



**HAL**  
open science

## SMART PIC -Analyse du risque à partir de données régionales et d'informations locales collectées en cours de saison : application au mildiou de la vigne

Mathilde Chen, David Makowski, Marc Raynal, Emmanuelle Gourdain,  
François Brun

### ► To cite this version:

Mathilde Chen, David Makowski, Marc Raynal, Emmanuelle Gourdain, François Brun. SMART PIC -Analyse du risque à partir de données régionales et d'informations locales collectées en cours de saison : application au mildiou de la vigne. *Innovations Agronomiques*, 2021, 82, pp.387-396. 10.15454/arky-ab40 . hal-04432362

**HAL Id: hal-04432362**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04432362>**

Submitted on 1 Feb 2024

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

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



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

## **SMART PIC - Analyse du risque à partir de données régionales et d'informations locales collectées en cours de saison : application au mildiou de la vigne**

**Chen M.<sup>1,2</sup>, Makowski D.<sup>2,3</sup>, Raynal M.<sup>4</sup>, Gourdain E.<sup>5</sup>, Brun F.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ACTA, INRAE, UMR AGIR, F-31326 Castanet Tolosan

<sup>2</sup> INRAE, UMR MIA 518, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, F-75230 Paris

<sup>3</sup> UMR Agronomie INRAE AgroParisTech, F-78850 Thiverval-Grignon

<sup>4</sup> IFV, Bordeaux Nouvelle Aquitaine. UMT SEVEN, F-33882 Villenave d'Ornon Cedex

<sup>5</sup> ARVALIS Institut du végétal, Station Expérimentale, F-91720 Boigneville

**Correspondance** : francois.brun@acta.asso.fr

### **Résumé**

Le projet SMART-PIC visait à 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 innovants. Cet article détaille les méthodes utilisées et les résultats obtenus sur l'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. Nous montrons que notre démarche permet de construire une stratégie pour mieux raisonner le démarrage de l'usage des fongicides dans la lutte contre cette maladie en début de saison et, ainsi, de diminuer nettement le nombre total des traitements. Cette stratégie a également un impact fort sur l'exposition des opérateurs en lien direct avec cette diminution du nombre de traitement. Enfin, nous montrons que notre démarche permet de prédire la gravité des épidémies en combinant des observations précoces de la maladie avec des variables météorologiques.

**Mots-clés** : Modèles statistiques, phytopathologie, vigne, blé, expertise, *machine learning*.

### **Abstract: Risk analysis based on regional data and local information collected during the season: application to downy mildew in grapevine**

The SMART-PIC project aimed at designing tools to help decision making in integrated crop protection, integrating new types of data and innovative formalisms. This article details our methods and the results obtained on the analysis of the risk of grapevine mildew in the Bordeaux region based on regional data and local information collected during the season. We showed that it is possible to define a data-driven strategy to better manage the start of fungicide application to control this disease at the beginning of the season and, as a result, to significantly reduce the total number of treatments. We demonstrated that an implementation of this strategy would lead to a significant reduction of the exposure of operators to fungicides. Finally, we showed how an early observation of disease pressure can be used to predict the severity of epidemics in combination with meteorological variables.

**Keywords**: Statistical models, phytopathology, vine, wheat, expertise, machine learning.

### **Introduction**

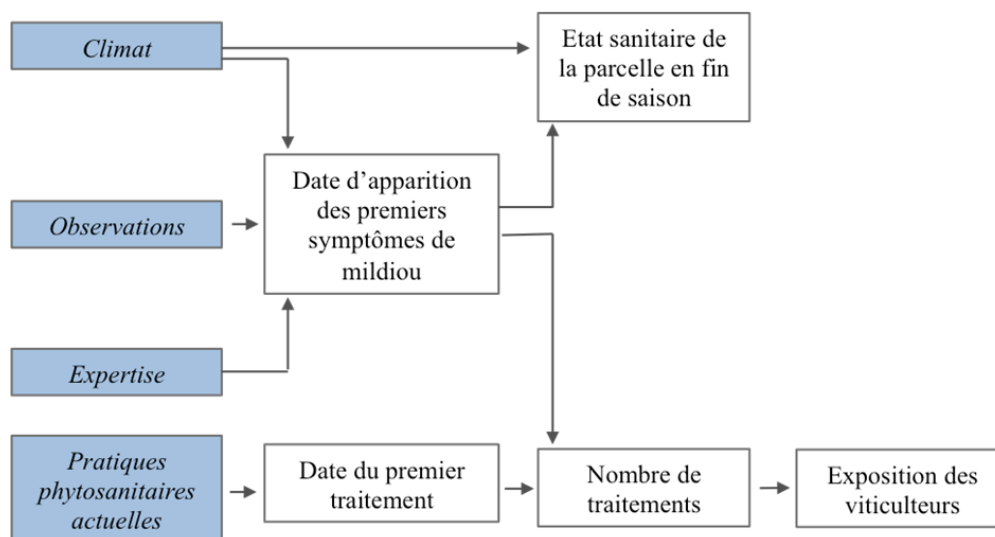
L'utilisation de pesticides permet de réduire les pertes de récolte mais génère des impacts environnementaux négatifs et il est important de raisonner l'utilisation des pesticides afin de les limiter au maximum.

Une large adoption par les agriculteurs d'une démarche de protection intégrée est nécessaire pour atteindre les objectifs de réduction d'utilisation des produits phytosanitaires. Basée sur un raisonnement complexe et sur une mobilisation des différents moyens de contrôle des organismes nuisibles, elle reste peu mise en œuvre de manière opérationnelle à grande échelle. L'objectif du projet SMART-PIC est de concevoir des outils facilitant la mise en pratique de cette démarche de protection intégrée des cultures. Ces outils doivent intégrer davantage les leviers agronomiques en valorisant mieux les données existantes et en proposant des formalismes innovants prenant en compte de manière plus fine le raisonnement de l'exploitant agricole. Dans le cadre de ce projet, des travaux sur le blé tendre et la vigne ont été menés, à différentes échelles et avec différentes méthodes.

Nous proposons dans cet article de détailler uniquement l'approche et les résultats qui ont porté sur l'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, travaux qui ont fait l'objet d'un doctorat (Chen, 2019) associé au projet SMART-PIC.

Pour le mildiou de la vigne, responsable en moyenne de 43 % des traitements utilisés dans le Bordelais, nous proposons de considérer la date d'apparition des symptômes de mildiou de la vigne et d'évaluer l'intérêt de cette information. Premièrement, cette information permet de construire une stratégie pour mieux raisonner le démarrage de l'usage des fongicides dans la lutte contre cette maladie en début de saison et, ainsi, cela permet de diminuer nettement le nombre total des traitements. Deuxièmement, cette stratégie a un impact fort sur l'exposition des opérateurs en lien direct avec cette diminution du nombre de traitements. Troisièmement, cette information sur la précocité permet de prédire la gravité des épidémies en combinaison avec d'autres variables météorologiques.

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 1).



**Figure 1** : Schéma conceptuel avec les différentes sources d'information. En bleu : les données d'entrée de la démarche ; en blanc : les informations estimées par l'analyse.

## 1. Comment estimer la date d'apparition des premiers symptômes de mildiou ?

Nous avons exploré deux méthodes pour estimer l'apparition des premiers symptômes de mildiou. La première repose sur l'analyse des dates d'apparition sur la base du réseau d'observation d'épidémiosurveillance régionale et l'utilisation de modèles de survie afin de gérer ces données censurées. La seconde repose sur l'élitication d'experts sur cette même variable d'intérêt.

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

### 1.1.1 Contexte et questions

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.

Deux questions ont été traitées :

- 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 ?

### 1.1.2 Matériels 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. Ces dates pouvant être censurées, 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.

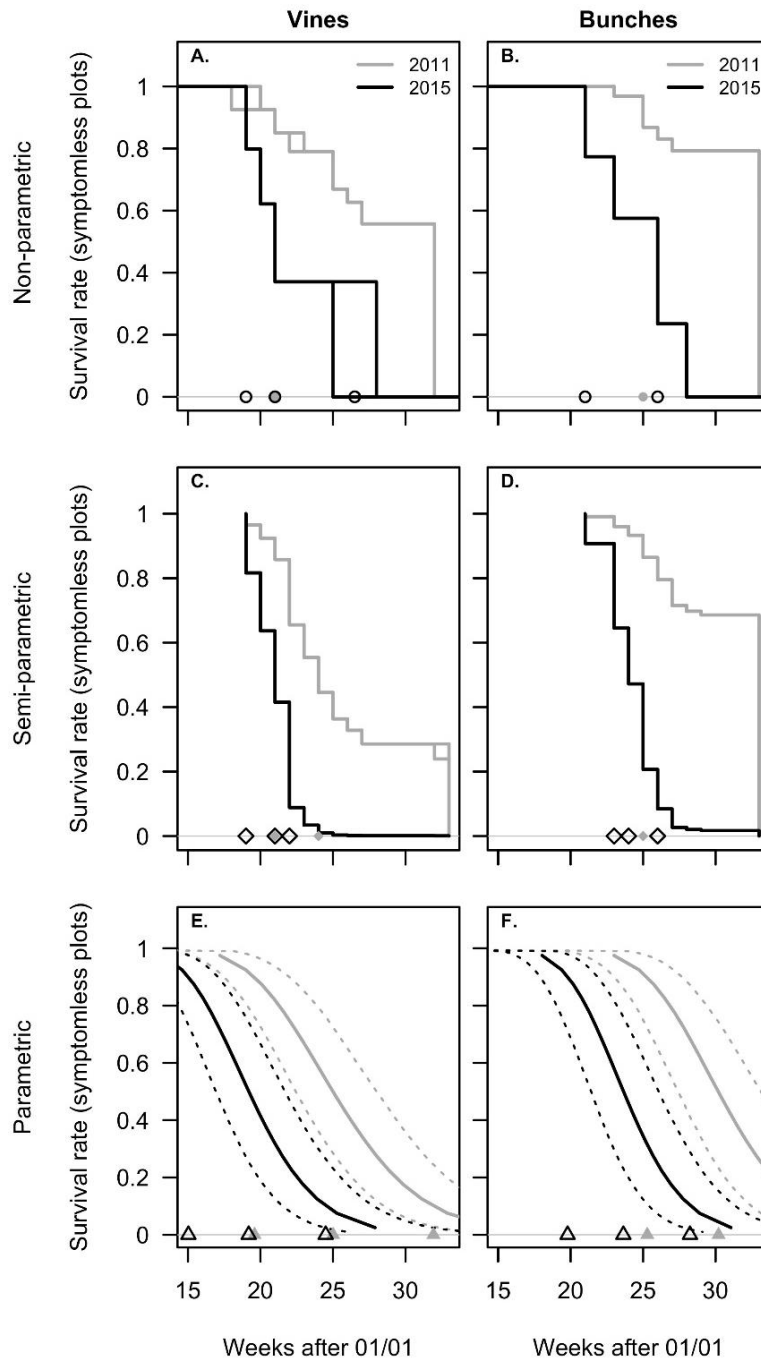
### 1.1.3 Résultats

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. Les estimations en fonction des différents modèles de survie testés pour deux années contrastées sont illustrées dans la Figure 2. 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.

### 1.1.4 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.

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication scientifique « *Timing of grape downy mildew onset in Bordeaux vineyards* » dans la revue *Phytopathology* (Chen *et al.*, 2018).



**Figure 2** : Illustration des résultats de modèles de survie. Proportions des parcelles asymptomatiques pour les ceps (Vine) et pour les grappes (Bunches) estimées avec différents types de modèles. Analyses de survie non-paramétrique (A, B), semi-paramétrique (modèle de Cox, C, D), et paramétrique (modèle log-normal, E, F) pour 2011 (gris) et 2015 (noir). Les points (ronds, losanges ou triangle) gris indiquent les dates estimées auxquelles la proportion de parcelles sans symptômes diminuerait à 90 %, 50 % et 10 % en 2011, selon la méthode. Les points (ronds, losanges ou triangles) noirs indiquent les dates estimées auxquelles la proportion de parcelles sans symptômes devrait diminuer pour atteindre 90 %, 50 % et 10 % en 2015, selon la méthode utilisée. Les lignes pointillées correspondent à l'intervalle de confiance de 95% estimé par le modèle log-normal pour chaque année (Source : Chen *et al.*, 2018).

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

### 1.2.1 Contexte et questions

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, pourtant elle commence à être utilisée dans des domaines proches comme l'analyse de risque pour des questions sanitaires par des organismes comme l'EFSA (Autorité européenne de sécurité des aliments) afin de mieux formaliser les informations issues des experts mobilisés.

Deux questions ont été traitées :

- 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 ?

### 1.2.2 Matériels 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. Dans ce cas, chaque expert mobilise différentes informations : les épidémies des années passées, des informations sur les spécificités de la parcelle, des informations météorologiques, des prévisions de modélisation... Ainsi, même si l'on n'a pas accès au raisonnement précis de l'expert, on peut voir l'expert comme un agent agrégeant une diversité d'informations. 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.

### 1.2.3 Résultats

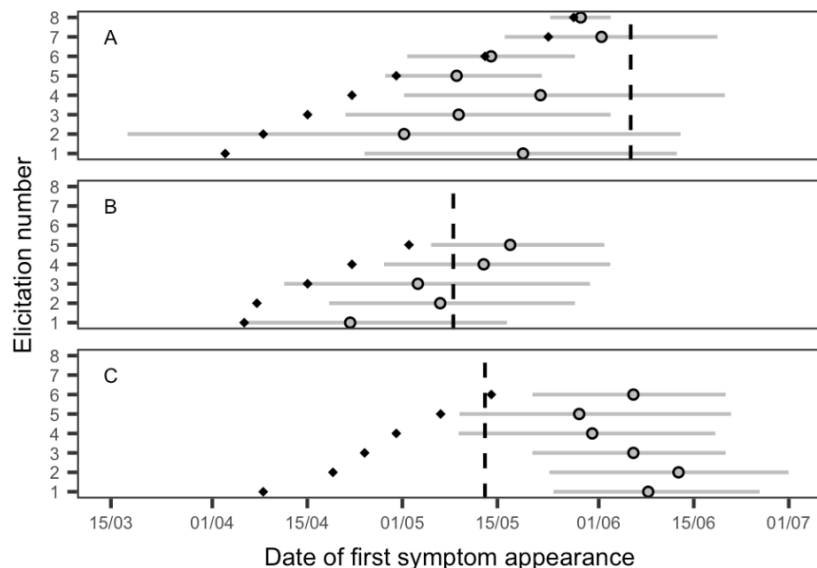
Nos résultats montrent que le pronostic des experts évolue au cours de la saison (Figure 3). Les experts tendent à fortement anticiper la date d'apparition des premiers symptômes en début de saison, mais ce biais devient négligeable dès la fin-mai. A partir de cette période, la distribution des dates 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.

### 1.2.4 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. Cette information ne semble pas aussi fiable que les informations issues du terrain, mais elle semble suffisamment intéressante à considérer pour anticiper cette date.

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication scientifique « Use of probabilistic expert elicitation for assessing risk of appearance of grape downy mildew » dans la revue *Crop Protection* (Chen *et al.*, 2019).



**Figure 3** : Illustration des résultats d'élicitation. Dates de la première apparition des symptômes du mildiou selon trois experts de la région bordelaise (A, B et C) pour trois vignobles différents en 2018. Chaque expert a été sollicité plusieurs fois au cours du millésime 2018 (chaque ligne correspond à une date de pronostic spécifique). Les losanges noirs représentent la date de formulation du pronostic. Les ronds gris représentent la date médiane d'apparition des premiers symptômes estimée par l'expert à chaque pronostic. Le segment horizontal représente l'intervalle de confiance à 90 % de l'estimation. La ligne en pointillés verticale représente la date d'apparition observée dans chaque parcelle. En 2018, le débourrement et la floraison ont été observés respectivement le 5 avril et le 5 juin (Chambre d'Agriculture de Gironde, 2018a). (Source : Chen *et al.*, 2019).

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

### 2.1 Contexte et questions

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 (Mailly *et al.*, 2017).

Trois questions ont été traitées :

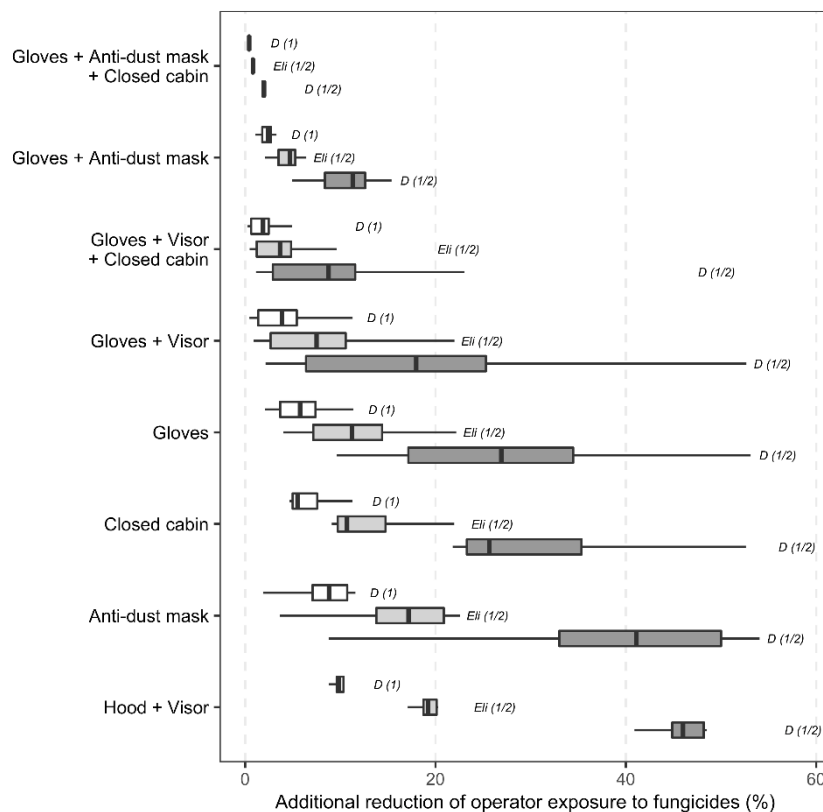
- Comment se positionne la distribution des dates de premiers traitements anti-mildiou par rapport à la distribution des dates d'apparition de la maladie dans les vignobles bordelais ?
- Quel est l'impact d'un report de la date de la première intervention anti-mildiou à la date d'apparition de la maladie 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 ?

## 2.2 Matériels 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 exposition moindre a été comparée au niveau de protection induit par le port de différents équipements de protection individuelle (EPI).

## 2.3 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 (Chen *et al.*, 2020a). 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. Une réduction additionnelle est alors constatée (Figure 4).



**Figure 4** : Illustration des résultats sur l'impact sur l'exposition des opérateurs. Réduction supplémentaire de l'exposition des opérateurs résultant d'un premier traitement anti-mildiou retardé combiné à divers scénarios de protection des opérateurs, selon différentes stratégies de lutte contre le mildiou (D (1) = première application retardée jusqu'à l'apparition de la maladie estimée par l'analyse de survie + traitement appliqué toutes les semaines; D (1/2) = même retard + traitement appliqué toutes les deux semaines ; Eli (1/2) = première application retardée jusqu'à l'apparition de la maladie estimée par l'élicitation d'un expert probabiliste + traitement appliqué toutes les deux semaines) (Source : Chen *et al.*, 2020a).



## 2.4 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.

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication scientifique « *Delaying the first grapevine fungicide application reduces exposure on operators by half* » dans la revue Scientific Reports (Chen et al., 2020a).

## 3. Prédire l'état sanitaire d'une parcelle en fin de saison en fonction d'une observation précoce de la maladie et des conditions météorologiques

### 3.1 Contexte et questions

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.

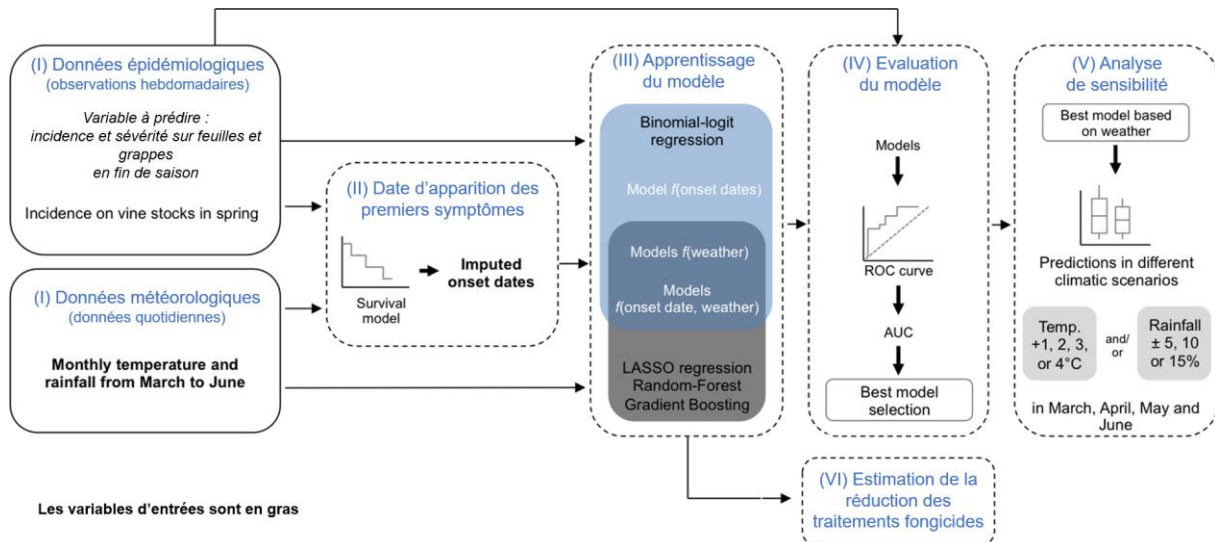
Trois questions ont été traitées :

- 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 ?

### 3.2 Matériels 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.

Le cadre de modélisation mis en œuvre dans cette étude est présenté dans la Figure 5.



**Figure 5 :** Illustration du cadre de modélisation de *machine learning* mis en œuvre dans cette étude (Source : Chen *et al.*, 2020b)

### 3.3 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 pour une utilisation raisonnée 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.

### 3.4 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.

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication scientifique « *Forecasting severe grape downy mildew attacks using machine learning* » dans la revue PLoS ONE (Chen *et al.*, 2020b).

## Conclusion

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 au traitement anti-mildiou 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.

Ces résultats et ces méthodes employées sont discutés et mis en perspective avec d'autres moyens de réduction de l'usage des pesticides en viticulture. Pour plus de détails, se référer à Chen (2019).

Par ailleurs le projet SMART-PIC a fait l'objet d'autres travaux sur la vigne et le blé. Les valorisations associées sont listées sur cette page <http://www.modelia.org/moodle/course/view.php?id=82> et prochainement disponible sur le site RD-AGRI [https://rd-agri.fr/detail/PROJET/casdar\\_projet\\_15art021](https://rd-agri.fr/detail/PROJET/casdar_projet_15art021).

### Références bibliographiques

Chen M., 2019. 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 soutenue le 12/12/2019. <https://www.theses.fr/s170880>

Chen M., Brun F., Raynal M., Makowski D., 2018. Timing of grape downy mildew onset in Bordeaux vineyards. *Phytopathology* 109, 787–795.

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.

Chen M., Brun F., Raynal M., Makowski D., 2020a. Delaying the first grapevine fungicide application reduces exposure on operators by half. *Scientific Reports*. Scientific Reports, Nature Publishing Group, 10 (1), 6404.

Chen M., Brun F., Raynal M., Makowski D., 2020b. Forecasting severe grape downy mildew attacks using machine learning. *Plos One*. March 12, 2020.

Mailly F., Hossard L., Barbier J.-M., Thiolllet-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.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

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