



HAL
open science

Impact du changement climatique sur l'oïdium de la vigne : cas de la Champagne.

Sébastien Zito, Yves Richard, Thierry Castel, Benjamin Bois

► **To cite this version:**

Sébastien Zito, Yves Richard, Thierry Castel, Benjamin Bois. Impact du changement climatique sur l'oïdium de la vigne : cas de la Champagne.. 15èmes Rencontres Bourgogne-Franche-Comté Nature, Oct 2018, Saint-Brisson, France. pp.200-206. <hal-02436672>

HAL Id: hal-02436672

<https://hal.science/hal-02436672v1>

Submitted on 13 Feb 2026

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.



Copyright - All rights reserved

Photographie 1. Oïdium de la vigne sur une grappe.

Sebastien ZITO



Impact du changement climatique sur l'oïdium de la vigne : cas de la Champagne

Sébastien ZITO¹, Yves RICHARD¹, Thierry CASTEL¹ & Benjamin BOIS^{1,2}

Résumé

L'oïdium de la vigne, une des maladies les plus répandues dans les vignobles, provoque des dégâts sur le feuillage de la plante, réduit les rendements et altère la qualité du raisin. Le développement du champignon responsable de l'oïdium est principalement contrôlé par les conditions météorologiques et la viticulture nécessite dans de nombreuses régions de grandes quantités de pesticides pour lutter contre cette maladie. Étudier l'évolution de cette maladie en lien avec le changement climatique permettrait dans un contexte où l'on cherche à diminuer fortement le recours aux produits phytosanitaires de mieux appréhender le risque futur. Cette étude a pour but (i) de construire un modèle empirique établissant des liens entre les données climatiques mensuelles et la pression oïdium annuelle observée en Champagne (ii) d'utiliser ce modèle empirique afin de simuler l'évolution de la pression maladie à l'aide de données climatiques simulées (1976-2100). La base de données utilisée pour représenter la pression maladie correspond au pourcentage de parcelles avec l'expression de symptômes d'oïdium sur feuilles et grappes pendant la période sensible de la vigne. Ces données sont disponibles sur la période 2004-2017 et regroupent 200 parcelles de Chardonnay en Champagne. Des indicateurs climatiques mensuels (température et précipitations) sont testés à l'aide de régressions linéaires multiples pour expliquer la pression observée dans le vignoble à différents stades phénologiques. Le modèle le plus performant s'appuie sur les températures minimales d'avril et les précipitations de mai pour simuler le pourcentage de parcelles touchées sur feuilles au premier juillet. Pour projeter le risque maladie au cours du XXI^e siècle, les sorties de 18 GCM (General Circulation Model) avec la trajectoire RCP 8.5 (CMIP5) sur la période 1976-2100 ont été désagrégées à une résolution spatiale de 8 km. Elles ont ensuite alimenté le modèle de pression maladie retenu. L'augmentation des températures et la faible diminution des cumuls de précipitations projetées conduisent à une diminution de la pression oïdium simulée au cours du XXI^e siècle.

Mots-clés : modélisation, viticulture, maladie.

Powdery mildew's evolution in response to climate change in Champagne

Abstract

Powdery mildew, one of the most widespread grapevine disease, causes damage to the plant foliage, reduces yields and alters quality of grapes. This fungus development is strongly controlled by climate conditions and viticulture requires in many regions large quantities of pesticides for disease control. Projecting the impacts of climate change on these disease and developing a better understanding of future disease risk is crucial, given the increasing societal pressure for pesticide reduction and sustainability. This study focused on (i) the elaboration of an empirical model that establishes links between monthly climate data and annual powdery mildew pressure in Champagne and (ii) the use of this empirical model to simulate the evolution of disease pressure using simulated climate data (1976-2100). The disease pressure database represents the powdery mildew observed plots percentage with leaves and grapes symptoms expression at different phenological stages. The data was studied across the 2004-2018 period and it included 200 Chardonnay plots in Champagne. Monthly climate indices (temperature and precipitation) were tested using multiple linear regressions in order to explain the vineyard observed pressure at different phenological stages. The best linear multiple regression model simulates the percentage of impacted plots observed on the 1st of July based on April's mean minimum temperatures and May's cumulated precipitations. The 21st century disease risk was projected with the CMIP5 RCP8.5 scenario temperature and rainfall data from 18 GCMs (General Circulation Models) which were statistically downscaled and debiased to match a daily 8 km target resolution over the 1976-2100 period. These data were then used to feed the retained pressure model. The increase in future climate temperatures and the small decrease in precipitation lead to a low simulated powdery mildew pressure over Champagne for the 21st century.

Key words : modelisation, viticulture, disease.

¹ CRC – UMR Biogeosciences, Université Bourgogne Franche Comté / CNRS - 6 boulevard Gabriel - 21000 Dijon, France - sebastien.zito@u-bourgogne.fr

² Institut Universitaire de la Vigne et du Vin, Université Bourgogne Franche Comté - rue Claude Ladrey - 21000 Dijon, France

Introduction

Au cours du XIX^e siècle, des maladies et ravageurs majeurs ont été introduites d'Amérique du nord dans le vignoble européen provoquant des dégâts considérables. En particulier le mildiou, l'oïdium et le phylloxera ont bouleversé la pratique de la viticulture : la lutte phylloxérique a conduit à la généralisation du greffage de la vigne, alors que la lutte contre le mildiou et l'oïdium a rendu indispensable l'application de pesticides. Ces insectes et maladies diminuent significativement le rendement et la qualité

des récoltes, entraînant souvent de la pollution (KOMÁREK *et al.*, 2010), des impacts sur la santé humaine (NTZANI EVANGELIA *et al.*, 2013) et des coûts économiques substantiels (PIMENTEL, 2005). Les conséquences du changement climatique sur la biologie de la vigne et de ses parasites étant très probables, la protection des plantes devra évoluer.

À l'heure actuelle, peu de recherches se sont intéressées aux risques phytosanitaires et leur évolution (XXI^e siècle) en viticulture. Certaines études ont développé des modèles empiriques (c'est-à-dire basés sur des relations statistiques essentiellement)

afin de simuler la précocité et la sévérité attendues du mildiou sur la base des observations des traitements (SALINARI *et al.*, 2006 ; SALINARI *et al.*, 2007), tandis que d'autres ont utilisé une modélisation mécaniste (c'est-à-dire basés sur des modèles qui reproduisent des mécanismes biologiques) pour simuler une interaction hôte/pathogène pour le ver de la grappe (*Lobesia botrana*) (CAFFARRA *et al.*, 2012) et les microorganismes responsable du mildiou et l'oïdium (LAUNAY *et al.*, 2014). Toutes ces études sont basées sur des projections climatiques provenant d'un ou de deux modèles de circulation générale atmosphère-océan (AOGCM). Il est fortement recommandé d'utiliser une approche d'ensemble de modèles pour évaluer les impacts climatiques et caractériser l'incertitude. Cependant, l'épidémiologie des principales maladies de la vigne dans le monde (mildiou et oïdium selon l'enquête de BOIS *et al.* [2017]) dépendent des températures et fortement de l'eau : durée d'humectation foliaire, précipitations et humidité relative de l'air. Les simulations climatiques de ces deux derniers paramètres varient fortement selon les modèles (MURPHY *et al.*, 2004 ; ROGELJ *et al.*, 2012). Par conséquent, il est nécessaire de simuler l'évolution du risque maladie en réponse à un grand nombre de projections climatiques afin d'anticiper au mieux les futurs moyens nécessaires à la protection de la vigne. L'oïdium de la vigne est une maladie cryptogamique qui se développe sur les feuilles et les grappes. Notre étude vise à documenter l'évolution de la présence de l'oïdium selon le changement climatique, de 1980 à 2100, à l'aide de 18 modèles de circulation générale, dé-biaisés et désagrégés à une échelle de 8 km sur le vignoble Champenois. Ces recherches visent (i) à évaluer la « pression » exercée par l'oïdium au cours des 15 dernières années sur la région viticole de Champagne (figure 1), (ii) à construire un modèle linéaire multiple pour établir une relation entre un indicateur annuel de la présence de l'oïdium et des variables climatiques mensuelles et (iii) à prévoir l'évolution de l'indicateur maladie simulé au cours du XXI^e siècle en utilisant les projections climatiques CMIP5 (projet de comparaison de modèles couplés) (TAYLOR *et al.*, 2011) avec la trajectoire RCP8.5. Cette dernière correspond à des prévisions prenant en compte de fortes émissions de gaz à effet de serre, sans effort de la société pour diminuer les gaz actuellement émis dans l'atmosphère provoquant alors un fort réchauffement.

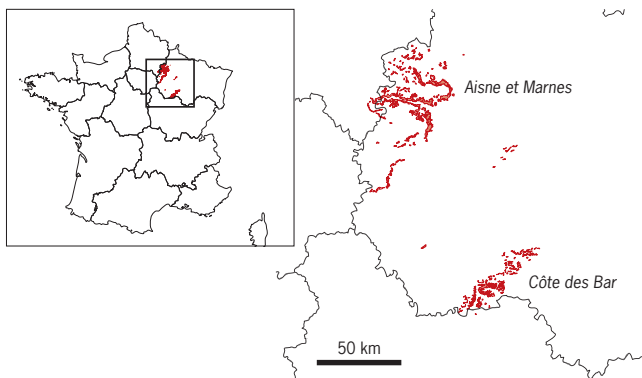


Figure 1. Localisation du vignoble Champenois dans lequel les données maladie sont observées pour cette étude.

Matériel et méthodes

Base de données maladie

La « pression » maladie est un concept flou utilisé par différents acteurs de la profession viticole et dont les paramètres d'évaluation doivent encore être développés. La pression maladie peut être estimée en utilisant différents indicateurs tels que le nombre de traitements appliqués, les avis d'experts (par exemple, les consultants) ou des viticulteurs, et les niveaux d'intensité de la maladie observés dans le vignoble.

Dans cette étude, nous avons utilisé les observations hebdomadaires des symptômes de l'oïdium effectuées chaque année dans un réseau de 200 parcelles couvrant toutes les régions viticoles de Champagne. Les parcelles suivies sont plantées avec le cépage

Chardonnay, variété sensible à l'oïdium de la vigne. Ces données ont été fournies par le Comité Interprofessionnel des Vins de Champagne et couvrent la période 2004-2017. Pour chaque année, on dispose donc de données hebdomadaires (pour toute la période durant laquelle la vigne est sensible, c'est-à-dire de mai à mi-juillet en général) qui indiquent la proportion de parcelles (parmi les 200 suivies) présentant des symptômes d'oïdium.

Données climatiques

Les données climatiques observées proviennent de la base de données française SAFRAN de Météo-France (SOUBEYROUX *et al.*, 2008). SAFRAN est un système d'analyse atmosphérique de moyenne échelle combinant des systèmes d'observation et des prévisions numériques. Les températures minimales et maximales quotidiennes, ainsi que les précipitations cumulées, ont été téléchargées sur une grille de résolution à 8 km couvrant la zone viticole. La délimitation de ces zones viticoles a été effectuée à l'aide de la carte Corine Land Cover de la base de données Copernicus (<http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>). Les indices climatiques mensuels sont construits à l'aide des données climatiques journalières d'avril à juillet, période sensible de la vigne à l'oïdium. Les précipitations sont cumulées (mm) et les températures moyennes, minimales et maximales sont moyennées pour chaque mois. Ces indices climatiques ont été utilisés pour élaborer un modèle empirique afin d'estimer la pression de l'oïdium.¶

Les projections climatiques CMIP5 ont été recueillies auprès de l'ESGF (Earth System Grid Federation ; <https://esgf-node.lnl.gov/search/cmip5/>). Les AOGCM utilisés, appelés par la suite modèles climatiques, sont : ACCESS, BCC, BNU, CanESM2, CCSM4, CNRM, CSIRO, GFDLM2G, GFDLM2M, INMCM, IPSLCM5A-LR, IPSLCM5A-MR, IPSLCM5A-MR, IPSLCM5B, MIROC, MPIMR, MRI, Nor. Seule la simulation de la trajectoire RCP8.5 est utilisée ici, correspondant à de très fortes émissions de gaz à effet de serre (STOCKER *et al.*, 2013). Les données climatiques simulées couvrent les années 1976 à 2100. On distingue deux périodes : 1976-2005 étant considérée comme la période historique et 2006-2100 comme période de projection climatique. Les données ont été statistiquement dé-biaisées (correction statistique des données) en se basant sur la période historique et selon un pas de temps mensuel. Une désagrégation spatiale a permis de faire une descente d'échelle (grilles initialement à une résolution de 100 à 200 km, selon les modèles climatiques) à une résolution de 8 km à l'aide de la méthode de « quantile mapping » (GUDMUNDSSON *et al.*, 2012).

Modèle maladie

Afin de simuler l'évolution potentielle de la pression oïdium, nous avons dû définir un indicateur annuel de maladie à confronter aux données climatiques. Comme indiqué ci-dessus l'indicateur de « pression » de maladie consiste en un pourcentage de parcelles présentant des symptômes. Ce pourcentage est observé chaque semaine, et il nous a fallu retenir le moment dans la saison végétative de la vigne où cette valeur était la plus pertinente. Ainsi, chaque indicateur de la maladie (pourcentage de parcelle présentant des symptômes sur feuille ou sur grappe à différents moment de la saison végétative) a été comparé aux données climatiques mensuelles pour la période 2004-2018. Nous avons testé tous les modèles possibles de régression linéaire multiple en sélectionnant au maximum trois variables explicatives. Pour éviter toute colinéarité, les combinaisons dans lesquelles au moins deux prédicteurs étaient significativement corrélés (valeur $p \leq 5\%$ sur un test t de corrélation de Pearson) ont été écartées. La performance de chaque modèle de régression multiple a été évaluée par la méthode de validation croisée « Leave-One-Out Cross Validation » (LOOCV). Le modèle avec l'efficacité la plus élevée (EF, voir MAYER & BUTLER [1994] pour plus d'informations) a été sélectionné. EF est calculé comme suit :

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

où P_i est la valeur simulée de l'indicateur maladie dans la région viticole pour l'année i ; O_i est la valeur observée de l'indicateur maladie pour l'année i et \bar{O} est la valeur de l'indicateur observée moyennée pour les n années disponibles.

Résultats

Simulation et observation de la pression maladie

Les 30 combinaisons d'indicateurs maladie testées ont été comparées selon l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée entre les données observées et simulées. L'indicateur maladie sélectionné est la proportion de parcelles présentant des symptômes d'oïdium sur feuille au 1^{er} juillet (ci-après noté IM). Cet indicateur maladie s'est révélé être celui présentant la meilleure corrélation (ie. RMSE minimale) avec les données climatiques. Le modèle empirique utilisant les données climatiques mensuelles permettant de simuler l'IM avec le minimum d'erreur est le suivant :

$$IM_i = -10,693TN_{i,04} - 0,316RR_{i,05} + 109,085$$

où, pour l'année i , **IM** est l'indicateur maladie simulé, **TN04** la moyenne des températures minimales d'avril et **RR05** le cumul de précipitations de mai. La figure 2 illustre la relation entre l'indicateur maladie simulé à l'aide des données climatiques utilisant la méthode LOOCV et l'indicateur maladie observé dans le vignoble. Concernant l'évolution de l'IM au cours des 15 dernières années, aucune tendance à l'augmentation ou la diminution n'est observée. Cependant, on observe des variations inter-annuelles allant de 2,3 % à 49 %. Les années 2007, 2014, 2016 et 2017 sont caractérisées par un IM faible (inférieur à 10 %), tandis que les années 2012 et 2015 ont les IM les plus élevés (49 % et 39 % respectivement).

Projection de la pression maladie

Une fois le modèle empirique établi sur la période d'observation (2004-2018), les données des 18 modèles climatiques sont utilisées pour simuler l'évolution potentielle de l'oïdium (ie. IM) de 1980 à 2100. L'évolution des deux indicateurs climatiques permettant de simuler la pression maladie est représentée en figure 3. Les températures minimales d'avril ainsi que le cumul des précipitations de mai sont moyennés sur les trois périodes 1976-2005, 2046-2065 et 2081-2100 pour les 18 modèles climatiques. D'après la figure 3, les modèles simulent une augmentation de 3,3 °C pour les températures minimales d'avril et une faible tendance à la diminution des pluies

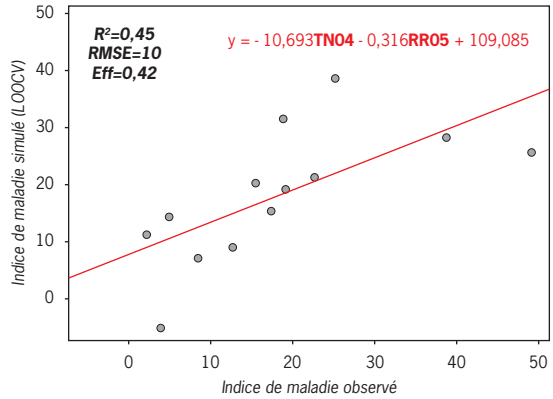


Figure 2. Pourcentage de parcelles touchées au premier juillet sur feuilles (indice maladie) simulé avec la méthode « leave-one-out cross validation » et observé sur la période 2004-2018.

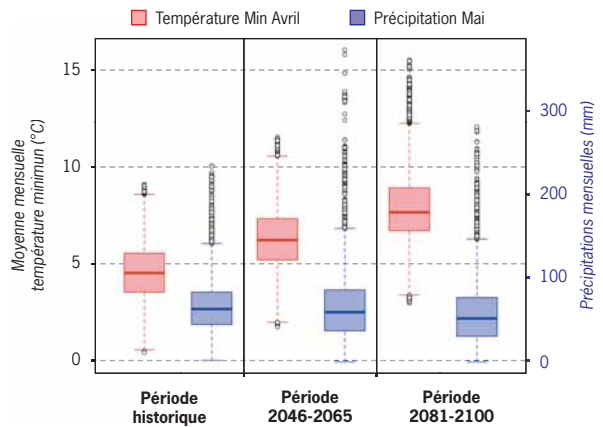


Figure 3. Évolution des deux indicateurs climatiques permettant de simuler la pression maladie. Les données des 18 modèles de climats sont moyennées sur la période 1976-2005, 2046-2065 et 2081-2100.

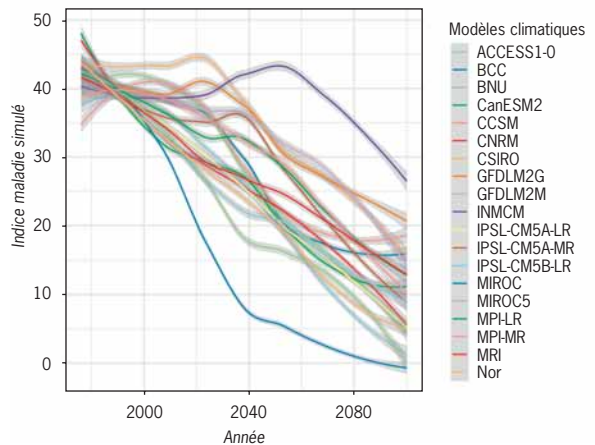


Figure 4. Indicateur maladie simulé sur la période 1976-2100 avec les données de 18 modèles climatiques sur le vignoble Champenois.



Sébastien ZITO

Doctorant au Centre de Recherches de Climatologie (UMR Biogéosciences), ses recherches portent sur les maladies et ravageurs de la vigne dans les vignobles de Bourgogne et Champagne en liens avec le changement climatique.



Yves RICHARD

Géographe Climatologue, enseignant-chercheur à l'université de Bourgogne, il est responsable de l'équipe Centre de Recherches de Climatologie de l'UMR 6282 Biogéosciences CNRS/uBFC. Ses recherches actuelles sont dédiées au changement climatique et aux îlots de Chaleur Urbains.



Thierry CASTEL

Climatologue, il est enseignant-chercheur à AgroSup Dijon et chercheur associé à l'UMR 6282 Biogéosciences CNRS/uBFC dans l'équipe Centre de Recherches de Climatologie. Ses travaux portent sur la régionalisation climatique et l'impact du changement climatique sur les agro-, hydro- et sylvo-systèmes.



Benjamin BOIS

Maître de conférences à l'Institut Universitaire de la Vigne et du Vin à l'Université de Bourgogne, il réalise ses recherches sur les relations climat-viticulture au Centre de Recherches de Climatologie (UMR Biogéosciences).

de mai (-9 mm) à la fin du XXI^e siècle par rapport à la période historique. Cette forte augmentation des températures minimales d'avril projetées par les modèles est responsable d'une diminution de l'IM simulé de 1980 à 2100. La figure 4 présente l'évolution de l'IM sur la période d'étude selon les 18 modèles climatiques. Chaque courbe représente la tendance annuelle lissée (méthode de loess) de l'IM simulé avec un modèle. L'ensemble des modèles climatiques simule une diminution plus ou moins forte de la pression maladie à venir au cours du XXI^e siècle. Sur la période 2046-2065 est simulée une diminution moyenne de 10 % de l'IM. Cette diminution atteindrait les 25 % à la fin du XXI^e siècle.

Discussion et conclusion

Cette étude traite de l'évolution potentielle de l'oïdium de la vigne en Champagne en réponse au changement climatique au long du XXI^e siècle. Pour estimer les projections futures de l'IM, nous avons utilisé une approche empirique se basant sur une modélisation par régression linéaire multiple à partir de données mensuelles de température et de précipitations. Suivant un schéma de sélection de prédicteurs robuste, deux variables (prédicteurs climatiques) sont identifiées en entrée des modèles de régression les plus efficaces. Ces prédicteurs retenus sont les températures minimales d'avril et les précipitations de mai. Ces deux variables sont pondérées d'un signe négatif dans la simulation de l'IM. Une augmentation de l'un ou des deux paramètres entraîne une diminution de

l'IM, et inversement. Les printemps chauds (avril) et pluvieux (mai) sont peu propices au développement de l'oïdium. En ce qui concerne la température, CHELLEMI (1991) montre que la sporulation optimale du champignon responsable de l'oïdium se produit à des températures basses (optimales à 19 °C) pour le Chardonnay. De plus, des températures basses peuvent impliquer une humidité de l'air plus élevée et une durée d'humectation foliaire plus longue, qui sont toutes deux des conditions optimales pour le développement de l'oïdium. Cette hypothèse expliquerait la diminution de l'IM inversement proportionnelle aux températures au mois d'avril. D'un point de vue biologique, il est connu que les contaminations primaires, c'est-à-dire celles issues des formes de conservation hivernales du champignon responsable de l'oïdium (*Erysiphe necator*), et qui joue un rôle déterminant dans l'épidémie de l'oïdium, nécessitent des précipitations (GESSLER *et al.*, 2011 ; GADOURY *et al.*, 2012). Cependant, après les premières contaminations (en avril), la dispersion des spores de l'oïdium peut avoir lieu pendant une période de jours consécutifs sans pluie (WILLOCOQUET & CLERJEAU, 1998), des pluies trop abondantes entraîneraient le lessivage des spores. Ceci peut expliquer le signe négatif obtenu pour les précipitations du mois de mai. Trop de pluie, entraînerait plus de lessivage et ainsi, une présence moindre de l'oïdium et donc un pourcentage de parcelles avec symptômes plus faible. En raison de l'augmentation de la température simulée tout au long du XXI^e siècle, le modèle de régression projette une baisse globale de l'IM, soit le pourcentage de parcelles avec la présence de symptômes d'oïdium au 1^{er} juillet.

Selon (CHAKRABORTY *et al.*, 2000), l'étude de l'influence du changement climatique sur les maladies des plantes doit d'abord prendre en compte les impacts sur les structures et la dynamique des populations végétales et sur les processus micro-évolutifs. La physiologie, la phénologie et les interactions hôte/pathogène sont des facteurs d'égale importance pouvant accentuer ou contrebalancer l'évolution des maladies soumises au changement climatique (COAKLEY *et al.*, 1999). L'approche empirique développée ici ne permet pas d'aborder avec précision les changements possibles de la biologie des plantes et de l'interaction hôte/pathogène. La modélisation mécaniste de la biologie des agents pathogènes de la vigne, tel que l'oïdium, nécessite des données climatiques de haute résolution dans le temps (et dans l'espace) afin de simuler de manière pertinente le développement des plantes et des agents pathogènes.

Cette approche est difficilement concevable en utilisant des données climatiques mensuelles, comme ceci a été fait dans notre étude. Les études d'impact du changement climatique sont dépendantes, d'une part, de la robustesse des données climatiques et d'autre part, de la pertinence des modèles d'impact. L'utilisation d'une résolution temporelle faible (par exemple, des données mensuelles au lieu de données journalières) limite la variabilité et, éventuellement, lisse les valeurs climatiques simulées irréalistes par le biais de la réduction d'échelle. Cependant, la modélisation des impacts avec de telles données ne permet pas de comprendre les processus d'échelle temporelle plus fine. Ce type de limite est peu abordé dans la littérature scientifique, bien que nombreuses études utilisent des données climatiques quotidiennes sans prendre en compte les différents biais de descente d'échelle spatiale et temporelle (WHITE *et al.*, 2011). Afin de quantifier ces biais, il serait nécessaire de tester la robustesse des données et d'estimer la sensibilité des modèles de maladie selon la méthode de descente d'échelle utilisée.

Remerciements

Les auteurs remercient Annick AUFFRAY, Agnès TAMBURINI et Denis THÉVENIN des directions régionale et départementale de Météo-France pour la mise à disposition des données climatiques SIM (Safran-Isba-Modcou). Les auteurs tiennent à remercier également le Comité Champagne pour avoir fournis les données d'observations maladies utilisées dans cette étude. Les travaux présentés ici ont été financés par le Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne et par le Comité Champagne.

Bibliographie

- BOIS B., ZITO S. & CALONNEC A. 2017. Climate vs grapevine pests and diseases worldwide: the first results of a global survey. *OENO One* 51(2): 133. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2016.0.0.1780>
- CAFFARRA A., RINALDI M., ECCEL E., ROSSI V. & PERTOT I. 2012. Modelling the impact of climate change on the interaction between grapevine and its pests and pathogens: European grapevine moth and powdery mildew. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 148: 89-101.
- CHAKRABORTY S., TIEDEMANN A.V. & TENG P.S. 2000. Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution* 108(3): 317-326. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00210-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00210-9)
- CHELLEME D.O. 1991. Sporulation of *Uncinula necator* on Grape Leaves as Influenced by Temperature and Cultivar. *Phytopathology* 81(2): 197. <https://doi.org/10.1094/Phyto-81-197>
- COAKLEY S.M., SCHERM H. & CHAKRABORTY S. 1999. Climate Change and Plant Disease Management. *Annual Review of Phytopathology* 37(1): 399-426. <https://doi.org/10.1146/annurev.phytop.37.1.399>
- GADOURY D.M., CADLE-DAVIDSON L., WILCOX W.F., DRY I.B., SEEM R.C. & MILGROOM M.G. 2012. Grapevine powdery mildew (*Erysiphe necator*): a fascinating system for the study of the biology, ecology and epidemiology of an obligate biotroph. *Molecular Plant Pathology* 13(11): 1-16. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00728.x>
- GESSLER C., PERTOT I. & PERAZZOLI M. 2011. *Plasmopara viticola*: a review of knowledge on downy mildew of grapevine and effective disease management. *Phytopathologia Mediterranea* 50(1): 3-44. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-9360
- KOMÁREK M., CADKOVÁ E., CHRÁSTNÝ V., BOR-DAS F. & BOLLINGER J.C. 2010. Contamination of vineyard soils with fungicides: a review of environmental and toxicological aspects. *Environment International* 36(1): 138-151. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.10.005>
- 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(décembre): 147-58. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.020>
- MURPHY J.M., SEXTON D.M.H., BARNETT D.N., JONES G.S., WEBB M.J., COLLINS M. & STAINFORTH D.A. 2004. Quantification of Modelling Uncertainties in a Large Ensemble of Climate Change Simulations. *Nature* 430(7001): 768-772. <https://doi.org/10.1038/nature02771>
- NTZANI E.E., CHONDROGIORGIS M., NTRITSOS G., EVANGELOU E. & TZOULAKI I. 2013. Literature review on epidemiological studies linking exposure to pesticides and health effects. *EFSA Supporting Publications* 10(10): 497E. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2013.EN-497>
- PIMENTEL D. 2005. Environmental and Economic Costs of the Application of Pesticides Primarily in the United States. *Environment, Development and Sustainability* 7(2): 229-252. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-7314-2>
- ROGELJ J., MEINSHAUSEN M. & KNUTTI R. 2012. Global Warming under Old and New Scenarios Using IPCC Climate Sensitivity Range Estimates. *Nature Climate Change* 2(4): 248. <https://doi.org/10.1038/nclimate1385>
- SALINARI F., GIOSUÉ S., ROSSI V., TUBIELLO F.N., ROSENZWEIG C. & GULLINO M.L. 2007. Downy Mildew Outbreaks on Grapevine under Climate Change: Elaboration and Application of an Empirical-Statistical Model. *EPPO Bulletin* 37(2): 317-326. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2007.01126.x>
- SALINARI F., GIOSUÉ S., TUBIELLO F.N., RETTORI A., ROSSI V., SPANNA F., ROSENZWEIG C. & GULLINO M.L. 2006. Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biology* 12(7): 1299-1307. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01175.x>
- SOUBEYROUX J.-M., MARTIN E., FRANCHISTÉ-GUY L., HABETS F., NOILHAN J., BAILLON M., REGIMBEAU F., VIDAL J.-PH., LE MOIGNE P. & MOREL S. 2008. L'application Safran - Isba - Modcou (SIM), un outil pour la production opérationnelle et les études hydrométéorologiques. *La Météorologie* 63: 40-45.
- TAYLOR K.E., STOUFFER R.J. & MEEHL G.A. 2011. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4): 485-98. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- WHITE J.W., HOOGENBOOM G., KIMBALL B.A. & WALL G.W. 2011. Methodologies for Simulating Impacts of Climate Change on Crop Production. *Field Crops Research* 124(3): 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.07.001>
- WILLOCQUET L. & CLERJEAU M. 1998. An Analysis of the Effects of Environmental Factors on Conidial Dispersal of *Uncinula Necator* (Grape Powdery Mildew) in Vineyards. *Plant Pathology* 47(3): 227-233. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.1998.00244.x>