits en lutte conventionnelle ou biologique. L'analyse est établie en fonction des risques modélisés pour des parcelles classées en trois catégories de vignoble: situation générale, parcelles sensibles ou atteintes. Les chiffres indiqués dans les cellules sont établis à partir du module Optidose®, pour un vignoble standard à 5000 pieds hectare (2x1 m). Ils préconisent un pourcentage de la dose homologuée qui paraît suffisant, sous réserve d'une bonne qualité d'application, pour enrayer les démarrages épidémiques. Les chiffres gras soulignés suggèrent un renouvellement avant la fin de rémanence de l'application précédente. Ces valeurs sont délivrées à titre indicatif : cette optimisation des intrants nécessite un suivi très attentif de l'état sanitaire du vignoble et des conditions de traitement. Pour plus de détail sur les doses, consulter [www.vignevin-epicure.com](http://www.vignevin-epicure.com) rubrique Optidose.

**Tableau de préconisation générale**



**Informations des modèles Potentiel Système version 2019**

**Mildiou**

**Risque potentiel d'infection:**

Les hauteurs de pluie enregistrées sont très proches des prévisions de mardi dernier. Cela s'est donc traduit par l'installation d'un risque potentiel fort sur le vignoble médocain, des Graves-Sauternais, du Libournais et des vignobles limitrophes. La quasi absence de précipitations cette semaine devrait favoriser une baisse du niveau de risque potentiel qui passera de fort à faible. Seuls le Sud Est du Bordelais, le centre du Médoc, le Libournais et "sa grande couronne" resteront à un niveau fort lundi prochain. En cas de pluies plus abondantes et proches de H3, le risque potentiel s'aggraverait partout en passant à un niveau fort voire très fort à l'exception de l'Est Entre Deux Mers où il serait encore faible.

**Fréquence Théorique d'Attaque :**

Les indices décrivant la phase préparatoire de l'épidémie suivent une évolution plus lente que celle prévue initialement mardi dernier. Les températures plus fraîches que celles annoncées en sont probablement la cause. Comme cela était envisagé, le modèle a enregistré des contaminations pré épidémiques sur tout le Bordelais. Il a également indiqué des contaminations épidémiques liées aux hauteurs de pluie de mardi dernier qu'il a considéré comme un événement atypique et favorisant. Elles étaient peu nombreuses: la FTA atteint aujourd'hui 0.01% ce qui est très faible.

Cette semaine, les petites pluies pourraient favoriser le développement pour l'ensemble du territoire des contaminations pré épidémiques et déclencher les toutes premières contaminations épidémiques sur seulement 50% des points de calculs de la moitié sud du Médoc. Leur quantité est très faible et la FTA sur ce secteur n'augmente que de 0.002 point. En cas de pluies plus fortes(H3), les contaminations se généraliseraient quasiment sur la presque totalité du territoire. Les valeurs de FTA resteraient encore très faibles et parviendraient jusqu'à 0.07%.

**Pour rappel:** Les contaminations pré épidémiques ne nécessitent pas de traitement.

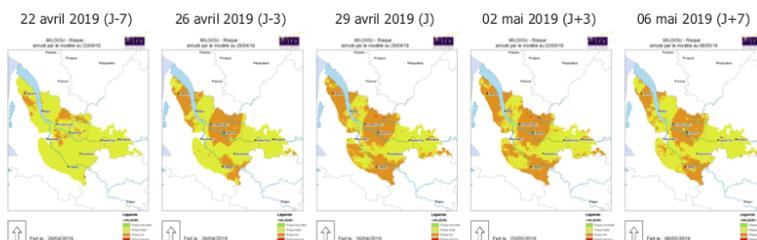
**Lutte conventionnelle :**

Les parcelles sont indemnes de symptômes, un report de démarrage ou de renouvellement de la protection peut être réalisé compte tenu de la quasi absence de pluies prévues (2mm) et de l'absence de contaminations épidémiques sur la très grande majorité du vignoble.

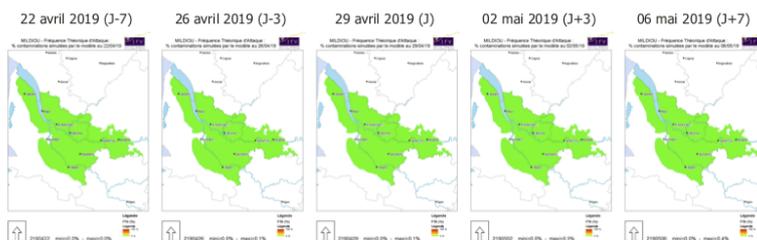
**Lutte biologique:**

Le renouvellement peut être normalement reporté à la semaine prochaine ou envisagé préventivement si une dégradation pluvieuse totalisant plus de 10mm se produirait d'ici à lundi prochain.

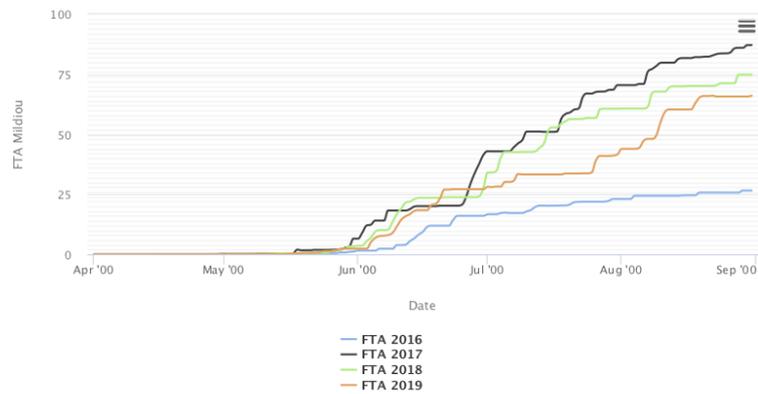
**Carte de représentation du risque d'épidémie de mildiou établie à partir de l'EPI, modèle Potentiel Système version 2019**



**Carte de représentation de la FTA du mildiou, modèle Potentiel Système version 2019**



**FTA Mildiou**



**Oïdium**

**Risque potentiel d'infection:**

Le modèle indique un niveau de risque potentiel toujours fort. Seuls les secteurs du centre du Médoc, du Libournais et des vignobles l'encadrant connaissent un risque potentiel qui s'affaiblit. La quasi absence de pluie de cette semaine renversera ce processus. Lundi prochain, le vignoble devrait se retrouver dans la situation du début de la semaine dernière.

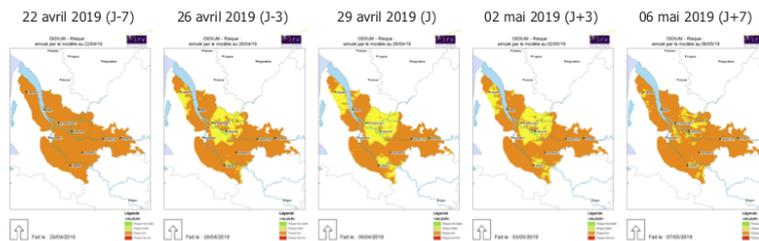
**Fréquence Théorique d'Attaque :**

D'après le modèle, les contaminations pré épidémiques sont généralisées sur l'ensemble du Bordelais. Les contaminations épidémiques ont débuté un peu partout sur le vignoble mais sont encore très faibles: la FTA est inférieure à 0.01%. Le modèle n'annonce que quelques nouvelles contaminations pré épidémiques pour ces prochains jours.

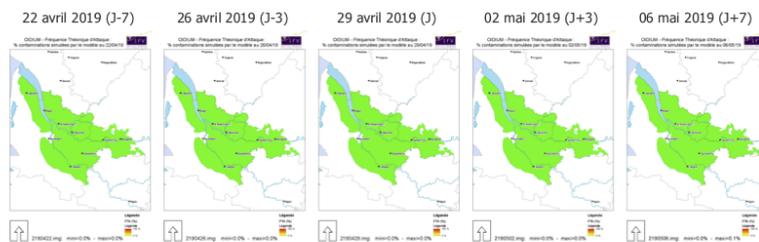
**Lutte conventionnelle et biologique:**

Aucun traitement n'est à prévoir pour le moment compte tenu des trop faibles niveaux de contaminations épidémiques.

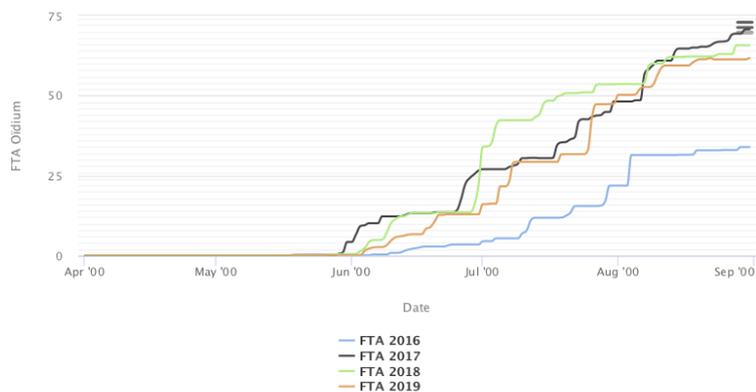
Carte de représentation du risque d'épidémie d'oïdium établie à partir de l'EPI, modèle Potentiel Système version 2019



Carte de représentation de la FTA de l'oïdium, modèle Potentiel Système version 2019



*ETA Oïdium*



**Black-rot**

**Risque potentiel d'infection:**

Les conditions climatiques ont fait baisser le risque potentiel sur la grande majorité du territoire et plus particulièrement le Médoc, le Bourgeois-Blayais et le Liboumiais. Actuellement il est partagé en deux: faible au Nord, fort au Sud. Le Nord devrait connaître une hausse graduelle de son niveau de risque potentiel durant les jours à venir.

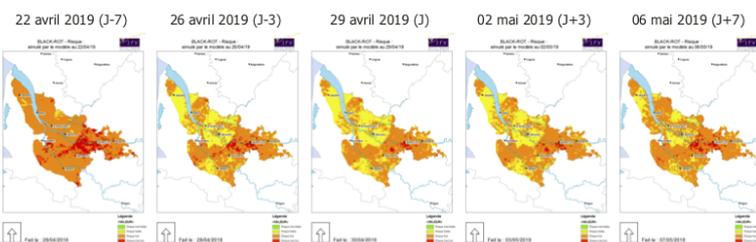
**Fréquence Théorique d'Attaque :**

Le modèle indique des contaminations épidémiques suite aux pluies de la semaine passée. La FTA a progressé, mais pour le moment, elle est encore restée insuffisante pour justifier un traitement. Pour cette semaine, aucune réelle évolution de l'installation de la maladie n'est annoncée : la FTA n'augmente en moyenne que de 0.09 point. Dans des conditions plus humides (H3), la FTA progresserait de 1.3 point.

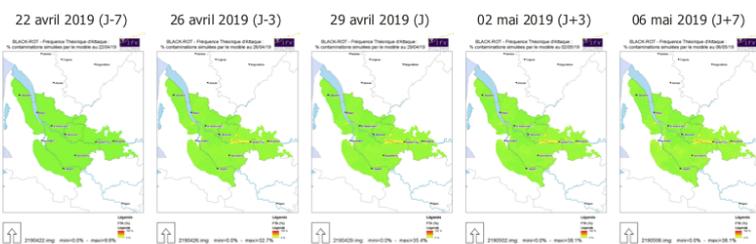
**Lutte conventionnelle et biologique:**

Le démarrage d'une protection n'est pas à envisager.

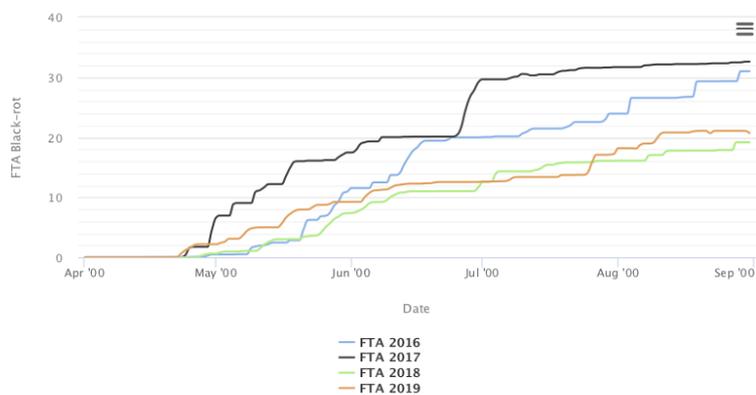
**Carte de représentation du risque d'épidémie de black-rot établie à partir de l'EPI, modèle Potentiel Système version 2019**



**Carte de représentation de la FTA du black-rot, modèle Potentiel Système version 2019**



**ETA Blackrot**



### Informations du modèle

#### Observations :

**TNT** : témoin non traité

**FAO (%)** : Fréquence d'Attaque Observée = Pourcentage d'organes (feuilles ou grappes) réellement attaqués d'après les observations faites par l'IFV et ses partenaires sur le réseau de TNT.

**IAO (%)** : Intensité d'Attaque Observée = Pourcentage d'organes (feuilles ou grappes) réellement attaqués d'après les observations faites par l'IFV et ses partenaires sur le réseau de TNT.

**Incubation** : période de latence entre la contamination et l'expression des symptômes.

**BSV** : Bulletin de Santé du Végétal pour la vigne

**SBT** : Surveillance Biologique du territoire

#### Modélisation :

**FTA (%)** : Fréquence Théorique d'Attaque = Pourcentage d'organes (feuilles ou grappes) susceptibles, d'après le modèle, d'être attaqués par la maladie.

**ITA (%)** : Intensité Théorique d'Attaque = Pourcentage d'organes (feuilles ou grappes) susceptibles, d'après le modèle, d'être attaqués par la maladie.

#### Météo :

**H1** : scénario bas pour des températures et des précipitations ayant 10% de chance d'être dépassé à la baisse

**H2** : scénario le plus probable

**H3** : scénario élevé pour des températures et des précipitations ayant 10% de chance d'être dépassé à la hausse

Les deux hypothèses météorologiques H1 et H3 constituent les limites inférieure et supérieure de la zone d'incertitude due à la prévision météorologique.

**Prochain message: lundi 06 mai 2019**

## **Annexes du Matériel & méthodes**

Annexe D : Protocole de suivi d'une parcelle témoin dans le cadre de la surveillance biologique du Territoire pour la rédaction du BSV Vigne en Aquitaine et du suivi du réseau de témoins non traités déployé par l'IFV sur la façade atlantique (source : IFV).

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | IFV Pôle Bordeaux Aquitaine<br>39, rue Michel Montaigne<br>33290 Blanquefort | Fredon Aquitaine<br>39, rue Michel Montaigne<br>33290 Blanquefort |
|---|--|---|

**PROTOCOLE DE SUIVI D'UNE PARCELLE TEMOIN**  
**Dans le cadre de la Surveillance Biologique du Territoire**  
**pour la rédaction du BSV VIGNE en AQUITAINE en 2010**

Dans le cadre de la mise en place du réseau de surveillance biologique du territoire, l'IFV et la Fredon Aquitaine ont mutualisé leurs protocoles pour proposer dès 2010 un dispositif d'observation pratique s'appuyant sur les démarches déjà existantes tout en restant compatible avec l'harmonisation souhaitée au niveau national.

**Ce dispositif minimum BSV est décrit en police bleue pour simplifier la lecture pour ceux des observateurs qui ne souhaitent participer qu'au dispositif SBT (Surveillance Biologique du Territoire).**

L'installation de ces nouveaux réseaux s'appuyant sur ceux pré existants de l'IFV et de la Fredon, nous invitons ceux qui le souhaitent à rejoindre nos réseaux de validation des modèles de prévision. Les protocoles sont un peu plus complexes à première vue, mais ils sont aussi plus précis, et avec un peu d'habitude, leur mise en œuvre reste rapide.

**1 - OBJECTIFS :**

- Permettre au viticulteur ou au technicien de suivre le développement de maladies cryptogamiques sur des céps ne recevant pas de traitement fongicide.
- **Alimenter le réseau régional d'observation, pour bénéficier des observations effectuées sur l'ensemble du vignoble.**

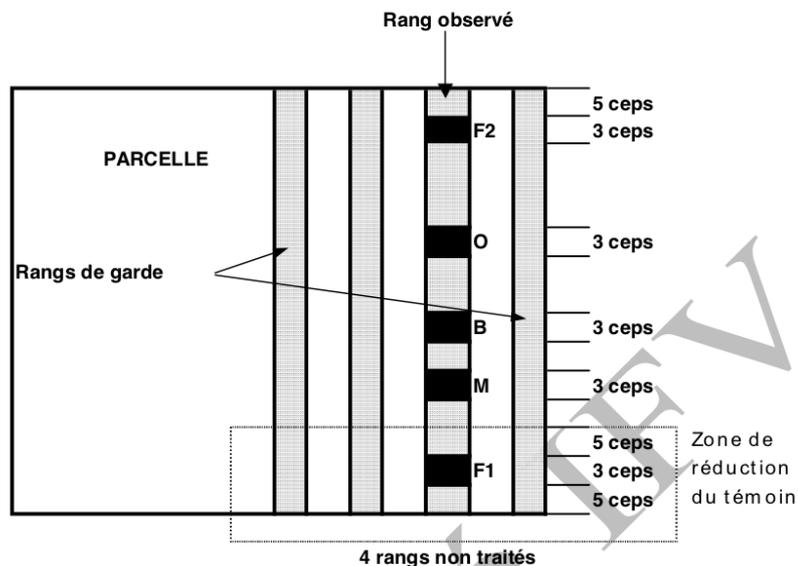
**2 - SITUATION DU TEMOIN :**

Positionner le dispositif observé à proximité immédiate de l'habitation pour pouvoir contrôler rapidement et régulièrement la progression des maladies :  
soit dans une situation représentative de l'ensemble de l'exploitation (=> tendance moyenne),  
soit dans une situation sensible de l'exploitation (=> rôle de "révélateur").

**3 - DESCRIPTION DU DISPOSITIF TEMOIN NON TRAITE (TNT) MALADIES (Protocole IFV) :**

Au minimum sur quatre rangs ne recevant aucun traitement fongicide en saison, de préférence en bordure d'une parcelle pour éviter les problèmes de dérive de traitements. Si nécessaire prévoir un deuxième rang de garde entre le témoin observé et la parcelle pour mieux isoler le rang observé. **Se placer de préférence en amont des vents dominants !**

Protocole IFV



#### DISPOSITIF MINIMUM DANS LE CADRE DU BSV 2010

Le rang observé (ou les rangs si le TNT est situé dans une pointe de parcelle) doit comporter un minimum de 50 ceps pour rester compatible avec l'harmonisation nationale. Le TNT est considéré dans son ensemble, sans définition des placettes fixes ou mobiles. Celles-ci restent optionnelles et spécifiques du protocole de suivi modélisation IFV.

Les notations hebdomadaires portent donc sur l'ensemble des ceps observés ;

Les relevés comportent au minimum les informations suivantes :

- La date, Le stade, Le nom de(s) observateur(s), Le nombre de ceps observés
- la fréquence de ceps porteurs de symptômes
- la fréquence et l'intensité d'attaque sur feuilles et sur grappes en %

Rappel : la fréquence est toujours supérieure ou égale à l'intensité ;

Fréquence = proportion d'organes (**feuilles ou grappes**) atteints sur le nombre total d'organes présents.

Intensité = destruction globale du **feuillage** ou de la **récolte**

#### **DISPOSITIF OPTIONNEL DE SUIVI MODELISATION IFV**

Le rang observé comporte 5 placettes et différencie 6 zones d'observation. Ces emplacements sont repérés à l'aide de piquets ou rubans colorés. Deux de ces placettes, nommées F (Fixes), sont situées de part et d'autre du rang à 5 ceps ou une piquetée de l'extrémité. Chacune des trois autres sont positionnées au fur et à mesure de l'apparition sur feuilles ou sur grappes des premiers foyers éventuels de maladie M (mildiou), O (Oïdium), B (Black-rot) : repérer le cep le plus atteint, positionner la placette un cep avant à un cep après.

On dispose ainsi de 2, 3, 4 ou 5 placettes d'observation de 3 ceps, sur lesquelles les observations d'attaque de maladies seront notées en fréquence et intensité chaque semaine.

Protocole IFV

- F1 et F2 :** - suivi de l'évolution moyenne des dégâts pour l'ensemble des maladies sur une situation aléatoire, fixée a priori.
- M, O, B :** - suivi de l'évolution d'une maladie à partir d'un foyer Mildiou, Oïdium ou Black - rot **et** suivi de l'évolution moyenne des autres maladies.
- HP :** - la zone Hors Placette représente le reste du rang; elle est considérée et notée comme une placette de 3 ceps même si l'on doit admettre que l'estimation des attaques pourra parfois être difficile à évaluer avec précision; l'objectif est de savoir si l'ensemble du rang présente une tendance moyenne conforme aux observations faites sur les placettes.

#### 4 - MALADIES OBSERVEES :

Mildiou (M), Black rot (B), Oïdium (O) : sur feuilles et grappes ; Pourriture grise (P) sur grappes ou inflorescences. Sur feuilles au printemps uniquement en cas de forte attaque.

**Les quatre maladies sont d'abord recherchées et observées sur le rang entier, puis sur l'ensemble des placettes**

#### 5 - PERIODICITE DES RELEVES :

Rythme d'observation minimum : une fois par semaine, si possible à jour fixe le lundi (+ ou - 1 jour), ou à défaut le vendredi,

#### 6 - OBSERVATIONS ET RELEVES :

##### 6.1 - En début de saison sur la fiche n°1 :

Lors du premier contrôle, relever **le nombre de ceps vivants** sur la totalité du rang observé; indiquer le nombre de ceps observés à chaque contrôle (soit la totalité du rang ou par exemple 5 placettes = 15 ceps dans le cadre du protocole IFV).

**Préciser sur la feuille de notation à chaque observation, le nombre de ceps observés.**

##### Sur ceps :

Relever le nombre de ceps atteints et indiquer sur la fiche de saisie ce nombre ramené en %.

##### Sur feuilles :

L'ensemble du rang est observé sur les deux faces. Au besoin il pourra être judicieux de repérer au Marker indélébile (ou à l'aide d'une agrafe par temps de pluie) les feuilles présentant des symptômes pour bien apprécier l'évolution d'une semaine sur l'autre.

**En cas de doute sur l'identification d'un symptôme, la maladie n'est pas comptabilisée : révérifier le symptôme lors du contrôle suivant**

##### Sur grappes :

Contrôler les grappes à intervalles réguliers, et faire un contrôle plus attentif sur les placettes et aux endroits des foyers repérés sur le feuillage.

**6.2 - Réduction de la taille de l'échantillon observé :**

La réduction de la taille de l'échantillon observé est toujours possible, dès lors que l'échantillon réduit est représentatif de l'échantillon de départ. Ainsi, si en raison de l'évolution de la maladie, l'observation devient impossible à réaliser sur l'ensemble du rang, l'échantillon contrôlé peut alors être réduit aux seules placettes repérées.

Pour cette raison de la variation de l'échantillon, il est impératif de connaître le nombre de ceps observés à chaque contrôle.

A titre indicatif, on peut retenir que :

**Dès que le niveau de 15 feuilles ou grappes malades est atteint pour un des parasites sur l'une des placettes M, ou O, ou B, les contrôles ne sont plus effectués que sur les placettes repérées.**

**6.3 - En cours d'épidémie sur les placettes repérées (fiche n°2) :**

Faire correspondre, sur la fiche n° 2, la date de l'observation à chaque numéro de contrôle réalisé.

Chaque numéro de contrôle positionné sur l'échelle correspond à une estimation visuelle globale, donnée en pourcentage de la proportion du feuillage ou de la récolte détruits par chacune des maladies (Fréquence et intensité sur feuilles et sur grappes).

Seuls les n° de contrôles pour lesquels une évolution de la maladie est constatée, sont positionnés sur les différentes échelles : la stagnation éventuelle d'une maladie se manifestera par l'affectation d'une date à un n° d'ordre de contrôle et l'absence de n° sur la (ou les) placette(s) concernées.

Par convention :

- le n° de contrôle 0 indique l'arrêt des observations sur une placette ou sur la zone hors placette (HP) pour une ou toutes les maladies (indiquer 0 avec une barre verticale sur l'ensemble des lignes).
- on retiendra en première approximation qu'un niveau de maladie atteint ne peut décroître, bien que cela soit possible en réalité dans le cas d'une maladie stoppée simultanément à la poursuite du développement de la végétation.

**Faire correspondre, sur la fiche, la date de l'observation à chaque numéro de contrôle réalisé, même en cas d'absence d'évolution des maladies.  
Ne positionner ce numéro sur l'échelle d'évaluation des dégâts que si une évolution de la maladie est constatée par rapport au contrôle précédent.**

Lors d'un **même passage** sur le site, le **même numéro** d'ordre de contrôle est affecté par placette pour **toutes les maladies** observées.

**Attention !** : De manière à pouvoir bien apprécier la phase d'installation des maladies, nous avons défini une **échelle non linéaire de 0 à 10 à utiliser en début de saison puis sur une échelle de 0 à 100 pour le restant de la saison.**

**7 - REDUCTION DE LA TAILLE DU TEMOIN**

Dès que la pression de l'un des parasites devient trop forte, la zone non traitée peut être réduite à l'une ou l'autre des extrémités, de manière à ne conserver un vrai témoin non traité qu'en F1, ou F2.

Même dans ce cas, il est demandé de poursuivre les observations sur l'ensemble des placettes positionnées, en indiquant pour chaque placette son statut traité (TT) ou non (TNT) vis à vis des dates, produits et doses utilisés.

**Indiquer sur la grille de notation les placettes restées sans traitement par le sigle TNT (Témoïn Non Traité) ou TT (Témoïn Traité). Relever la nature et date(s) des traitements effectués, les indiquer sur la grille.**

#### 8 - TRANSMISSION DES OBSERVATIONS

Une fois complétées, les observations des fiches saisies via internet sur le site modélisation mis à votre disposition pour alimenter la base de données ([www.vignevin-epicure.com](http://www.vignevin-epicure.com)).

**Nous centralisons ces données qui seront librement accessibles pour les membres du réseau BSV sur le site EPICURE et renvoyons chaque semaine l'ensemble des observations relevées sur le réseau SBT pour servir à la rédaction du BSV.**

Personnes IFV à contacter sur chaque bassin de production :

|  |   |  |
|--|---|--|
| IFV en Aquitaine :<br><a href="mailto:marc.raynal@vignevin.com">marc.raynal@vignevin.com</a><br><a href="mailto:christian.debord@vignevin.com">christian.debord@vignevin.com</a> | IFV en Midi Pyrénées :<br><a href="mailto:virginie.vigues@vignevin.com">virginie.vigues@vignevin.com</a>  | IFV en Charentes :<br><a href="mailto:francois-michel.bernard@vignevin.com">francois-michel.bernard@vignevin.com</a> |
| IFV en Val de Loire :<br><a href="mailto:david.lafond@vignevin.com">david.lafond@vignevin.com</a>  | IFV en Rhône Méditerranée :<br><a href="mailto:bernard.molot@vignevin.com">bernard.molot@vignevin.com</a> |  |

Protocole IFV

*Annexe E : Notice d'utilisation de l'outil d'élicitation probabiliste L-i-cite, utilisé par les experts élicités lors de la campagne d'élicitation 2019 pour réaliser leur pronostic. Cette notice est disponible en ligne.*

## Notice d'utilisation de Licite

Dans le cadre du projet Smartpic et de la thèse de Mathilde Chen, nous relançons cette année le concours de pronostic de la date d'apparition du mildiou (seuil 1% de ceps atteints) sur un secteur non traité.

Cet exercice ne prend que 5 minutes et sera renouvelé toutes les semaines jusqu'à ce que le seuil de 1% de ceps touchés soit atteint dans votre secteur.

Cette année, nous proposons aux participants de l'étude d'utiliser un nouvel outil : **Licite**. Le pronostic peut être réalisé en cliquant sur le lien :

<https://licite.arvalis-fr.com/licite/>

et en suivant la démarche décrite dans ce document. Une vidéo tutorielle de l'outil est également disponible à cette adresse :

<https://www.youtube.com/watch?v=0u1HWk-Zsn0>

Les pronostics des contributeurs de cette étude resteront anonymes et serviront à alimenter une étude conduite par l'INRA en partenariat avec l'ACTA et l'IFV dans le cadre de l'amélioration des outils de suivi pour la protection du Vignoble (projet SmartPic).

Nous remercions par avance les futur(e)s participant(e)s à cette nouvelle campagne d'élicitation pour leur collaboration.

Mathilde CHEN (ACTA), François BRUN (ACTA), David MAKOWSKI (INRA), Marc RAYNAL (IFV)

|  |           |               |  |                |
|--|-----------|---------------|--|----------------|
| <b>Procédure à suivre en ligne, sur le site</b><br><a href="https://licite.arvalis-fr.com/licite/">https://licite.arvalis-fr.com/licite/</a> | Contact : | Mathilde CHEN | <a href="mailto:mathilde.chen@inra.fr">mathilde.chen@inra.fr</a>       | 01 30 81 54 16 |
|  |           | Marc RAYNAL   | <a href="mailto:Marc.RAYNAL@vignevin.com">Marc.RAYNAL@vignevin.com</a> | 05 57 12 26 13 |

**Vos coordonnées**

Nom : \_\_\_\_\_ Email : \_\_\_\_\_  
 Prénom : \_\_\_\_\_ Téléphone : \_\_\_\_\_  
 Organisme : \_\_\_\_\_

**Etape 1 : Sélection d'une parcelle non-traitée de référence**

*Remarque : étape à ne faire que la première fois.*

- Choisir un secteur de référence, non-traité, sur lequel vous réaliserez vos pronostics pour la campagne d'élicitation 2019 :
- Identifier et localiser du secteur (AOC, commune, code postal, lieu-dit ...) :
- Avez-vous sur ce secteur une parcelle témoin<sup>1</sup> ? :  

Oui / Non
- Si oui, cette parcelle fait-elle partie du réseau TNT de l'IFV<sup>1</sup> ? :  

Oui / Non
- Selon vous, comment caractériseriez-vous la sensibilité à la maladie du secteur que vous avez sélectionné<sup>1</sup> ?  

Très peu sensible / Peu sensible / Sensible / Très sensible
- Commentaires, remarques :

---

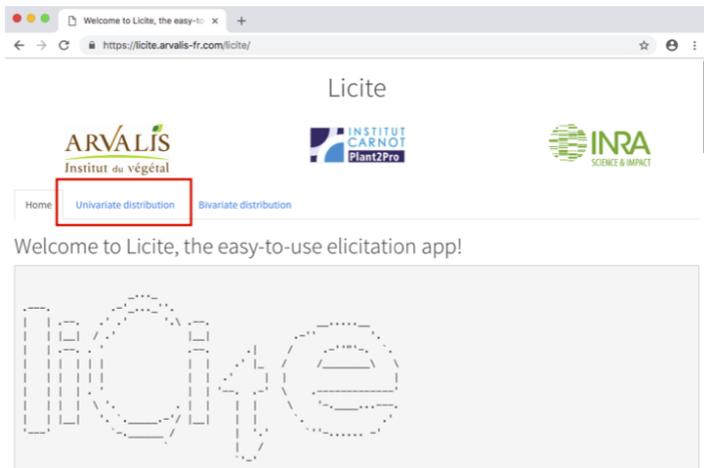
<sup>1</sup> : Rayer la/les mentions inutiles

**Etape 2 : Paramétrage de Licite**

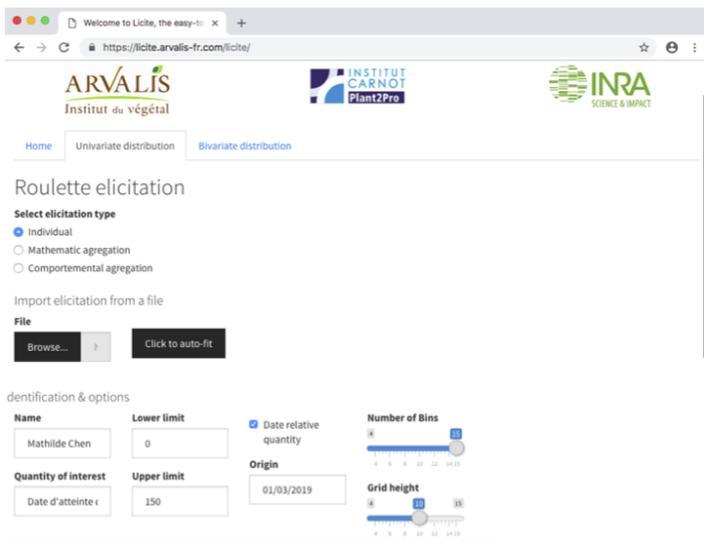
**Option 1 : Paramétrage manuelle**

Remarque : Les zones dans lesquelles il faut modifier des éléments sont entourées en vert.

Aller sur le site <https://licite.arvalis-fr.com/licite/>



Cliquer sur l'onglet "Univariate distribution"



La page ci-contre doit être affichée

Dans la partie "Select elicitation type", cliquer sur l'option "Individual"

Dans la partie "Identical & options", renseigner le nom de la personne élicitée, et dans la partie "Quantity of interest", renseigner le nom de la variable d'intérêt : "Date d'atteinte du seuil de 1% de ceps malades"

Renseigner les valeurs de limites inférieures et supérieures de l'histogramme "Lower limit" = 0 "Upper limit" = 150 Ici : 0 = 1er mars 2019 150 = 31 juillet 2018

Sélectionner l'option "Date relative quantity" et dans l'encart "Origin" sélectionner la date correspondant à la limite inférieure de l'histogramme soit le : 01/03/2019.

Définir le "Number of bins" en plaçant le premier curseur sur "15". Définir le "Grid height" en plaçant le second curseur sur "10".

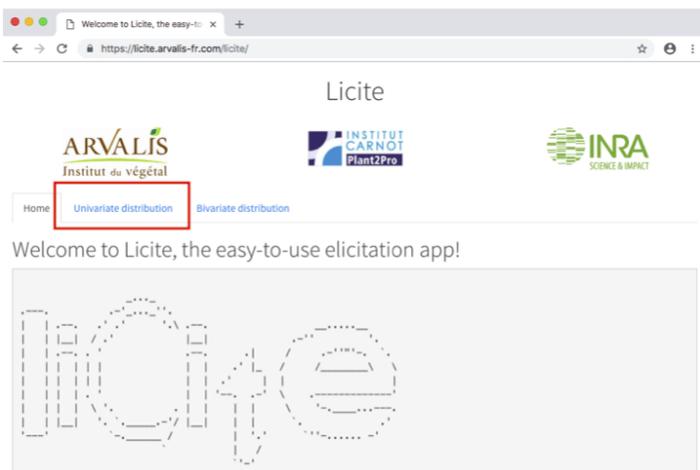
**Option 2 : Paramétrage automatique / Instructions pour charger un fichier préalablement enregistré**

L'outil peut également être automatiquement paramétré en chargeant un fichier préalablement enregistré sur votre ordinateur.

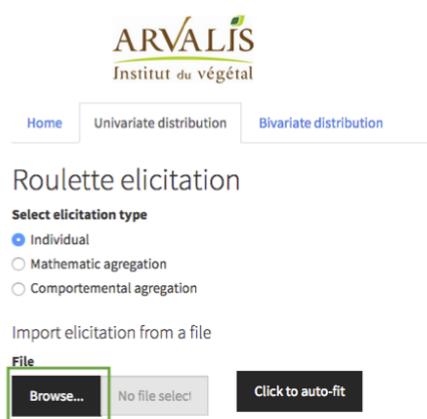
Tout d'abord, télécharger le fichier Licite\_parametrage\_auto.xml, que vous trouverez ici :

<https://drive.google.com/file/d/16a93CR7X2ZGpv65uIRrnZT9WUppSdptX/view?usp=sharing>

Aller sur le site <https://licite.arvalis-fr.com/licite/>



Cliquer sur l'onglet  
"Univariate distribution"

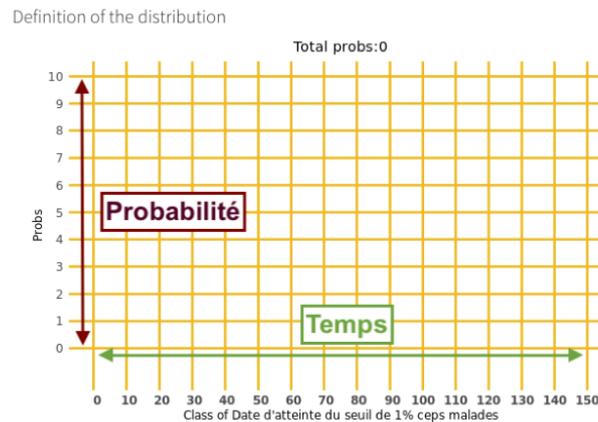


Cliquer sur le bouton "Browse..."

Sélectionner le fichier .xml à importer dans Licite. Vous pouvez modifier l'histogramme qui s'affiche selon votre jugement (Etape 3).

**Etape 3 : Estimation de la probabilité d'atteinte du seuil de 1% de ceps malades**

L'étape 2 a permis de paramétrer une grille, représentée ci-après (pour visualiser la grille dans le navigateur, faire défiler la page) :



L'axe horizontal de cette grille représente le temps. L'origine de l'axe, c'est-à-dire le 0, correspond au 01/03/2019. La valeur la plus élevée, c'est-à-dire 150, correspond au 31/07/2019. Entre ces deux dates, l'axe du temps est découpé en 15 unités. Chaque unité représente une séquence de 10 jours, c'est-à-dire une décade. Une série de 3 décades correspond à 1 mois.

La grille est donc configurée telle que :

| Valeur sur axe horizontal | Date correspondante en 2019      |
|---------------------------|----------------------------------|
| 0 - 10                    | début mars (1ère décade de mars) |
| 10 - 20                   | mi mars (2nde décade de mars)    |
| 20 - 30                   | fin mars (3ème décade de mars)   |
| 30 - 40                   | début avril                      |
| 40 - 50                   | mi avril                         |
| 50 - 60                   | fin avril                        |
| 60 - 70                   | début mai                        |
| 70 - 80                   | mi mai                           |
| 80 - 90                   | fin mai                          |
| 90 - 100                  | début juin                       |
| 100 - 110                 | mi juin                          |
| 110 - 120                 | fin juin                         |
| 120 - 130                 | début juillet                    |
| 130 - 140                 | mi juillet                       |
| 140 - 150                 | fin juillet                      |

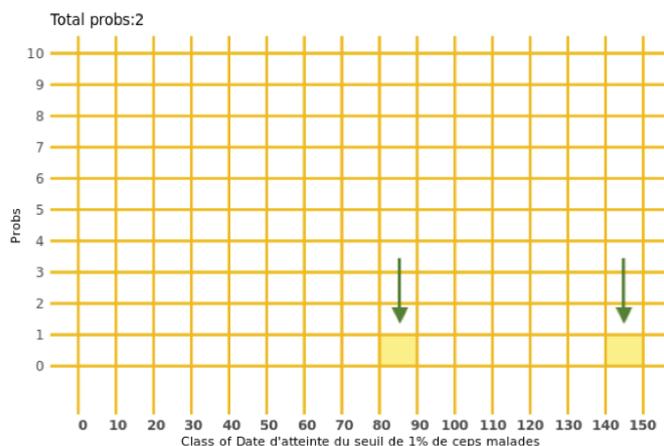
L'axe vertical de la grille correspond à la probabilité que le seuil de 1% soit atteint. Cette probabilité peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 10. Plus la valeur assignée est forte, plus le risque d'atteinte du seuil est élevé.

Pour attribuer une valeur à chaque "colonne", l'utilisateur peut cliquer directement dans la grille sur le nombre de cases correspondant à son estimation. Si l'utilisateur souhaite retirer toutes les cases d'une même colonne, il peut cliquer sur la case de la colonne qui se trouve en dessous du zéro de l'axe vertical.

Etape 3 : Estimation de la probabilité d'atteinte du seuil de 1% de ceps malades Campagne d'élicitation 2019

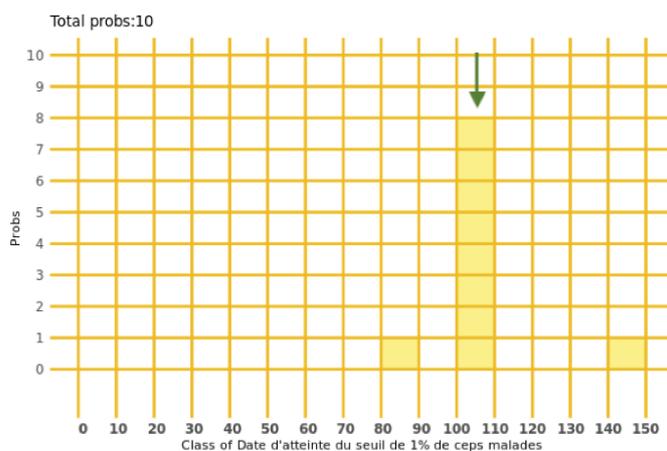
L'étape 3 va permettre au participant d'estimer la distribution des dates probables d'atteinte du seuil de 1% de ceps malades dans la parcelle de référence définie au préalable.

Une méthode conseillée pour réaliser son pronostic est présentée ci-après :



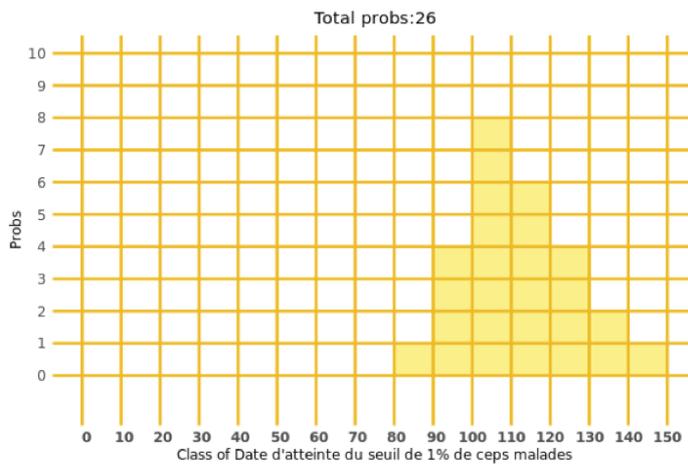
**A. Identifier les extrêmes la distribution**, c'est-à-dire (i) la première date possible à laquelle le seuil de 1% de ceps malade peut être atteint dans la parcelle et (ii) la date au delà de laquelle le seuil ne pourra pas être atteint. Dans l'exemple ci-contre, les extrêmes définis par le participant X sont fin mai et fin juillet.

Remarque : le nombre de case sélectionnées ici est donné à titre indicatif. Il peut varier selon chacun(e) et doit être ajusté de manière à correspondre au mieux au ressenti de la personne élicitée.



**B. Identifier la décade pour laquelle la probabilité que le seuil soit atteint est la plus forte** entre le 01/03/2019 et le 31/07/2019. Dans l'exemple ci-contre, le participant X estime que le seuil sera atteint le plus probablement au cours de la 2ème décade de juin.

Pour l'instant, on peut interpréter notre exemple tel que : "D'après le participant X, le seuil ne peut pas être atteint avant la dernière décade de mai et après la dernière décade de juillet. En revanche, il est très probable qu'il soit atteint au cours de la seconde décade de juin".



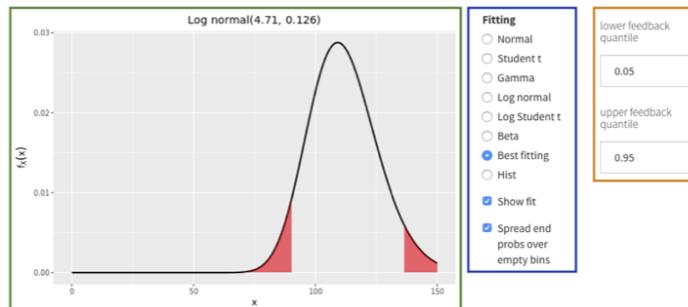
C. Estimer la probabilité que le seuil soit atteint pour les décades se trouvant entre les deux extrêmes.

La distribution ainsi estimée peut être interprétée telle que : "d'après le participant X, il y a 1 chance sur 26 ("Total probs", indiqué au dessus de la grille) que le seuil de 1% de ceps malades soit observé la dernière décade de mai dans sa parcelle de référence (colonne 80 - 90). La probabilité que le seuil soit atteint la première décade de juin est de 4 chances sur 26 (colonne 90 - 100) etc".

Une fois cette étape terminée, il est nécessaire que le participant valide son pronostic selon la méthode présentée ci-après.

#### Etape 4 : Validation du pronostic

Cette étape permet au participant de vérifier si la distribution des dates probables estimée dans l'étape 2 correspond à son jugement. Elle s'effectue dans le graphique qui s'affiche en dessous de la distribution ajustée (et qui est détaillé ci-après). Pour la visualiser dans le navigateur, défiler la page vers le bas.



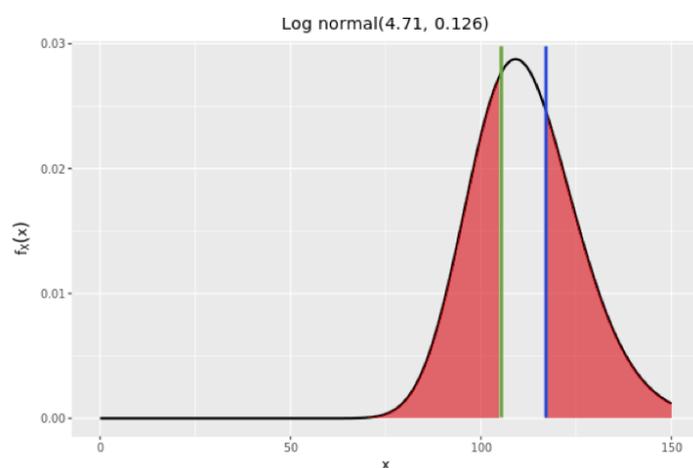
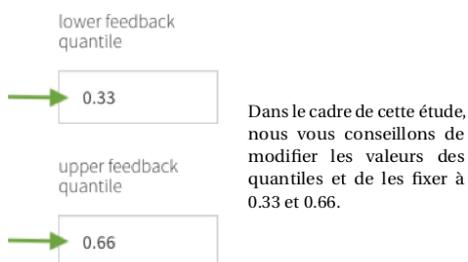
Le graphique ci-contre se divise en plusieurs partie.

La courbe tracée dans partie verte représente la fonction de densité correspondant à la distribution ajustée durant l'étape 3.

La partie bleue permet de sélectionner la loi utilisée par le logiciel pour estimer la fonction de densité. Par défaut,

l'option "Best fitting" est sélectionnée, ce qui signifie que la meilleure loi est sélectionnée par défaut par le logiciel. Le nom de la meilleure loi est affichée au dessus du graphique de la zone verte. Ici, il s'agit de la loi "Log normal" **Important** : les réglages de cette partie bleue ne doivent pas être modifiés.

La partie orange permet de sélectionner les quantiles mis en valeurs dans la partie verte. Dans ce cas, les quantiles 0.05 et 0.95 sont représentés sur le graphique. Le participant peut se baser sur les valeurs de ces quantiles pour vérifier que son pronostic correspond bien à son jugement.



Le graphique s'actualise avec les nouveaux réglages de quantiles définis. Les valeurs des quantiles sont représentées sur le graphique (quantile 0.33 représenté par une ligne verte et quantile 0.66 par une ligne bleue). Dans ce cas, la loi utilisée pour l'ajustement est la loi "Log Normal" (voir au dessus du graphique). Les valeurs correspondantes à chaque quantile se trouvent dans le tableau en dessous du graphique, dans la colonne "Log Normal" (quantile 0.33 en vert et quantile 0.66 en bleu).

Quantile values for each distribution law

|      | Normal | Student-t | Gamma  | Log normal | Log Student-t | Beta   |
|------|--------|-----------|--------|------------|---------------|--------|
| 0.33 | 105.00 | 106.00    | 105.00 | 105.00     | 105.00        | 105.00 |
| 0.66 | 117.00 | 116.00    | 117.00 | 117.00     | 116.00        | 117.00 |

Ici, le quantile 0.33 = 105 et le quantile 0.66 = 117. Le participant peut interpréter ces chiffres tels que :

- Il y a 1 chance sur 3 pour que le seuil de 1% de ceps malades soit atteint dans la parcelle avant la mi-juin (105 :

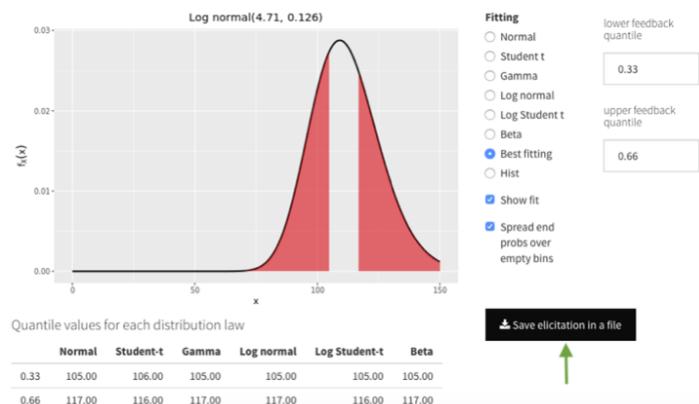
se trouve dans la colonne 100 - 110, qui correspond à la seconde décade de juin d'après le Tableau 1).

- Il y a 1 chance sur 3 pour que le seuil soit atteint après la troisième décade de juin (car le quantile 0.66 = 117).
- Il y a 1 chance sur trois pour que le seuil soit atteint entre ces deux dates.

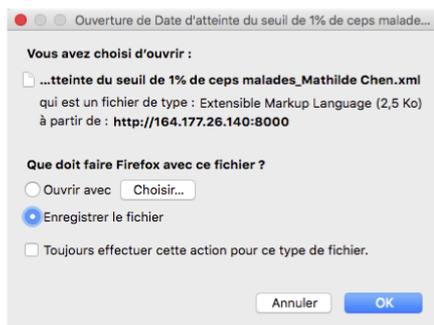
Si l'interprétation de ce graphique ne vous convient pas, le premier graphique peut être directement modifié dans la grille (cf Etape 3.C).

Dans le cas où il représente bien votre jugement, vous pouvez sauvegarder vos résultats comme expliqué dans l'étape 5.

**Etape 5 : Sauvegarde des résultats**



Une fois son pronostic validé selon l'étape 4, le participant peut sauvegarder ses résultats en cliquant sur le bouton "Save elicitation in a file".



Cette action va générer un fichier XML qu'il faut sauvegarder.

Pour cette étude, il est demandé au participant de renommer son fichier de la manière suivante :

**AAAA\_MM\_JJ\_VotreNom\_ceps.xml**

Exemples :

- 2019\_03\_01\_Chen\_ceps.xml
- 2019\_06\_26\_Raynal\_ceps.xml

Attention : si aucune fenêtre de ce type d'affiche sur votre écran, il est probable que le fichier .xml se trouve dans le dossier "Téléchargements" de votre ordinateur.

Une fois le fichier sauvegardé et renommé, transmettez vos résultats par email

|  |                         |                                      |
|--|-------------------------|--------------------------------------|
| directement à  | Mathilde CHEN           | mathilde.chen@inra.fr                |
| et à votre coordinateur régional<br>IFV référent pour le tenir informé<br>de votre participation : | François-Michel Bernard | francois-michel.bernard@vignevin.com |
|  | Xavier Burgun           | xavier.burgun@vignevin.com           |
|  | Eric Chantelot          | eric.chantelot@vignevin.com          |
|  | David Lafond            | david.lafond@vignevin.com            |
|  | Audrey Petit            | audrey.petit@vignevin.com            |
|  | Marc Raynal             | marc.raynal@vignevin.com             |

Merci pour votre contribution qui restera anonyme et servira à alimenter un travail de thèse conduit par l'INRA en partenariat avec l'ACTA et l'IFV, dans le cadre de l'amélioration des outils de suivi pour la protection du Vignoble (projet SmartPic).

Si vous êtes d'accord, nous vous solliciterons par email afin de rejouer cet exercice à plusieurs reprises en début de campagne afin d'actualiser ce pronostic en fonction de l'évolution du risque.

Nous vous demanderons alors de refaire l'exercice de manière indépendante de votre première appréciation, donc sans consulter la trace de vos réponses précédentes.

Annexe F : Bulletin d'information édité le 26 avril 2019 à partir des pronostics des experts sollicités lors de la campagne d'élicitation 2019.

## Pronostic de la date d'apparition du mildiou de la vigne - Bulletin n°4

### Contents

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Dates médianes d'apparition du mildiou par participant</b>                   | <b>3</b>  |
| 1.1. Dernier pronostic de chaque participant . . . . .                             | 4         |
| 1.2. Ensemble des pronostics de chaque participant . . . . .                       | 5         |
| <b>2. Distribution des dates probables d'apparition du mildiou de la vigne</b>     | <b>7</b>  |
| 2.1. Bordeaux . . . . .  | 7         |
| 2.2. Charentes-Cognac . . . . .  | 8         |
| 2.3. Midi-Pyrénées . . . . .   | 8         |
| 2.4. Val-de-Loire . . . . .  | 9         |
| <b>3. Evolution de la probabilité qu'une parcelle soit saine au cours du temps</b> | <b>11</b> |
| <b>4. Comparaison avec les analyses de survie</b>                                  | <b>13</b> |

Madame, Monsieur,

Dans le cadre du projet CASDAR SmartPIC, partenariat entre l'ACTA (François BRUN & Mathilde CHEN), l'IFV (Marc RAYNAL, Marc VERGNES, Xavier BURGUN), l'INRA (David MAKOWSKI) et Arvalis (François PIRAUX), nous vous avons sollicité.e pour participer à un challenge de pronostic de la date d'apparition du mildiou de la vigne.

Le but de ce challenge est de formaliser l'avis d'experts du terrain - techniciens, conseillers viticoles, viticulteurs, chercheurs – pour estimer en sortie d'hiver et début de printemps la date auquel un certain seuil de maladie est atteint sur une parcelle non-traitée. Le seuil considéré dans cette étude est le seuil de 1% de ceps contaminés dans la parcelle, ou le Témoin-Non-Traité.

Pour ce faire, il est demandé aux participants de formaliser leur pronostic sous la forme d'une distribution des dates probables d'apparition du mildiou grâce à l'outil *Licite* (<https://licite.arvalis-fr.com/licite/>). Le pronostic de chaque participant est actualisé chaque semaine, à partir du 1<sup>er</sup> avril 2019 et jusqu'à la date "réelle" d'apparition. L'actualisation de ces pronostics mène à la publication de bulletins d'informations, présentant les résultats issus des pronostics réalisés depuis le début de la campagne.

Ces bulletins présentent

- la perception de chaque participant du risque épidémique pour la saison et son évolution au cours de la campagne.
- une estimation du risque de mildiou à l'échelle d'un bassin de production, estimée à partir du pronostic des experts de cette région et présentée sous la forme (i) d'une distribution des dates probables d'apparition ou (ii) d'une courbe de survie.
- une comparaison entre les résultats des pronostics et les analyses de survie menées sur les données collectées sur le réseau de Témoins-Non-Traités (TNT) de l'IFV entre 2010 et 2018.

**Ce rapport est provisoire.** Il sera actualisé chaque semaine, en fonction de la réception de nouveaux pronostics. Il peut être partagé au sein d'animations de la communauté technique (ex: observateurs du BSV, cave coopérative, ...) de manière à constituer une base d'échanges pédagogiques.

Les résultats de cette étude constituent un matériau d'étude qui pourra, dans le cadre de la thèse de Mathilde CHEN (ACTA) et au-delà, servir à affiner nos outils de prévisions.

Nous remercions toutes les personnes ayant contribué à l'étude, et nous vous souhaitons une bonne lecture !

*François BRUN (ACTA), Mathilde CHEN (ACTA), David MAKOWSKI (INRA), Marc RAYNAL (IFV) et Marc VERGNES (IFV)*

#### Comment utiliser Licite ?

Lien vers la vidéo tutorielle pour l'utilisation de Licite : <https://www.youtube.com/watch?v=0u1HWk-Zsn0>

Lien vers la notice d'utilisation de Licite : <https://drive.google.com/file/d/1VyFLvC1czAN4roVxvS6KNcxUNFgA-seD/view?usp=sharing>

Pour plus d'informations concernant les résultats des campagnes 2017 et 2018 : [https://drive.google.com/file/d/1vfjMaarF0ODfY2huU4-mgzPSgJMQ\\_Tke/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1vfjMaarF0ODfY2huU4-mgzPSgJMQ_Tke/view?usp=sharing)



## 1. Dates médianes d'apparition du mildiou par participant

### Comment lire les graphiques ?

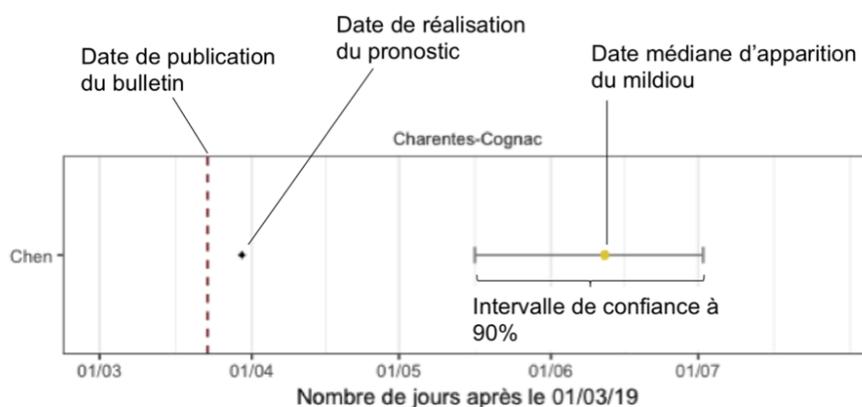
Le point représente la date médiane d'apparition du mildiou. Il s'agit que la date pour laquelle on a 50% de chance de dépasser le seuil de 1% de ceps malades, selon le participant.

Le trait horizontal gris correspond à l'intervalle de confiance. Entre le début du trait et la fin du trait, on a 90% de chance de dépasser le seuil. Ainsi, plus l'intervalle de confiance est petit, plus le pronostic est "certain".

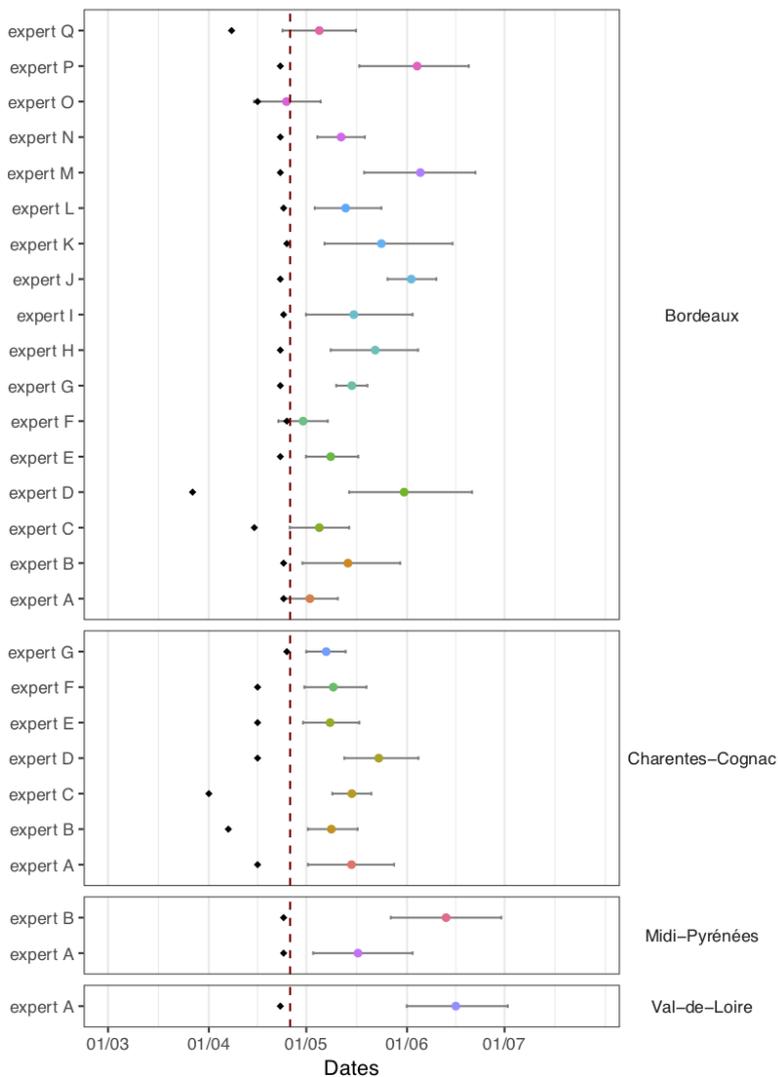
Le losange noir représente la date à laquelle a été fait le pronostic. Si ce losange se trouve dans l'intervalle de confiance alors on peut dire qu'il existe une possibilité que les premiers symptômes apparaissent au moment où le pronostic est réalisé.

Les pronostics sont anonymisés, chaque lettre correspond à un participant, réalisant son pronostic dans une seule région (le participant A de Bordeaux et le participant A de Charente-Cognac sont deux personnes différentes).

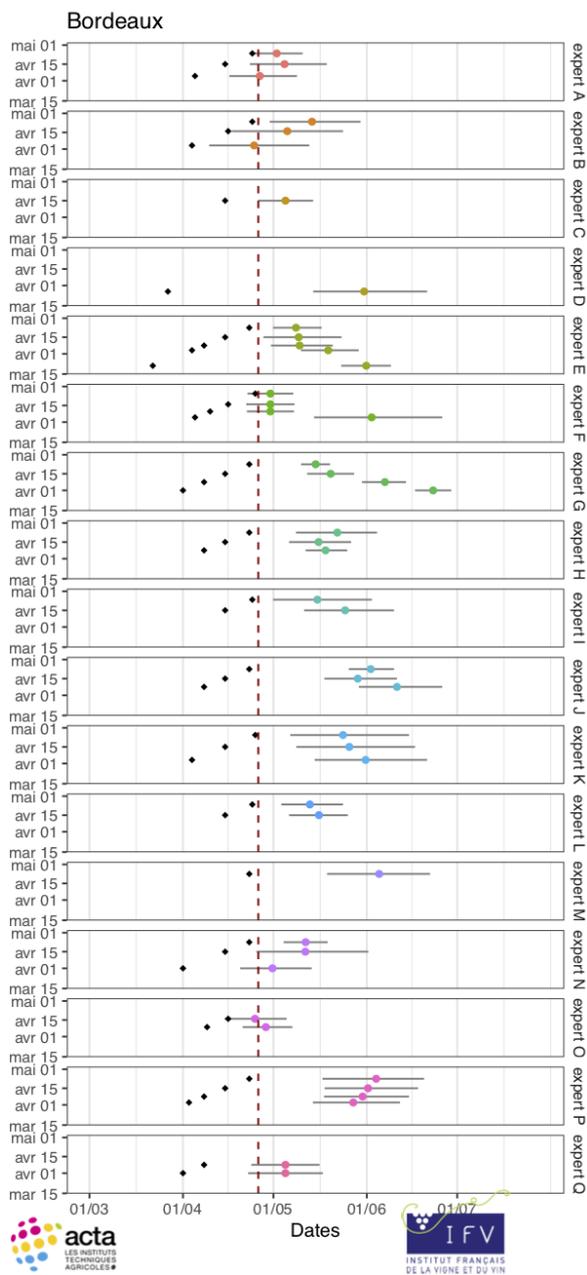
Lorsque le seuil de 1% de ceps touchés a été atteint, un cercle rouge est représenté pour les participants concernés

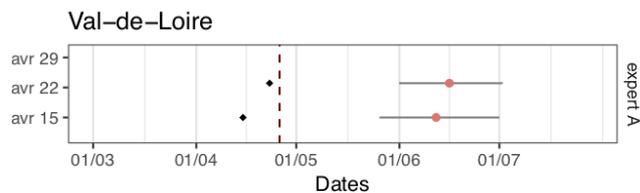
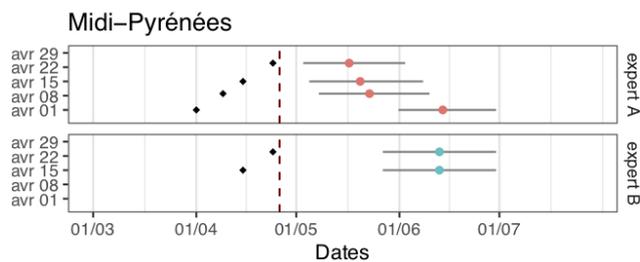
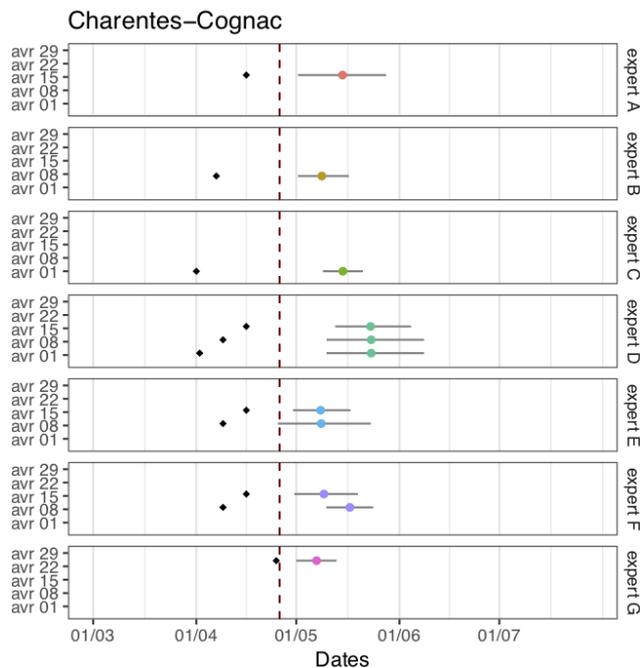


**1.1. Dernier pronostic de chaque participant.**



1.2. Ensemble des pronostics de chaque participant





## 2. Distribution des dates probables d'apparition du mildiou de la vigne

Les graphiques suivants représentent la distribution des dates probables d'apparition du mildiou issue des pronostics des experts.

L'axe horizontal représente le temps.

Chaque courbe en pointillé correspond au meilleur ajustement possible du dernier pronostic de chaque expert (il s'agit de la distribution générée par l'outil MATCH une fois l'histogramme rempli). La courbe en trait plein représente le "linear pool", c'est-à-dire la moyenne de tous les pronostics individuels, pour une seule région. Lorsqu'un seul expert est élicité dans une région, seul son pronostic est affiché.

Le pic de chaque courbe correspond au mode de la distribution. Il s'agit de la date la plus probable d'apparition du mildiou estimée par chaque participant.

L'étendue de la courbe reflète l'incertitude du participant.

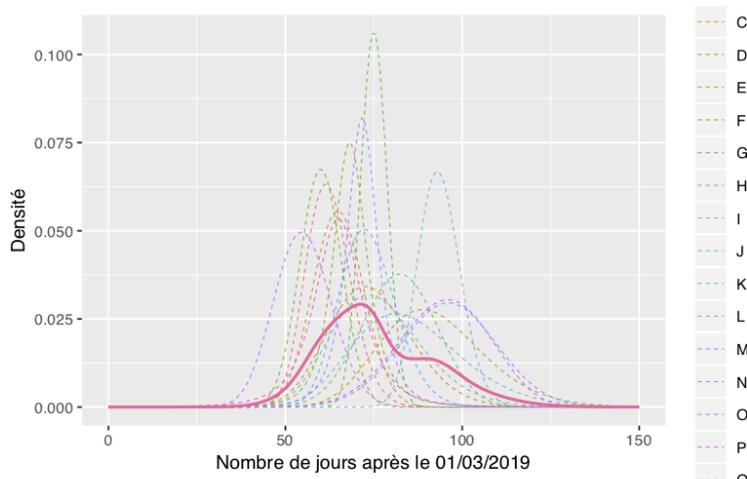
**La courbe en trait plein correspond à la distribution combinant toutes les distributions individuelles.**

La probabilité d'apparition du mildiou à différentes dates peut être estimée à partir des distributions moyennes (*linear pool*). Dans ce bulletin, nous avons choisi d'estimer la probabilité d'apparition au 15/04/2019, au 01/05/2019, au 15/05/2019 et au 01/06/2019.

### 2.1. Bordeaux

D'après la distribution moyenne calculée à partir des pronostics des participants de la région de Bordeaux :

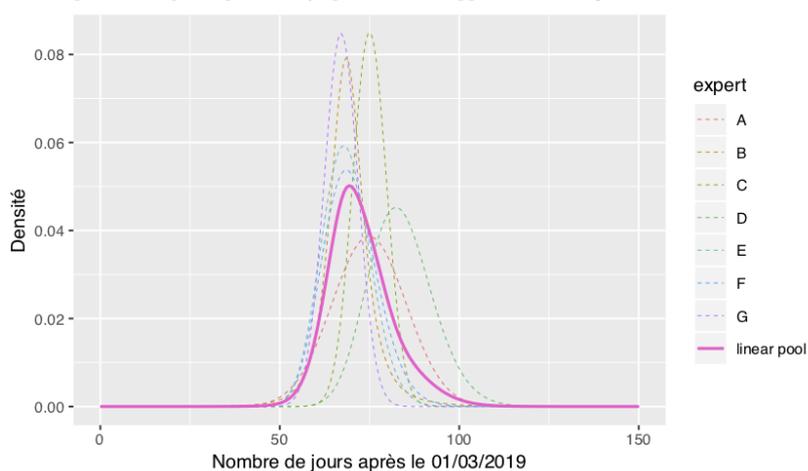
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/04/2019 est de 0.9%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/05/2019 est de 17.3%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/05/2019 est de 53.7%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/06/2019 est de 82.6%



### 2.2. Charentes-Cognac

D'après la distribution moyenne calculée à partir des pronostics des participants de la région de Charentes-Cognac :

- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/04/2019 est de 0%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/05/2019 est de 8.1%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/05/2019 est de 65.5%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/06/2019 est de 96.8%



### 2.3. Midi-Pyrénées

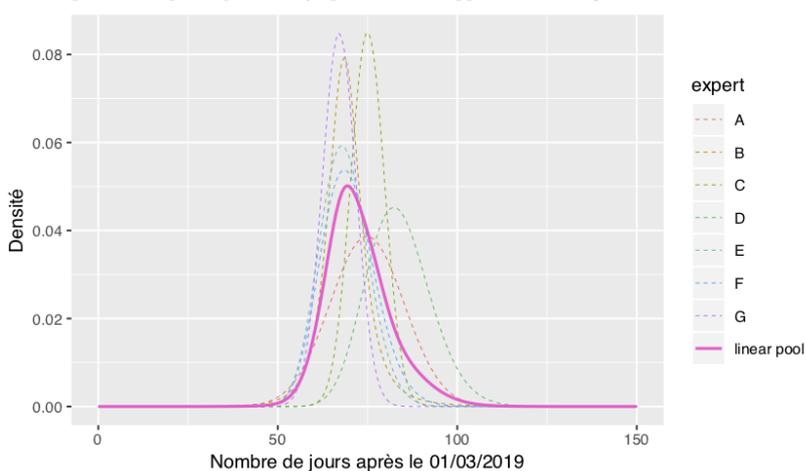
D'après la distribution moyenne calculée à partir des pronostics des participants de la région de Midi-Pyrénées :

- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/04/2019 est de 0.2%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/05/2019 est de 4.2%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/05/2019 est de 21.8%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/06/2019 est de 53.7%

### 2.2. Charentes-Cognac

D'après la distribution moyenne calculée à partir des pronostics des participants de la région de Charentes-Cognac :

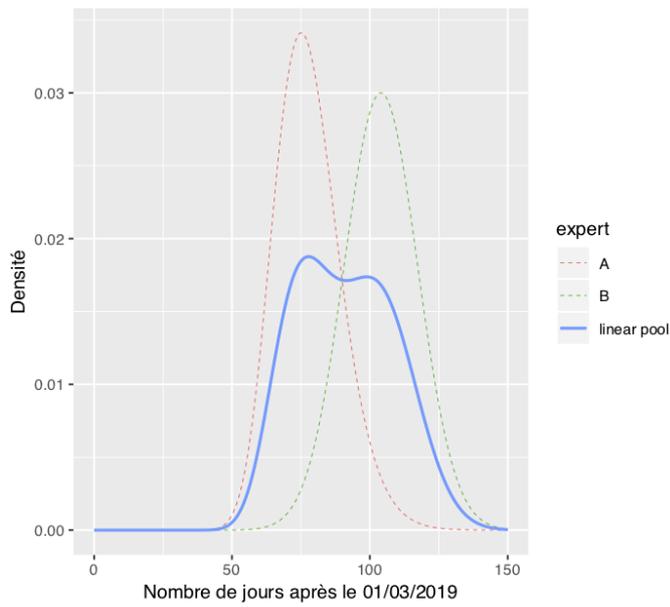
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/04/2019 est de 0%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/05/2019 est de 8.1%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/05/2019 est de 65.5%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/06/2019 est de 96.8%



### 2.3. Midi-Pyrénées

D'après la distribution moyenne calculée à partir des pronostics des participants de la région de Midi-Pyrénées :

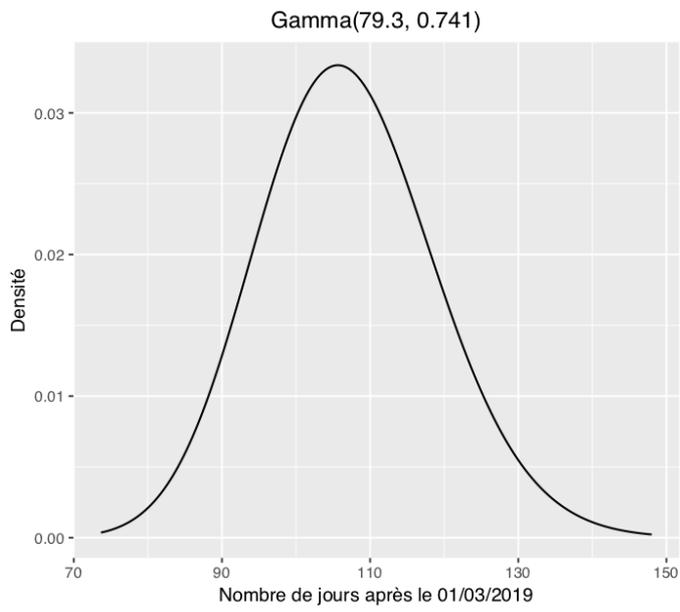
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/04/2019 est de 0.2%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/05/2019 est de 4.2%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/05/2019 est de 21.8%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/06/2019 est de 53.7%



#### 2.4. Val-de-Loire

D'après la distribution moyenne calculée à partir des pronostics des participants du Val-de-Loire :

- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/04/2019 est de 0%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/05/2019 est de 0%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 15/05/2019 est de 0.4%
- la probabilité que les premiers symptômes soient apparus dans la région au 01/06/2019 est de 10.8%



### 3. Evolution de la probabilité qu'une parcelle soit saine au cours du temps

A partir des distributions de dates d'apparitions du mildiou présentées ci-dessus, nous avons estimé la probabilité qu'une parcelle reste saine.

Les graphiques ci-dessous représente l'évolution de cette probabilité au cours de la campagne. Au début de la campagne, la probabilité que la parcelle soit saine est de 100%. Elle décroît petit à petit au cours du temps. Cette probabilité a été estimée à partir de chaque pronostic (courbes en pointillés) puis à partir de la moyenne de tous les pronostics, pour une même région (courbe pleine).

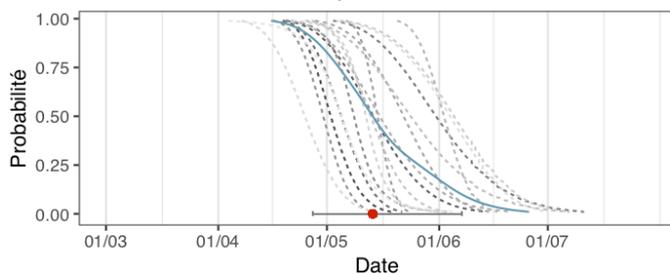
Plus la courbe décroît rapidement, plus le risque d'apparition du mildiou est précoce.

Pour faciliter la lecture de cette courbe, la date à laquelle la date médiane d'apparition du mildiou, c'est-à-dire la date à laquelle on a 50% de chance que la parcelle soit saine, est marquée sur le graphique par un losange rouge. L'intervalle entre les dates où la probabilité d'infection est de 10 et 90% est également représenté par un trait horizontal.

## \$Bordeaux

#### Bordeaux

Evolution de la probabilité que la parcelle reste saine au cours du temps



Pronostiqueur

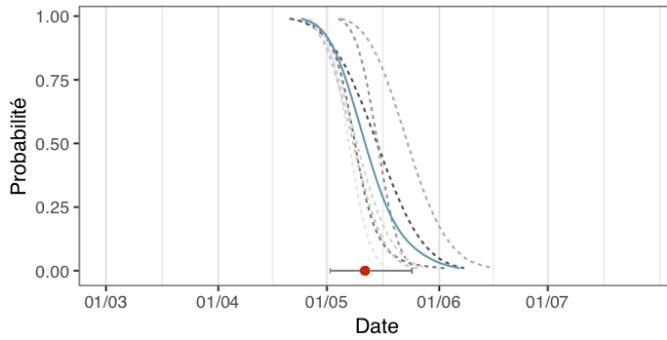
|            |            |            |            |       |
|------------|------------|------------|------------|-------|
| — expert.A | — expert.E | — expert.I | — expert.M | — ex  |
| — expert.B | — expert.F | — expert.J | — expert.N | — lin |
| — expert.C | — expert.G | — expert.K | — expert.O |       |
| — expert.D | — expert.H | — expert.L | — expert.P |       |

##

## \$`Charentes-Cognac`

**Charentes–Cognac**

Evolution de la probabilité que la parcelle reste saine au cours du temps

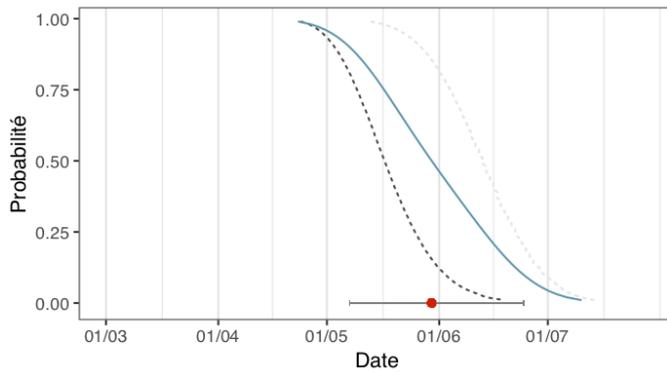


Pronostiqueur — expert.A — expert.C — expert.E — expert.G  
 — expert.B — expert.D — expert.F — linearPool

##  
 ## \$`Midi-Pyrénées`

**Midi–Pyrénées**

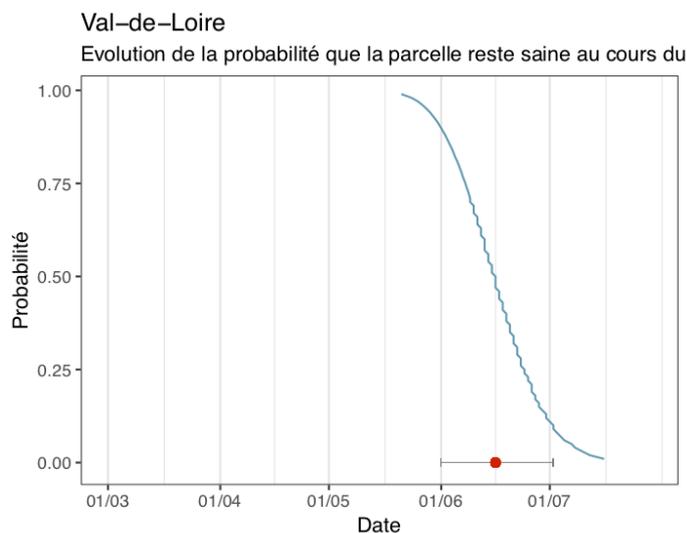
Evolution de la probabilité que la parcelle reste saine au cours du temps



Pronostiqueur — expert.A — expert.B — linearPool

##  
 ## \$`Val-de-Loire`





#### 4. Comparaison avec les analyses de survie

Les courbes estimées dans la partie 3 peuvent être comparées aux courbes de survie estimées à partir des données collectées sur les Témoins Non Traités (TNT) de l'IFV dans le Bordelais.

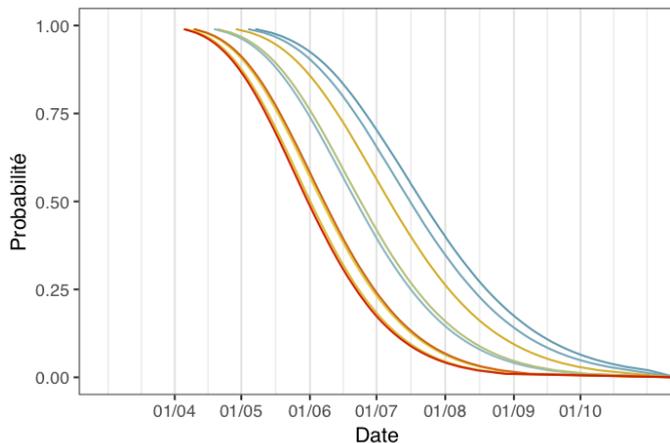
Nous vous présentons ici les courbes issues d'un modèle qui estime la probabilité qu'une parcelle reste saine au cours du temps pour chaque millésime entre 2010 et 2018. Chaque courbe correspond à une année différente. La courbe se rapprochant le plus de l'axe des x représente l'année durant laquelle le seuil de 1% de ceps malades a été observé très précocement dans les TNT de la région de Bordeaux (partie A de la figure ci-dessous).

Ces résultats sont aussi présentés de la même manière que les pronostics. Chaque année est caractérisée par la date à laquelle le seuil a été atteint dans 50% des parcelles analysées (la date médiane). Chaque année est aussi caractérisée par l'intervalle entre les dates auxquelles le seuil a été atteint dans 10 et 90% des parcelles, respectivement. La date médiane est représentée par un point et l'intervalle par un trait horizontal (partie B de la figure ci-dessous).

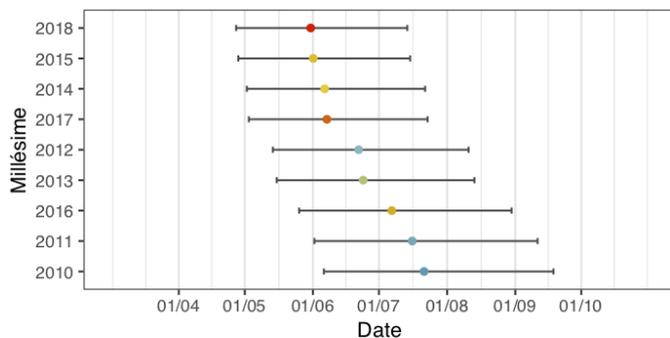
En comparant les années sur les dates médiane, 2018, 2015 et 2014 sont les années les plus précoces, d'après les analyses. A l'inverse, 2010, 2011 et 2016 sont plus tardives pour les vignobles Bordelais.

Analyses de survie

A. Evolution de la probabilité que la parcelle reste saine au cours du temps entre 2010 et 2018



B. Date médiane d'apparition du mildiou et intervalles de confiance à 90% entre 2010 et 2018



Millésime ● 2010 ● 2012 ● 2014 ● 2016 ● 2018  
 ● 2011 ● 2013 ● 2015 ● 2017



Ici, nous comparons les estimations issues de la moyenne des pronostic ("linear pool") à celles issues des modèles. Pour faciliter la comparaison, seules deux années très contrastées sont représentées : 2010 et 2015.

Les courbes bleues représentent la probabilité qu'une parcelle soit saine au cours du temps **2018** et en **2010**, d'après le modèle. La courbe supérieure bleue correspond à 2010 et la courbe inférieure à 2018.

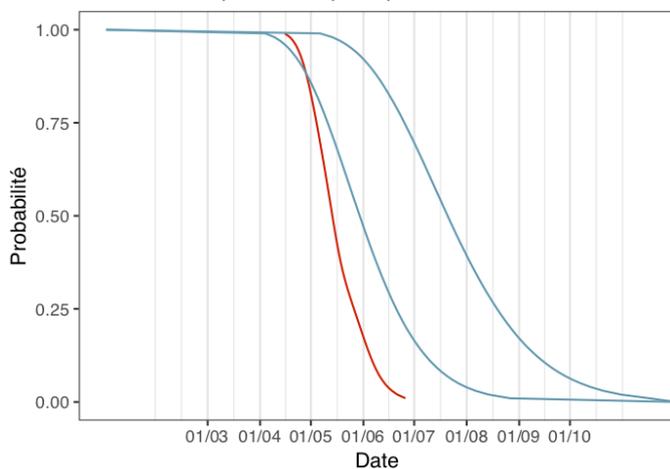
Les courbes rouges correspondent aux estimations issues de la moyenne des pronostics (ou au pronostic du seul expert élicité, lorsqu'il n'y a qu'un seul expert). Il s'agit des courbes en trait pleins représentées dans la partie 3 de ce document.

*Remarque : il faut prendre en compte le fait que ces courbes ont été estimées à partir d'observations réalisées dans la région de Bordeaux.*

## \$Bordeaux

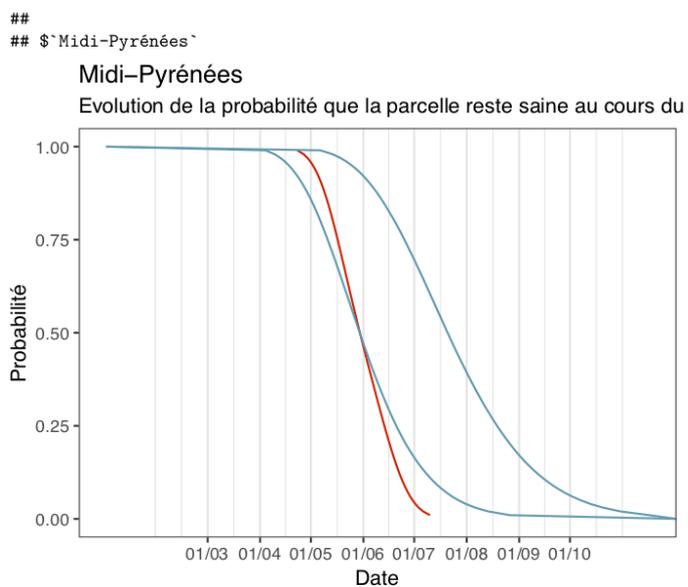
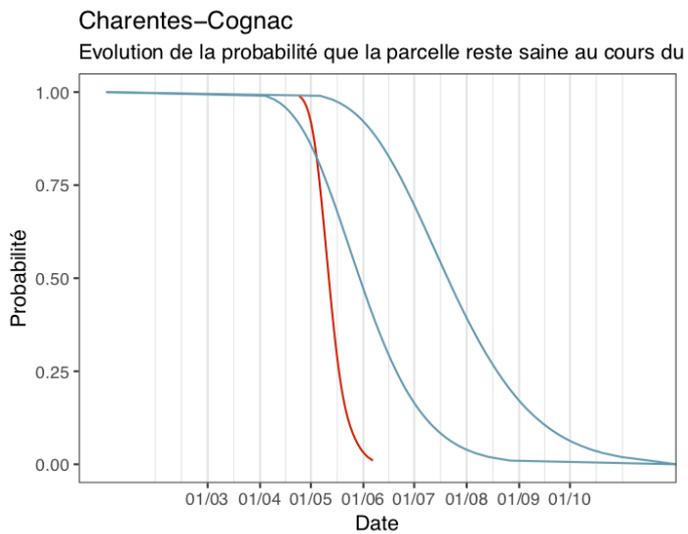
### Bordeaux

Evolution de la probabilité que la parcelle reste saine au cours du



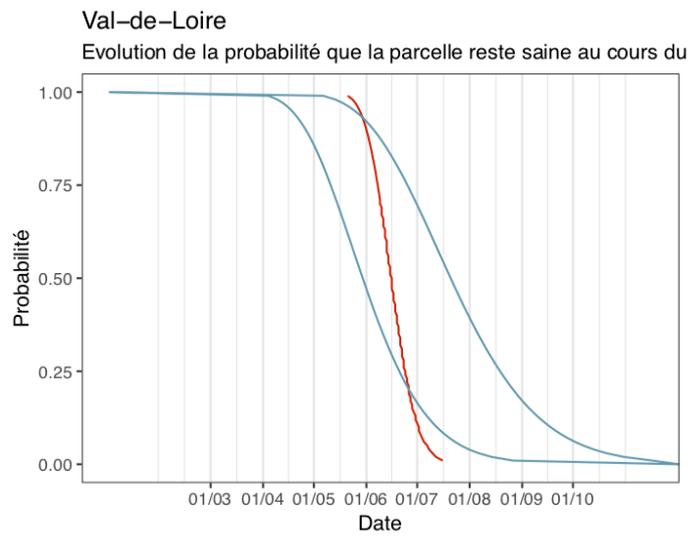
##

## \$`Charentes-Cognac`



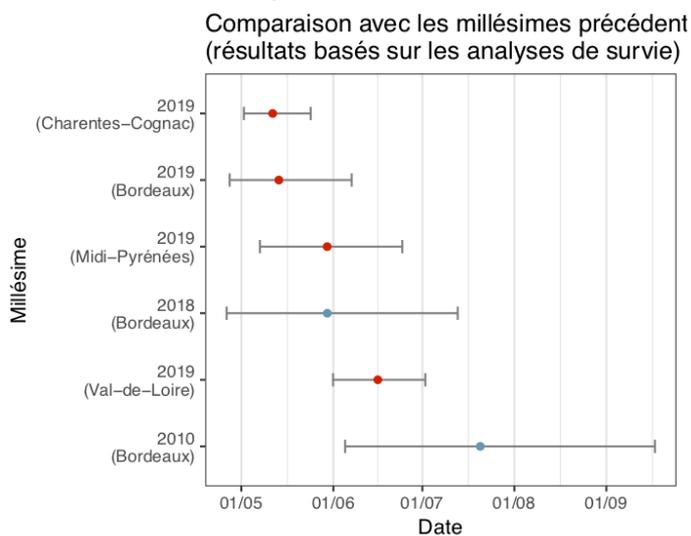
##  
## \$`Val-de-Loire`





Pour finir, nous pouvons comparer les courbes de chaque région entre elles et avec les résultats des analyses de survie.

*Remarque : il faut prendre en compte le fait que les estimations pour 2010 et 2018 ont été estimées à partir d'observations réalisées dans la région de Bordeaux.*



## Annexes du Chapitre 5

*Annexe G: Supplementary data for Chapter 5.*

Description: The accompanying Excel spreadsheet shows the results of each prognostic performed during the 2017 and the 2018 elicitation campaign. These results include:

- Prognostic ID, corresponding to the combination of the expert ID and of the date when the prognostic was made;
- Values for every chip. All chips constitute an histogram;
- The distribution that best fits chips is automatically selected by MATCH Tool<sup>®</sup>;
- The parameters corresponding to the best distribution;
- Expert ID (a letter or a combination of letters) and expertise region
- The observed onset date

Supplementary data can be downloaded from this repository:

[https://github.com/MathildeChen/PhD-Supplementary-Data/blob/master/Supp\\_Data\\_Chap\\_5.xlsx](https://github.com/MathildeChen/PhD-Supplementary-Data/blob/master/Supp_Data_Chap_5.xlsx)

## Annexes du Chapitre 6

*Annexe H: Supplementary data for Chapter 6.*

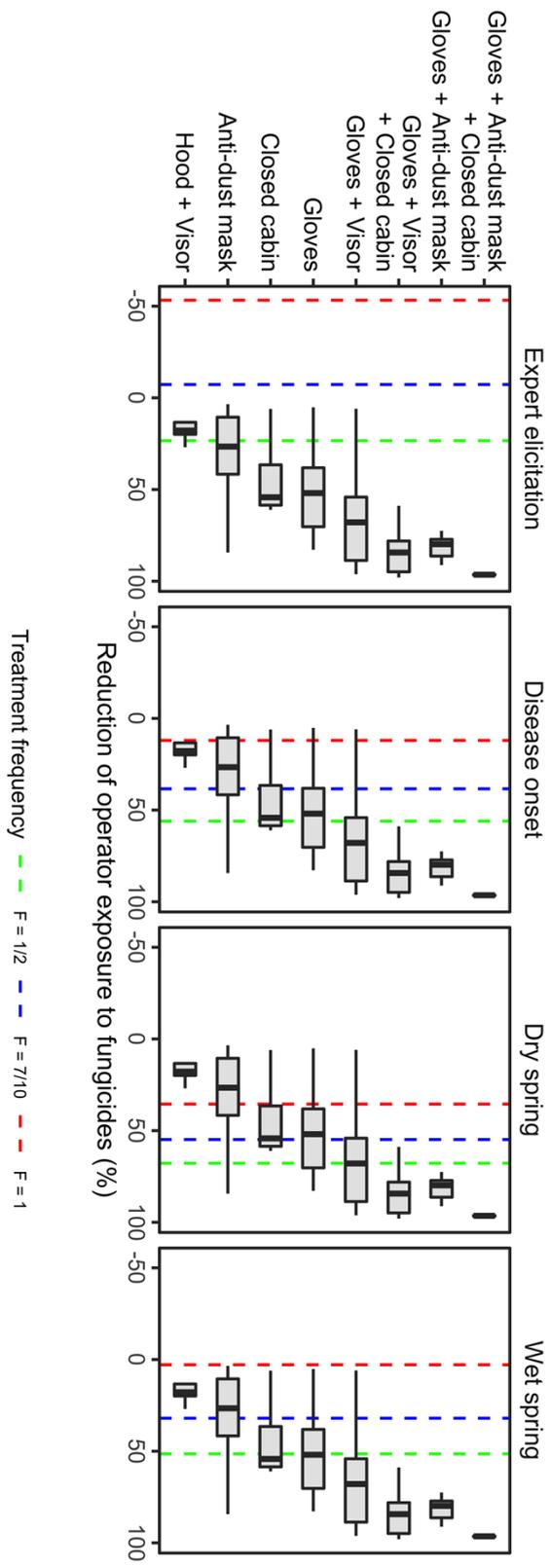
Description: The accompanying Excel spreadsheet shows inputs of AOEM exposure model. These inputs were used in order to compute operator exposure to 14 molecules in nine scenarios involving different combinations of PPE. These inputs include:

- Active substances characteristics (name of the molecule, AOEL, AAOEL if applicable, application rate, DT50, DFR, absorption rate, absorption rate in solution, oral absorption rate, inhalation rate, volatility)
- Fungicide products characteristics (name of the product)
- PPE scenarios features (crop type, location of treatment, application mean, application equipment, buffer zone, number of application, interval between several applications, season of application, worn gloves, respiratory and head protection during mixing and loading, use of bag during mixing and loading, worn gloves, clothes, respiratory and head protection during pesticide application, type of tractors used during pesticide application).

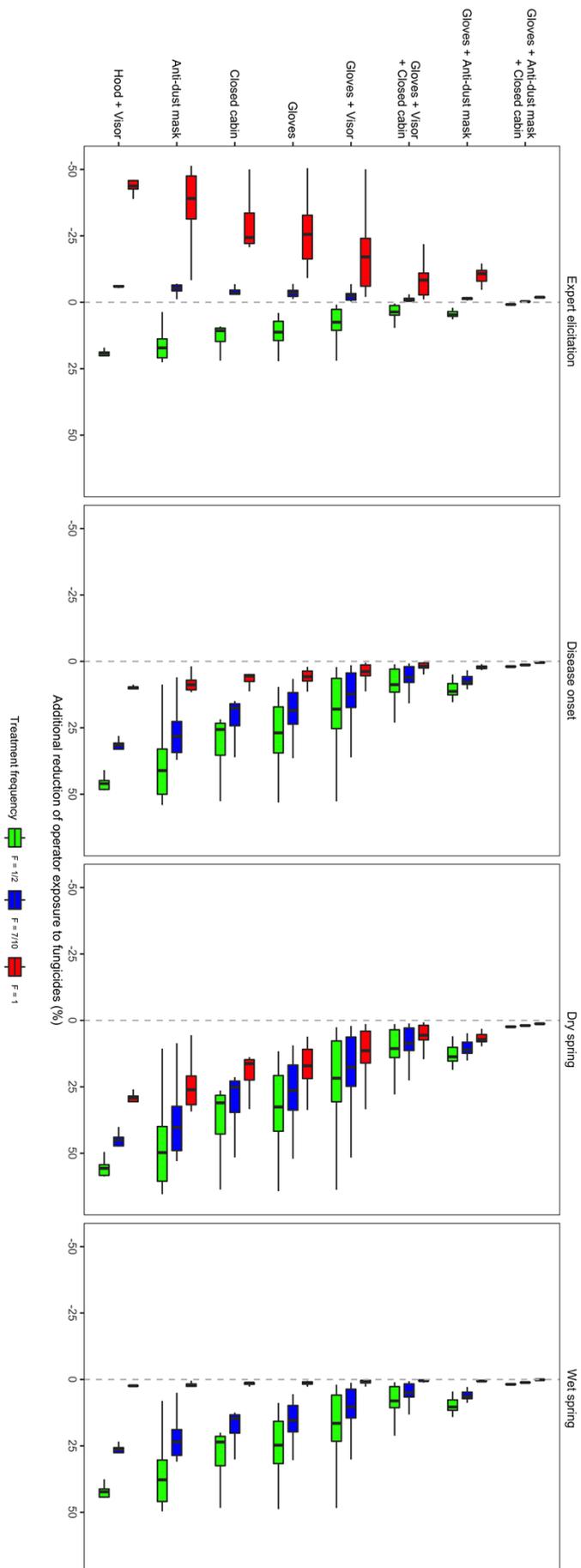
Supplementary data can be downloaded from this repository:

[https://github.com/MathildeChen/PhD-Supplementary-Data/blob/master/Supp\\_Data\\_Chap\\_6.xlsx](https://github.com/MathildeChen/PhD-Supplementary-Data/blob/master/Supp_Data_Chap_6.xlsx)

Annexe I: Levels of reduction of operator exposure to 14 fungicide molecules for various operator protection scenarios. Vertical lines indicate the median decrease in exposure achieved by different control strategies. Each cell represents results for different date of the first application and the color of the line indicates treatment frequency.



Annexe J : Additional reduction of operator exposure resulting from delayed first anti-GDM treatment combined with various operator protection scenarios, according to different GDM control strategies. Each cell represents results for different date of the first application and the color of the boxplots indicates treatment frequency.



## Annexes du Chapitre 7

*Annexe K: Supplementary data for Chapter 7.*

Description: The accompanying Excel spreadsheet shows inputs and outputs variables used to fit different models in the Chapter 7.

Inputs include:

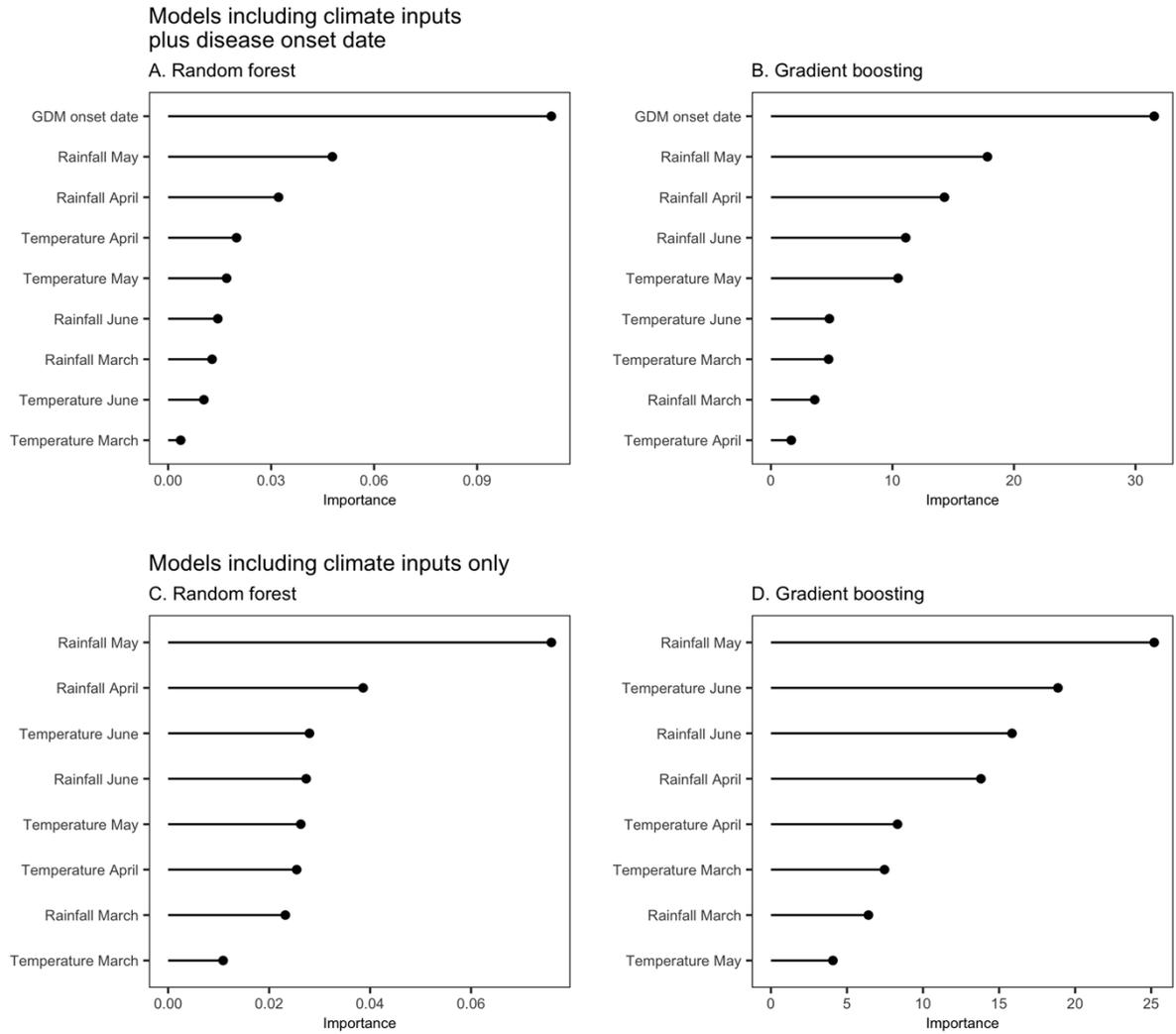
- GDM onset date for 151 untreated plots; when this date is censored, it is imputed using a semi-parametric survival model including rainfall between March and June. See paragraph 7.6.
- Several climatic variables (mean precipitation and temperatures in March, April, May and June)

Outputs include four types of notation performed on the 151 untreated plots at mid August. These notations correspond to GDM incidence on leaves (MFF\_fin), GDM incidence on bunches (MGF\_fin), GDM severity on leaves (MFI\_fin) and GDM severity on bunches (MGI\_fin).

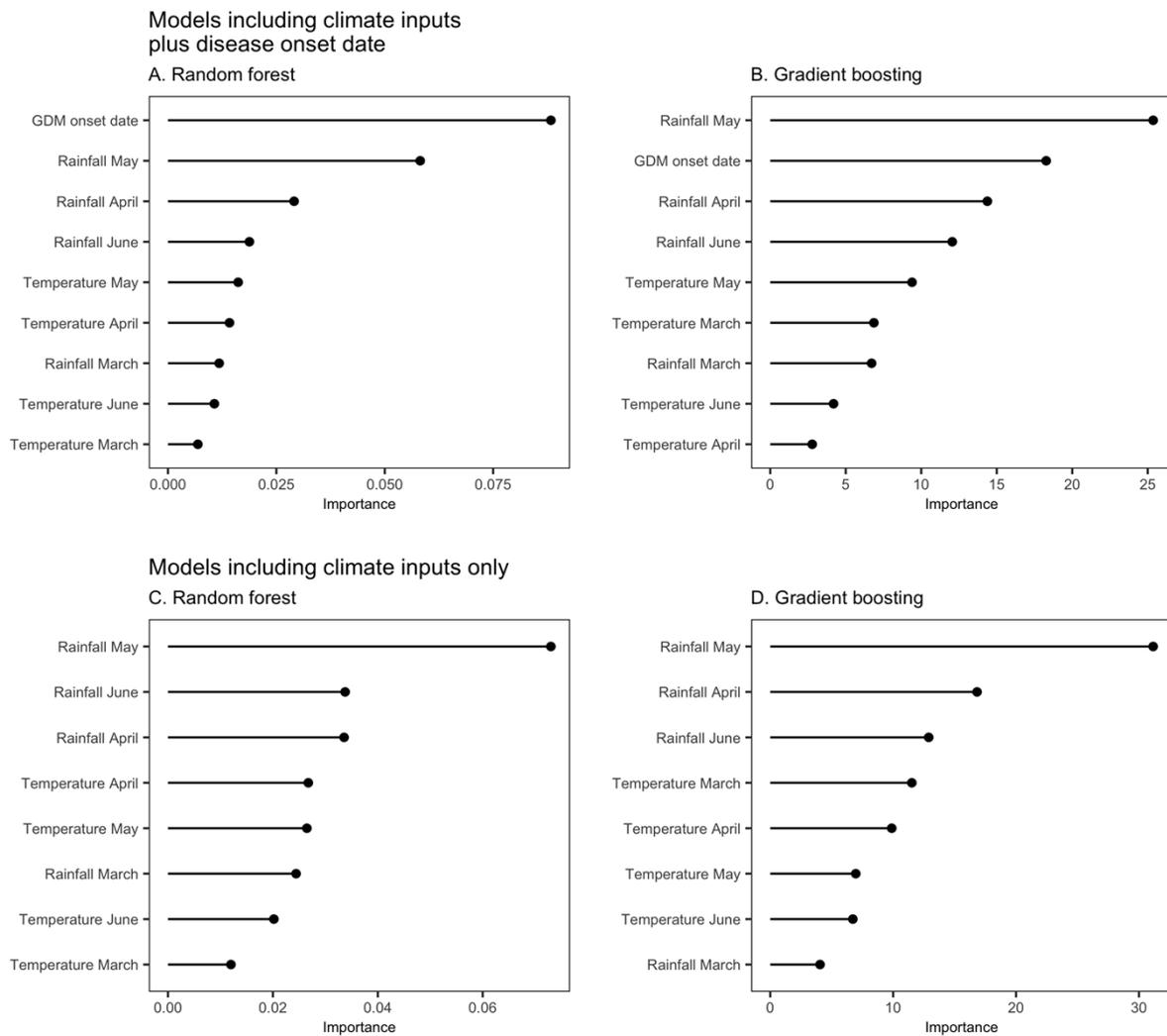
This dataset can be downloaded from the followed link:

[https://github.com/MathildeChen/PhD-Supplementary-Data/blob/master/Supp\\_Data\\_Chap\\_7.xlsx](https://github.com/MathildeChen/PhD-Supplementary-Data/blob/master/Supp_Data_Chap_7.xlsx)

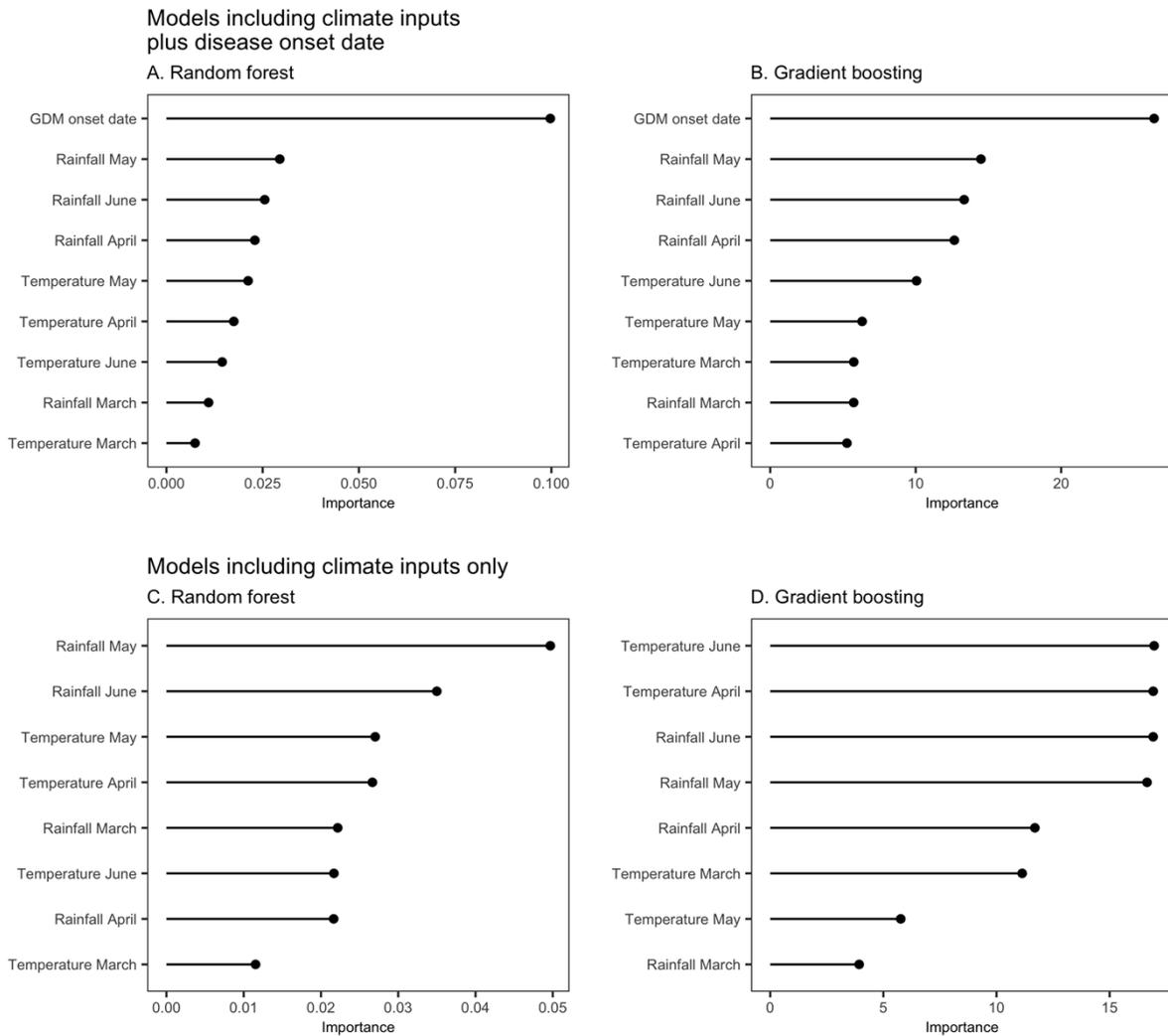
Annexe L: Importance of the inputs used in random forest and gradient boosting models predicting the risk of high GDM incidence on leaves at bunch closing stage. Models presented in A and B include all inputs (date and climate) and models presented in C and D include climate inputs only. The importance metric reflects the gain in the model performance resulting from the use of each input.



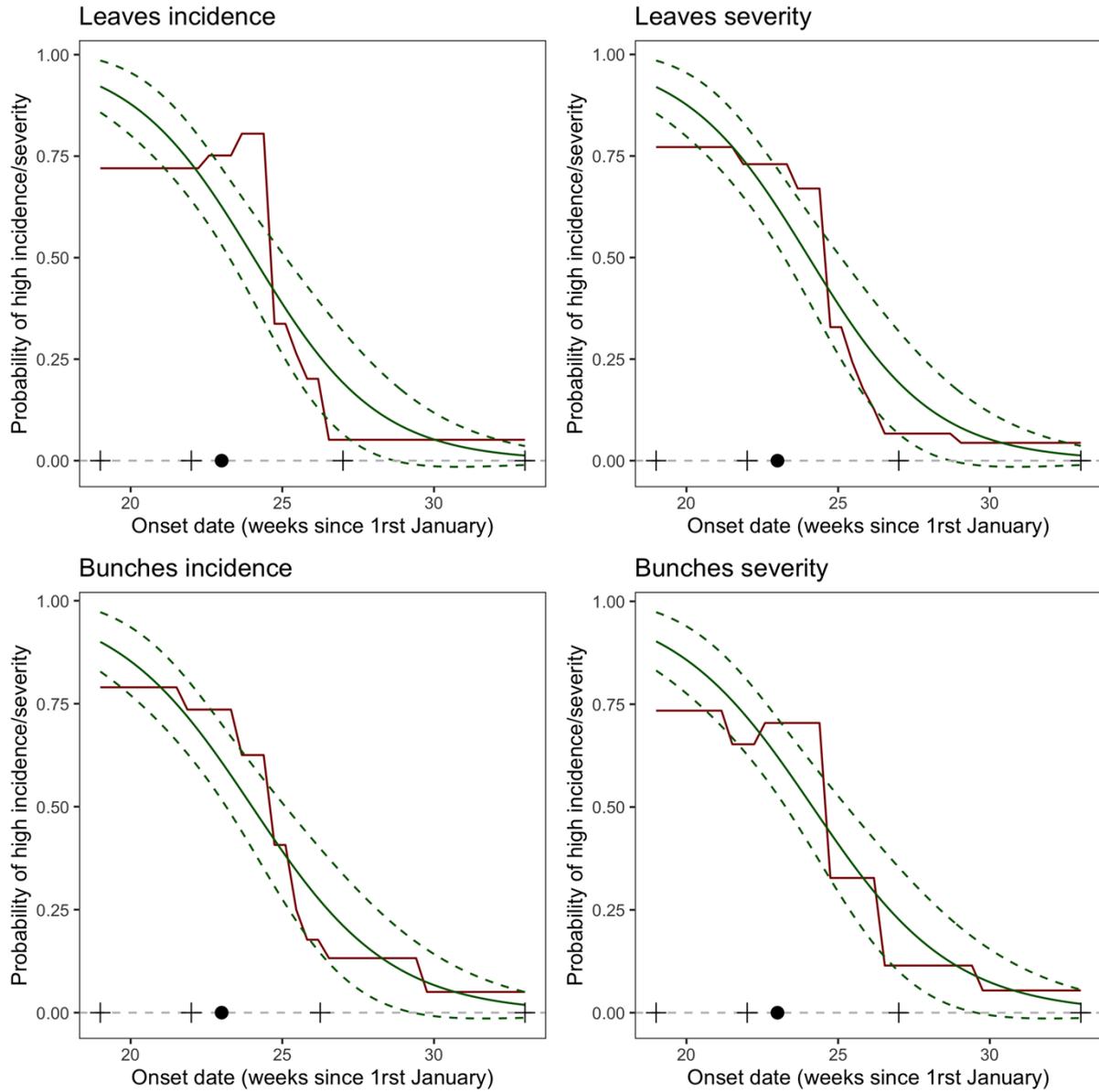
Annexe M: Importance of the inputs used in random forest and gradient boosting models predicting the risk of high GDM incidence on bunches at bunch closing stage. Models presented in A and B include all inputs (date and climate) and models presented in C and D include climate inputs only. The importance metric reflects the gain in the model performance resulting from the use of each input.



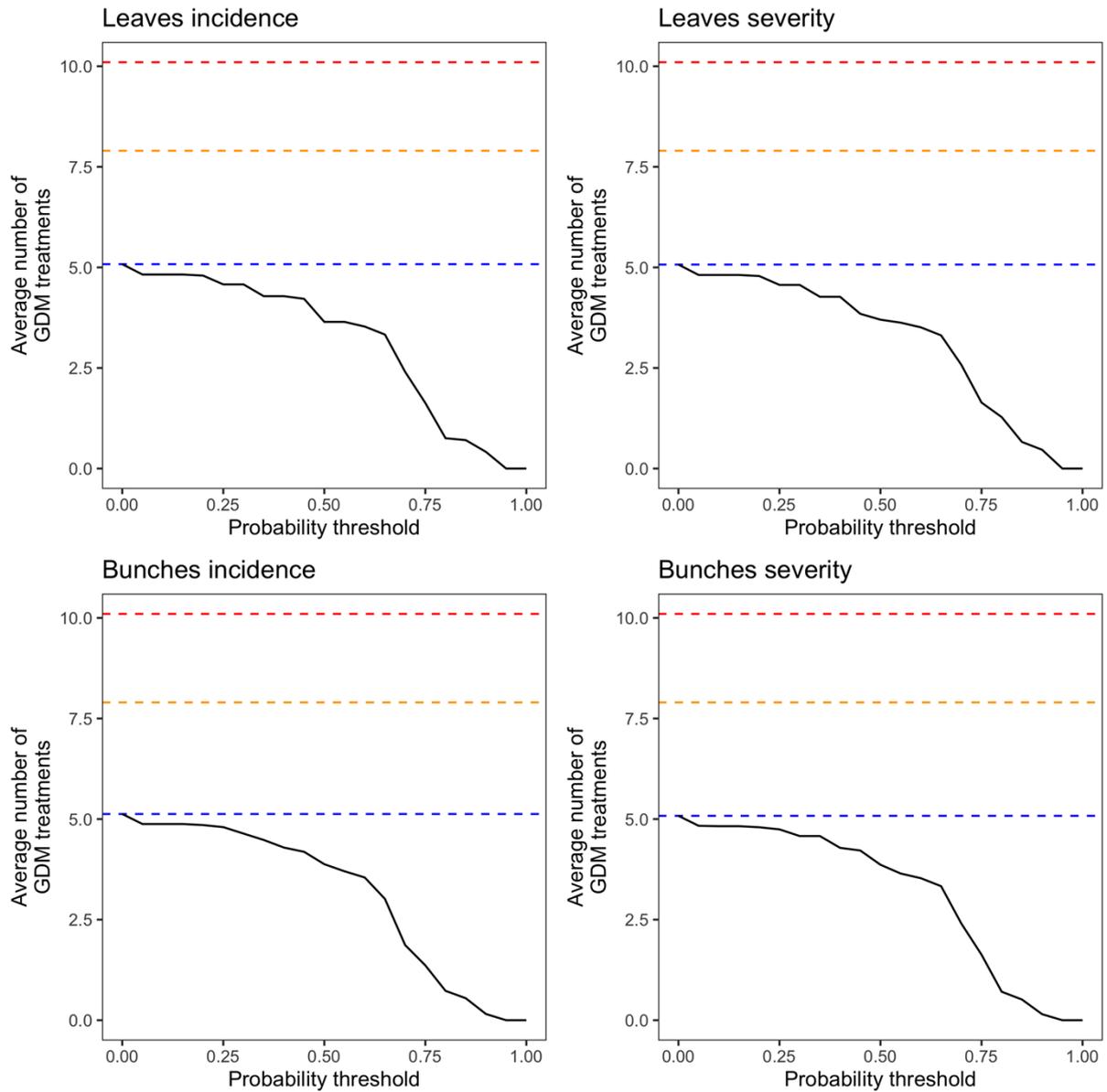
*Annexe N: Importance of the inputs used in random forest and gradient boosting models predicting the risk of high GDM severity on bunches at bunch closing stage. Models presented in A and B include all inputs (date and climate) and models presented in C and D include climate inputs only. The importance metric reflects the gain in the model performance resulting from the use of each input.*



Annexe O: Response of probability of high incidence or severity on leaves or on bunches to date of disease onset estimated with the GLM and its 95% confidence interval (in green), and partial dependence plot obtained with the gradient boosting algorithm including climate inputs and date of disease onset (in red). Median, minimum, 1st and 3rd quartiles, and maximum of observed onset dates are represented by a dot and four crosses, respectively.

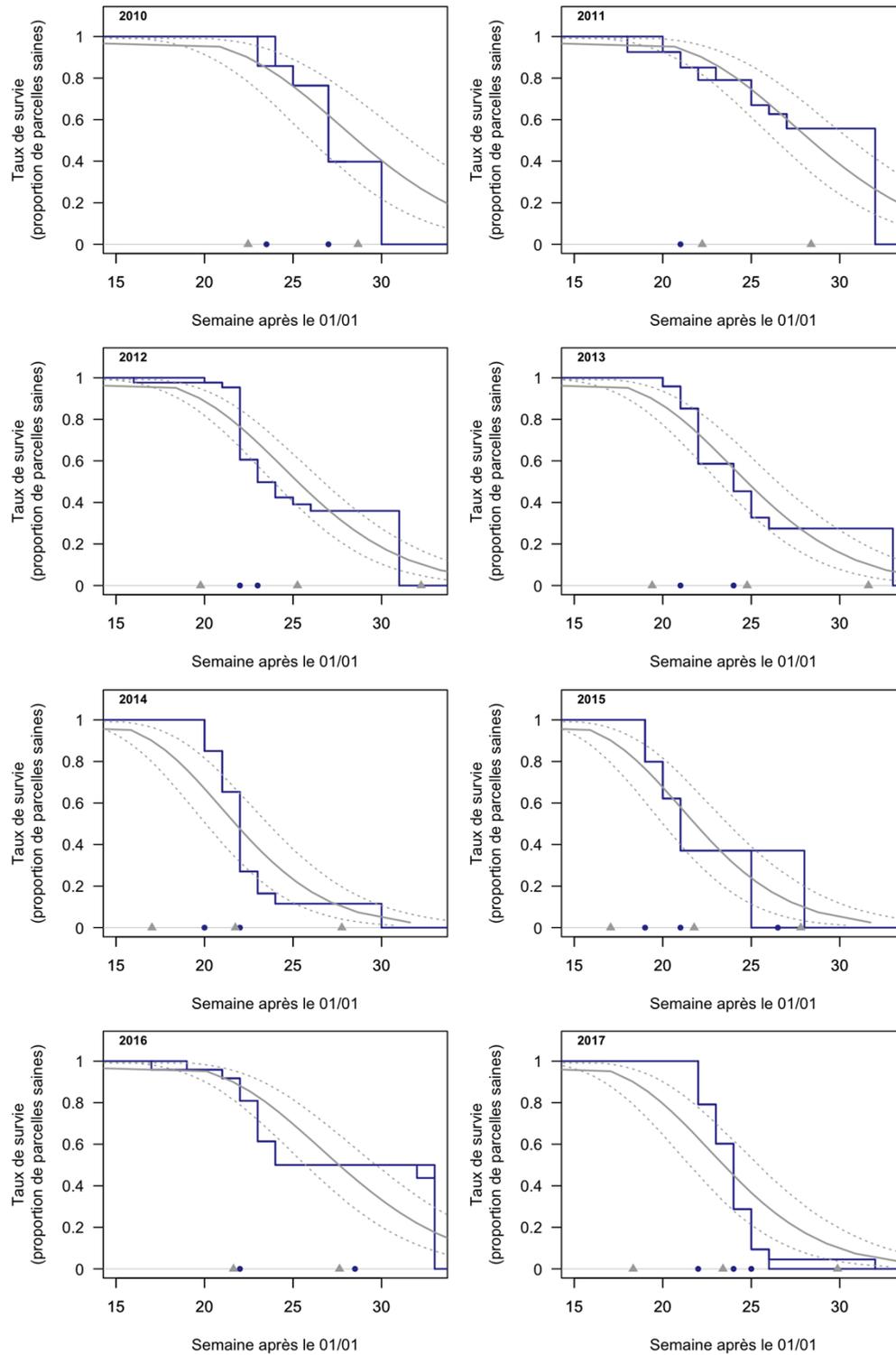


Annexe P: Number of fungicide treatments applied to control GDM in Bordeaux vineyards as a function of a predefined triggering probability threshold (probability of high GDM incidence or severity on leaves or on bunches). The black curve indicates the average numbers of fungicide treatments in the vineyard plots of our dataset computed while assuming that the first treatment is triggered only when the GLM probability of high severity exceeds the value given in the x-axis. Blue line represents the number of treatments for threshold = 0, i.e. when the first treatment is applied in all plots as soon as GDM symptoms are detected. Red and orange lines correspond to the average numbers of treatments recorded by the SSP in 2013 and 2010, respectively.

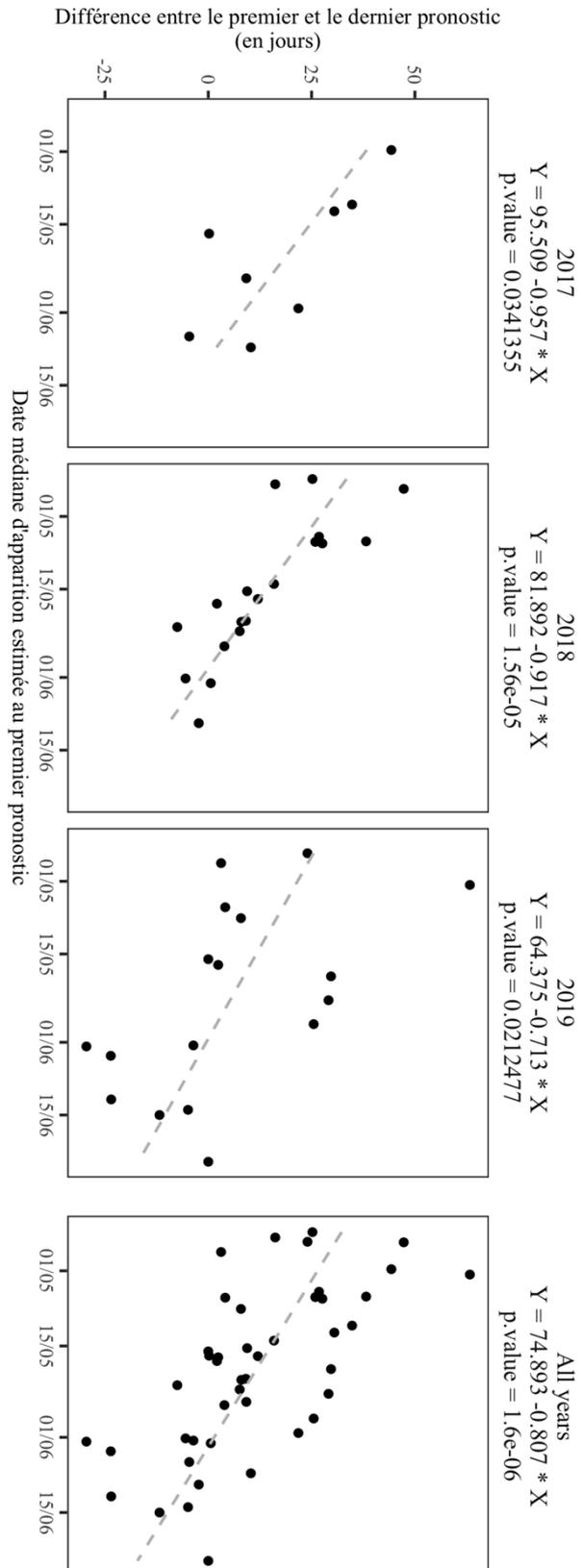


## Annexes de la discussion

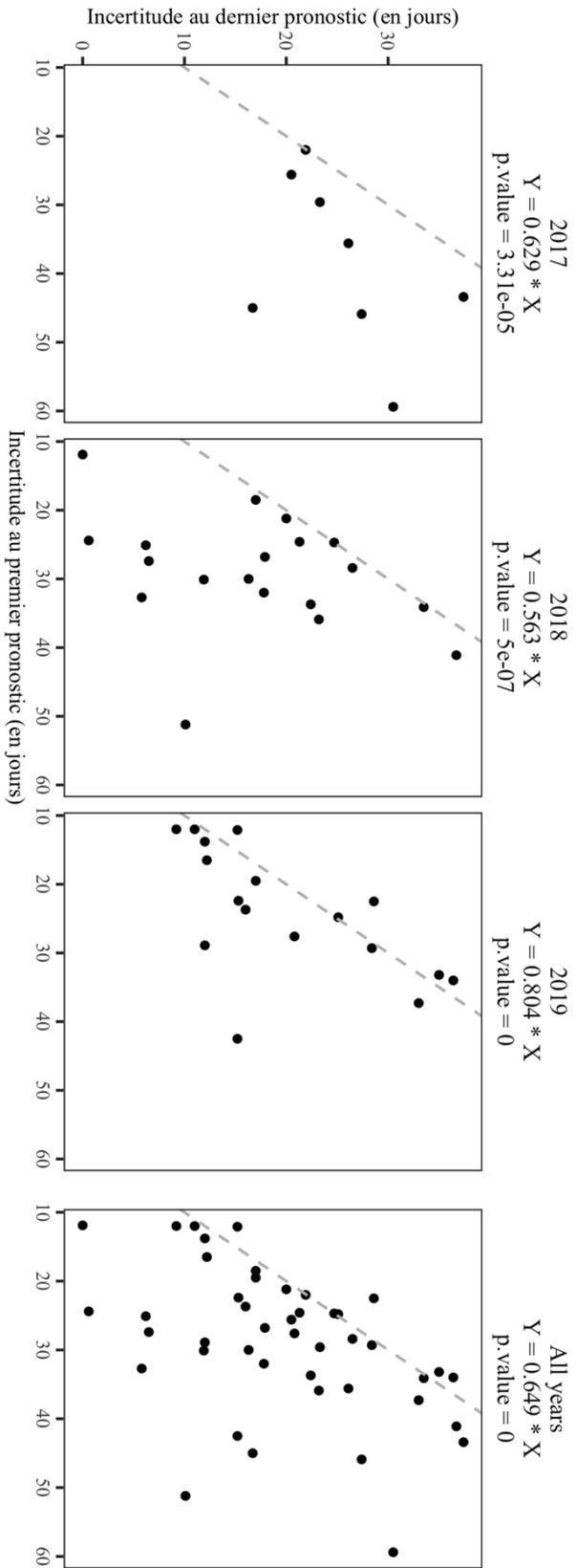
Annexe Q : Proportion de parcelles saines (parcelles sans symptômes sur cep) par millésime entre 2010 et 2017 estimée par analyses de survie non paramétrique (NPMLE, courbes bleues) et paramétrique (modèle log-normal, courbes grises). Les points bleus et gris à la base du graphique indiquent les dates estimées auxquelles la proportion de parcelles saines atteint 90, 50 et 10 % pour les analyses non paramétriques et paramétriques, respectivement. Les courbes en pointillés représentent les intervalles de confiance à 95%.



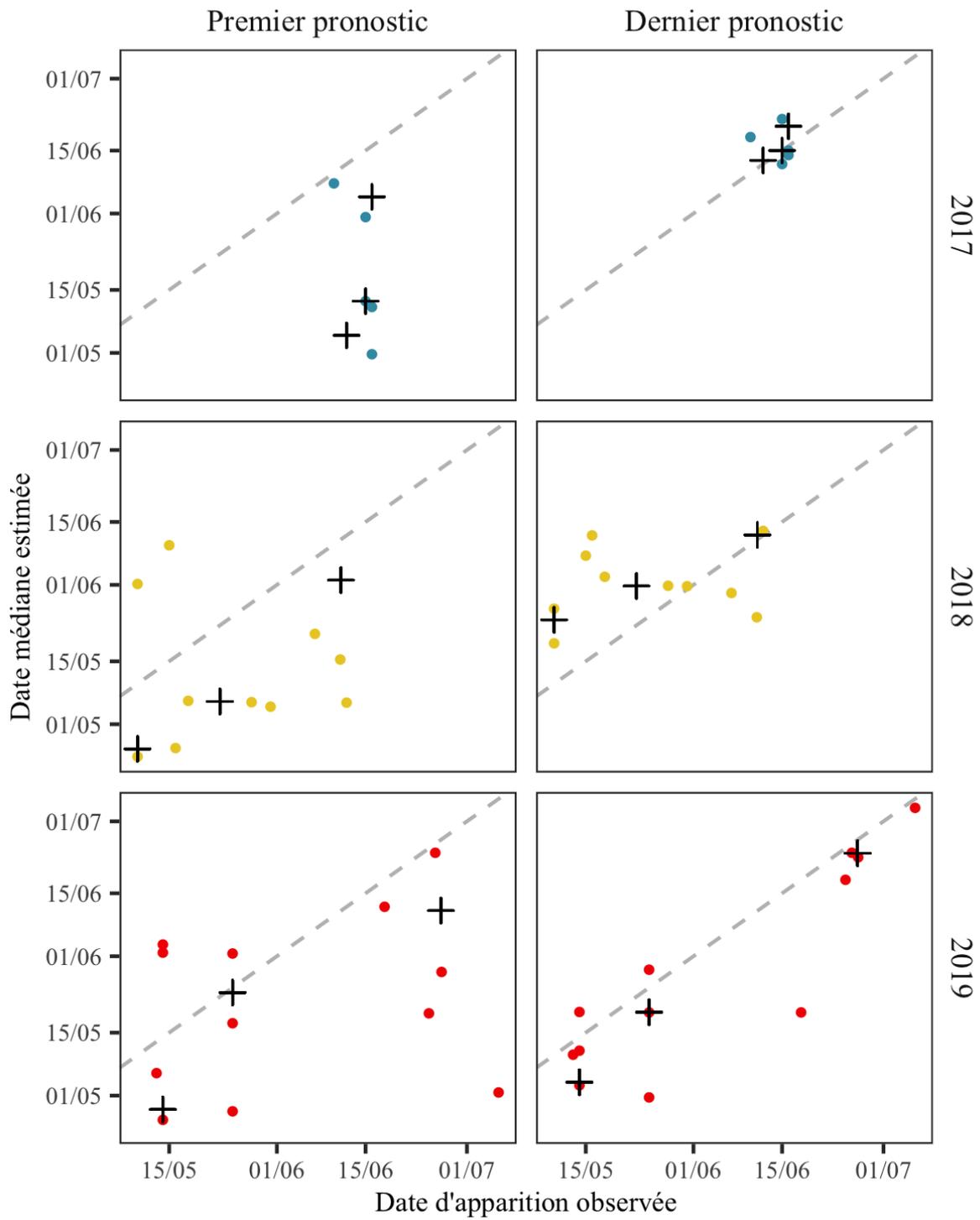
Annexe R : Comparison of the median elicited date of appearance of the first symptoms of grape downy mildew estimated at the beginning (first elicitation) and end (last elicitation) of the season by each expert, in 2017, 2018 and 2019. The difference between the median dates estimated at the first and last elicitation is represented as a function of the median date estimated at the first elicitation of each expert. The relationship between the median deviation and the estimated median early season date is shown for 2017, 2018, 2019 and for all years.



Annexe S: Experts' elicitation uncertainty levels in the first and last elicitation in 2017, 2018, 2019. The uncertainty levels of the first (x-axis) and the last elicitation (y-axis) are compared for each expert elicited each year and for all years.



Annexe T: Relation entre les dates estimées (axe des Y) lors du premier et du dernier pronostic de chaque expert et les dates d'apparition observées sur le terrain (axe des X) pour l'ensemble des experts du Bordelais élicités à chaque campagne d'élicitation menées entre 2017 et 2019.



## Liste des publications et communications

### Publications à comité de lecture réalisées pendant la thèse

Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Makowski, D., 2018. Timing of grape downy mildew onset in Bordeaux vineyards. *Phytopathology* 109, 787–795. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-17-0412-R>

Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Debord, C., Makowski, D., 2019. Use of probabilistic expert elicitation for assessing risk of appearance of grape downy mildew. *Crop Protection* 126, 104926. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104926>

Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Makowski, D., (submitted). Delaying the first grapevine fungicide application reduces exposure on operators by half. *Scientific Reports*.

Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Makowski, D., (submitted). Forecasting severe grape downy mildew attacks using machine learning. *Plos One*.

### Articles de conférence

Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Debord, C., Makowski, D., 2018. Estimer la date d'apparition du mildiou de la vigne grâce à l'élicitation probabiliste d'expert. Presented at the Végéphyll 12e Conférence internationale sur les maladies des plantes, Tours.

### Documents techniques

Raynal ; M., Vergnes, M. Brun, F. Chen, M., 2019. Pronostic d'apparition du Mildiou : un challenge participatif en vue d'améliorer les Outils d'Aide à la Décision de demain. Fiche Technique IFV n° 130.

### Présentations lors de conférences

Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Makowski, D., 2018. Estimate the date of symptoms appearance for a grape disease: the case study of downy mildew. Symposium Modélisation et Statistique en Ecologie et en Biosciences 14 – 15 mai 2018.

### Autres présentations

Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Makowski, D., 2018. Using survival analysis to assess grape downy mildew onset in Bordeaux vineyards. ModStatSAP – Annual meeting, 19 mars 2018, Paris.

Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Makowski, D., 2018. Timing of grape downy mildew onset: from data analysis to practical implementation. ABIES Doctoral Days, 19 avril 2018, Paris.

Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Makowski, D., 2018. Estimer la date d'apparition des premiers symptômes d'une maladie de la vigne : le cas du mildiou. #DigitAgora, 30 mai 2018, Montpellier.

**Poster scientifique**

Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Debord, C., Makowski, D., 2018. Estimer la date d'apparition du mildiou de la vigne grâce à l'élicitation probabiliste d'expert. Presented at the Végéphyll 12e Conférence internationale sur les maladies des plantes, 18 décembre 2018, Tours.





**Titre :** Analyse du risque de mildiou de la vigne dans le Bordelais à partir de données régionales et d'informations locales collectées en cours de saison

**Mots clés :** modèles statistiques, phytopathologie, vigne, base de données régionale, expertise, *machine learning*.

**Résumé :** L'utilisation de pesticides permet de réduire les pertes de récolte mais génère des impacts environnementaux négatifs. Il est important de fournir des informations précises sur les risques épidémiques concernant les bioagresseurs afin de raisonner l'utilisation des pesticides, en particulier dans le cas du mildiou de la vigne, responsable en moyenne de 43 % des traitements utilisés dans le Bordelais. Cette thèse évalue l'intérêt de la date d'apparition des symptômes de mildiou de la vigne pour raisonner l'usage des fongicides dans la lutte contre cette maladie.

En nous basant sur des observations régionales et de l'expertise locale, nous montrons que dans le Bordelais, les premiers traitements sont réalisés en moyenne trois semaines avant l'apparition des premiers symptômes. Nous montrons que reporter la date du premier traitement anti-mildiou à la date d'apparition

de la maladie permet d'économiser en moyenne 56 % des traitements, par rapport aux pratiques actuelles de cette région. Nos résultats montrent que combiner cette stratégie avec le port d'équipements de protection réduit l'exposition des opérateurs de plus de 70 %.

En utilisant des méthodes de *machine learning*, nous montrons que la précocité et la gravité des épidémies de mildiou sont fortement liées. Les prévisions de nos modèles peuvent être utilisées pour déclencher les traitements contre la maladie dans les cas de risques élevés, entraînant une réduction de plus de 50 % des traitements anti-mildiou par rapport aux pratiques actuelles.

Nos résultats et les méthodes employées sont discutés et mis en perspective avec d'autres moyens de réduction de l'usage des pesticides en viticulture.

**Title:** Grape downy mildew risk analysis in Bordeaux vineyards based on regional survey data and local expert knowledge analysis

**Keywords:** statistical models, plant diseases, grapevine, regional data, expert knowledge, machine learning

**Abstract:** Pesticides reduce yield losses but have negative environmental consequences. It is important to provide precise information on the epidemic risks concerning harmful organisms in order to reason the use of pesticides, in particular in the case of grape downy mildew, which is responsible on average for 43% of pesticides used in Bordeaux vineyards.

The objective of this work is to estimate the benefits of using downy mildew onset date to avoid unjustified sprays in the control of this disease. Based on regional observations and local expertise, we show that in Bordeaux, the first treatments are applied on average three weeks before the first symptoms appear.

We show that postponing the date of the first

downy mildew spray to disease onset reduces fungicide use by an average of 56% compared to current practices in this region. For operators, our results show that combining this strategy with the use of personal protective equipment reduces exposure by more than 70%.

By using machine learning methods, we also show that the precocity and severity of downy mildew epidemics are strongly linked. Our predictions can be used to trigger disease treatments only in high-risk cases, resulting in a reduction of more than 50% in mildew treatments compared to current practices. Our results and the used methods are discussed and compared with other methods for reducing the use of pesticides in viticulture.