

# Représentations spatiales du potentiel de maturité des cépages Chardonnay et Chenin en régions Bretagne et Pays de la Loire (1976-2100)

Théo Petitjean <sup>1</sup>, Valérie Bonnardot <sup>1</sup>, Cyril Tissot <sup>2</sup>, Thomas Chassaing <sup>3</sup>, Hervé Quénol <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Univ. Rennes, Univ. Brest, Nantes Université, CNRS, LETG, UMR 6554, F-35000 Rennes, France

<sup>2</sup> CNRS, Univ. Brest, Nantes Université, Univ. Rennes, LETG, UMR 6554, F-29280 Plouzané, France

<sup>3</sup> ATV49, Chambre régionale d'agriculture Pays de Loire, 1 route de Saumur, 49700 Doué en Anjou, France

<sup>4</sup> CNRS, Univ. Rennes, Univ. Brest, Nantes Université, LETG, UMR 6554, F-35000 Rennes, France

**Résumé** – L'avancée des stades phénologiques et de la maturité de la vigne observée ces dernières années sur l'ensemble des vignobles mondiaux impactent la quantité et la qualité de la production. Afin d'évaluer ces évolutions dans le contexte de changement climatique, cette étude propose une analyse spatio-temporelle du potentiel de maturité des cépages Chardonnay et Chenin sur une région viticole traditionnelle, les Pays de la Loire, et une région viticole émergente, la Bretagne. Deux méthodes de spatialisation de l'indice de maturité « *Grapevine Sugar Ripeness* - GSR » sont proposées afin de représenter la variabilité des potentiels de maturité dans le futur et de contribuer à l'évaluation de la durabilité et/ou faisabilité économique de l'activité en fonction des différents objectifs de production. Les résultats obtenus montrent que les dates de maturité du Chardonnay et du Chenin en Bretagne dans un futur lointain (2071-2100) pourraient être celles des Pays de la Loire en futur proche (2021-2050).

**Mots-clés** : changement climatique, viticulture, indice de maturité, Bretagne et Pays de la Loire, 1976-2100.

**Abstract** – **Mapping the ripeness potential of Chardonnay and Chenin in western France.** Advanced timing of phenological stages and vine maturity, as observed in worldwide wine-regions affect wine quantity and quality. In order to assess these evolutions in the context of climate change, a spatio-temporal analysis of the Chardonnay and Chenin grape variety maturity potential was undertaken for a traditional wine region, Pays de la Loire, and an emerging wine region, Brittany. Two spatialization methods of the GSR maturity index were used to highlight future ripeness variability and to ensure the economic sustainability and/or feasibility of the activity according to different production targets. Results showed that Chardonnay and Chenin dates of ripeness in Brittany towards the end of the century could be those of Pays de la Loire during the near future period.

**Keywords:** Climate change, viticulture, Grape Sugar Ripeness, Bretagne and Pays de la Loire, 1976-2100.

\* Auteure de correspondance : [valerie.bonnardot@univ-rennes2.fr](mailto:valerie.bonnardot@univ-rennes2.fr)

## Introduction

Les impacts du changement climatique sur la viticulture sont observés sur l'ensemble des vignobles mondiaux. Ils se traduisent entre autres par une avancée des stades phénologiques de la vigne, engendrant des modifications de la composition et de la typicité des vins (Mira de Ordunia, 2010 ; van Leeuwen et Darriet, 2016 ; Garcia de Cortazar-Atauri *et al.*, 2016). On observe

par exemple sur les dernières décennies une augmentation du taux de sucre et une baisse de l'acidité (Neethling *et al.*, 2012 ; Garcia de Cortazar-Atauri *et al.*, 2017 ; van Leeuwen *et al.*, 2019), deux indicateurs clés permettant aux viticulteurs d'évaluer le niveau de maturité du raisin et de déterminer les dates optimales de récolte en fonction du type et/ou style de vin recherché.

Ces évolutions représentent un enjeu majeur pour la filière viti-vinicole à l'échelle mondiale

(Ollat *et al.*, 2016) et soulève des questions sur la durabilité et l'adaptation des vignobles existants ainsi que sur l'émergence actuelle et future de nouveaux territoires viticoles (Morales-Castilla *et al.*, 2020). En Europe, par exemple, des vignobles méridionaux historiques pourraient être menacés, comme par exemple au Portugal (Fraga *et al.*, 2017), ou en Espagne et en Italie (Morales-Castilla *et al.*, 2020) tandis que de nouvelles régions émergent à des latitudes plus septentrionales bénéficiant de conditions climatiques plus favorables à la viticulture, comme en Angleterre et au Pays de Galles (Nesbitt, 2018) ou encore en Belgique (Doutreloup *et al.*, 2022). Les projections du changement climatique sur la viticulture mondiale illustrent ce déplacement en latitude et la redistribution géographique potentielle des vignobles (Malheiro *et al.*, 2010 ; Hannah *et al.*, 2013 ; Moriondo *et al.*, 2013 ; Santos *et al.*, 2012 ; Fraga *et al.*, 2016 ; Dunn *et al.*, 2019 ; Remenyi *et al.*, 2020). C'est le cas en France où les projections climatiques futures montrent des opportunités de développement de nouvelles régions viticoles comme en Bretagne (Zavlyanova *et al.*, 2023).

Le déplacement vers des latitudes plus élevées fait partie des scénarios d'adaptation au changement climatique envisagés par la filière vitivinicole française. L'étude prospective d'Aigrain *et al.* (2019) a fait ressortir quatre stratégies d'adaptation principales à partir d'enquêtes sur la perception du changement climatique et la volonté d'adaptation des acteurs de la filière vitivinicole : 1) un « scénario conservateur » avec peu ou pas de changement par rapport aux conditions actuelles ; 2) un « scénario libéral » avec moins de réglementation ; 3) un « scénario innovant » visant à intégrer de nouvelles pratiques pour maintenir les vignobles dans les zones géographiques actuelles et 4) un scénario « nomade » envisageant des plantations à plus haute altitude et/ou sur des versants nord dans les régions viticoles existantes, voire un déplacement vers de nouvelles régions, notamment plus septentrionales.

Une meilleure connaissance de la variabilité spatio-temporelle des conditions climatiques et de ses impacts sur le comportement de la vigne à l'échelle régionale et locale est donc essentielle pour évaluer plus précisément la durabilité et le

potentiel des vignobles et anticiper des trajectoires d'adaptation des pratiques annuelles et/ou pérennes, incluant un changement de porte-greffe, de cépages ou une relocalisation du vignoble (Neethling *et al.*, 2019).

Les études agro-climatologiques évaluant les impacts du climat sur la viticulture utilisent généralement des indices fondés sur la température qui permettent de classer et de comparer les régions viticoles existantes. Parmi eux, les indices bioclimatiques de Winkler et Huglin, adaptés à la viticulture, classifient les vignobles dans différentes catégories climatiques (Winkler *et al.*, 1974 ; Huglin, 1978 ; Huglin et Schneider, 1998), et peuvent être mis ensuite en relation avec le développement de la vigne (avancée phénologique, maturité, cépages, ...). Plus récemment, de nouveaux modèles phénologiques permettent de définir avec plus de précision les stades phénologiques de la vigne et la maturité des baies de raisin (Morales-Castilla *et al.*, 2020 ; Parker *et al.*, 2011, 2013). Ces indices se fondent sur un cumul de température afin de caractériser le développement des stades clés de la vigne (débourrement, floraison, véraison, maturité) en fonction des différents cépages. C'est le cas par exemple dans l'ouest de la France où les indicateurs « *Grapevine Flowering and Veraison* - GFV » de Parker *et al.* (2011, 2013) et « *Grapevine Sugar Ripeness* - GSR » de Parker *et al.* (2020) ont été calculés sur les vignobles traditionnels en Région Pays de la Loire (Neethling, 2016) et sur une région viticole émergente, la Bretagne (Bonnardot et Quénot, 2020 ; Bonnardot *et al.*, 2022) pour prédire respectivement les stades phénologiques de la vigne et le degré de maturité des raisins. L'utilisation de ces deux modèles offre des perspectives méthodologiques intéressantes, comme aide à la décision pour les vignobles existants et accompagnement des choix de cépages dans les régions viticoles émergentes (Zavlyanova *et al.*, 2023).

Ces indicateurs ont également été spatialisés sur des territoires variés, en particulier l'indice GSR qui permet de déterminer les dates auxquelles un cépage atteint une concentration spécifique de sucre dans les raisins et donc, un potentiel alcoolique dans les vins produits. C'est le cas par exemple sur des territoires dans l'ouest de la France (Zavlyanova, 2020 ;

Zavlyanova *et al.*, 2023), en Belgique (Doutreloup *et al.*, 2022) ou encore en Californie (Skahill *et al.*, 2023) où différentes méthodologies de spatialisation sont utilisées à cet effet. Ces études mettent en avant les variabilités inter-régionales de ces indices pour plusieurs cépages afin de définir les zones viticoles les plus menacées et/ou les plus adaptées aux futures évolutions climatiques. La majorité d'entre elles spatialisent la date moyenne à laquelle le seuil de maturité désiré est atteint, calculée sur des périodes temporelles prédéfinies, passées ou futures. Dans les travaux de Skahill *et al.* (2023) et Doutreloup *et al.* (2022), la cartographie permet d'identifier les régions pour lesquelles les cépages étudiés atteignent la maturité ciblée sur des périodes optimales d'un mois comprises entre septembre et octobre. Les cartes réalisées par Zavlyanova *et al.* (2023) identifient les secteurs en Bretagne où l'indice est atteint à une date moyenne jugée limite pour assurer une récolte de qualité, mettant en avant les régions adaptées à plusieurs objectifs de production (vins effervescents ou vins tranquilles, blancs et rouges). Différents cépages ont été étudiés comme les cépages traditionnels du Val de Loire (Chenin et Cabernet franc) ou encore des cépages issus des régions viticoles septentrionales françaises (Pinot noir et Chardonnay) comme la Bourgogne ou la Champagne.

L'étude proposée ici étudie investit deux autres méthodologies de représentation et d'analyse spatiale de l'indice de maturité GSR de Parker *et al.* (2020) afin de mieux prendre en compte la variabilité climatique interannuelle des périodes trentenaires étudiées et d'évaluer plus précisément le potentiel thermique nécessaire à une maturité optimale des différents cépages sur les régions étudiées. Ce travail permet également de contribuer à l'évaluation de la durabilité de la culture de la vigne dans la région viticole traditionnelle des Pays de la Loire tout en étudiant la faisabilité et viabilité économique dans la région émergente en Bretagne.

Elle est réalisée dans le cadre du projet CLIMATVEG sur l'adaptation au changement climatique des filières végétales en Pays de Loire et Bretagne (<https://www.vegepolys-valley.eu/projet-climatveg/>) et s'inscrit dans la continuité des travaux sur la Bretagne réalisés dans le cadre du projet ACCAF - LACCAVE 2.21 (Zavlyanova, 2020 ;

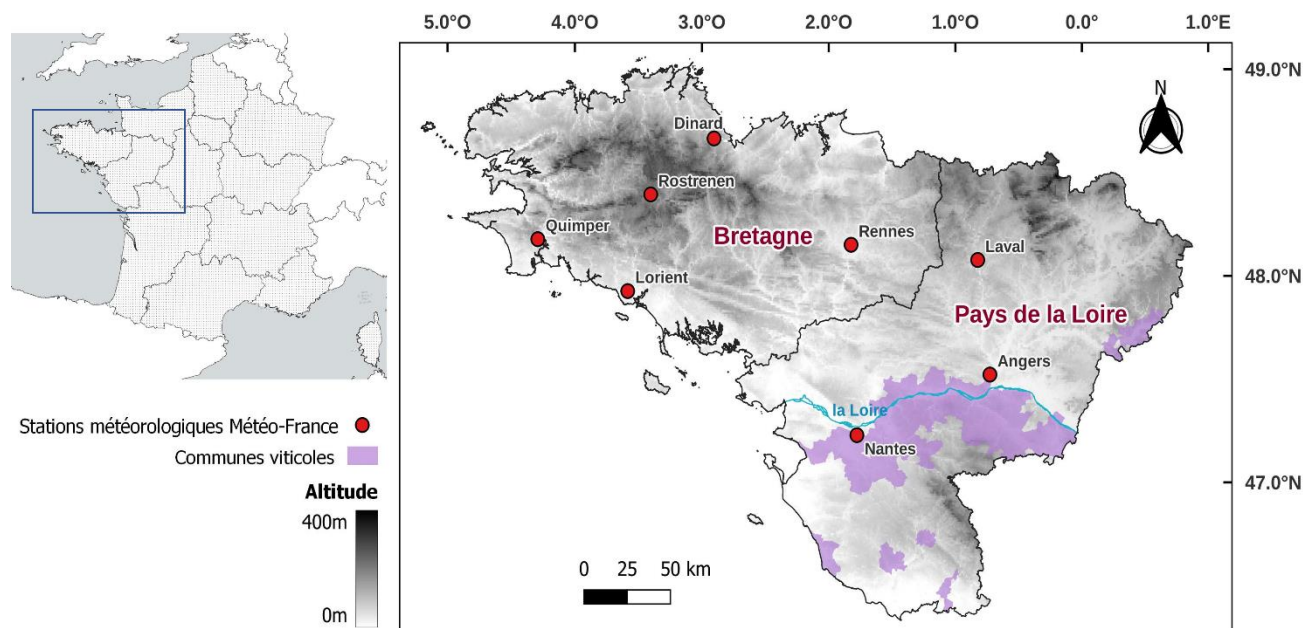
Bonnardot *et al.*, 2022 ; Zavlyanova *et al.*, 2023). Ces résultats ont partiellement été présentés au 36<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie de Bucarest (Petitjean *et al.*, 2023).

## 1. Données et méthodes

### 1.1. Territoire d'étude

L'espace d'étude s'étend sur les deux régions administratives françaises des Pays de la Loire et de la Bretagne (figure 1). Les régions Bretagne et Pays de la Loire sont situées approximativement entre 46°N et 49°N de latitude, et entre 0°W et 5°W de longitude. Elles sont sous l'influence d'un climat océanique, plutôt doux et humide, avec un faible contraste saisonnier qui s'intensifie progressivement vers l'est. A l'échelle locale, ce climat est nuancé par le relief dont l'altitude la plus élevée culmine à 385 m en Bretagne et à 417 m pour les Pays de la Loire (figure 1). L'ampleur du changement climatique a été étudié dans ces régions, notamment ses impacts sur l'agriculture (Mérot *et al.*, 2013 ; Amiot *et al.*, 2022, 2023).

La région des Pays de la Loire englobe des zones viticoles traditionnelles de France, avec des appellations relevant du bassin viticole de la Loire, notamment celle du Val de Loire. À l'ouest de la France, c'est le vignoble le plus septentrional. Seuls les vignobles de Champagne, de Moselle et d'Alsace ou encore le nord de la Bourgogne, à l'est de la France, sont à des latitudes similaires ou plus élevées. En excluant le vignoble vendéen, le Val de Loire est divisé en deux sous-régions viticoles sur la région des Pays de la Loire : le Pays Nantais à l'ouest et l'Anjou-Saumur à l'est. Elles sont constituées de 13 appellations viticoles de vins rouges, blancs ou rosés, où le Chenin et le Cabernet Franc sont respectivement les principaux cépages blanc et rouge (Barbeau, 2008). La variabilité spatio-temporelle de la température dans cette région peut avoir des impacts sur le développement de la vigne (Bonnefoy *et al.*, 2012). Des études récentes ont également pu caractériser le changement climatique et son impact sur les vignobles du Val de Loire (Neethling, 2016). Pour ces cépages, des stades phénologiques et des dates de récolte plus précoces ont été observés, ainsi que des teneurs en sucre plus élevées et des niveaux d'acidité plus faibles dans les baies à la vendange.



**Figure 1 :** Localisation de la zone d'étude en Bretagne et Pays de la Loire en France, des vignobles d'appellations (mauve) et des huit stations météorologiques synoptiques utilisées (cercles rouges). *Location of the study area in Brittany and Pays de la Loire, France; of vineyards surface (purple) and the eight meteorological stations used in the study.*

Depuis 2015 et un décret relatif au régime d'autorisation de plantations de vigne (décret n°2015-1903 ; [www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000031741339](http://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000031741339)), la plantation de vigne en Bretagne est autorisée, bien qu'elle y ait déjà été cultivée auparavant (Saindrenan, 2016 ; Bachelier, 2020). Les superficies viticoles sont majoritairement réparties au sud du Morbihan mais des projets se développent sur l'ensemble de la région (source : Association pour la Reconnaissance des Vins Bretons, 2023 ; [vigneronsbretons.bzh/](http://vigneronsbretons.bzh/)). Dans ce climat océanique frais et humide, l'augmentation des températures observée depuis les années 2000 (Bonnardot et Quénol, 2020) et la prédominance dans le futur d'années aux étés chauds et secs (Dubreuil, 2022 ; HCBC, 2023) sont parmi les éléments qui apparaissent bénéfiques, en améliorant les conditions thermiques de développement de la vigne et des raisins ainsi que le potentiel qualitatif des vins produits. Le développement de la vigne dans cette région marque surtout l'ampleur des impacts régionaux du changement climatique (Bonnardot et Quénol, 2023).

## 1.2. Données climatiques et évaluation du modèle

Les températures moyennes journalières issues des projections climatiques régionalisées à 8 km

(jeu de données DRIAS-2020 corrigé) ont été téléchargées à partir du portail Drias ([www.drias-climat.fr/](http://www.drias-climat.fr/)). Afin d'évaluer la précision des différents modèles, les températures moyennes de la saison végétative (mars-octobre) issues de la période historique (1976-2005) de trois modèles ont été comparées à celles mesurées *in situ* par huit stations météorologiques issues du réseau synoptique de Météo-France (Angers, Dinard, Laval, Lorient, Nantes, Quimper, Rennes, Rostrenen), représentatives de la variabilité climatique régionale. Ces modèles ont été préalablement sélectionnés en fonction de leur position médiane (CNRM-CM5 / ALADIN63) ou extrême (HadGEM2 / CCLM4-8-17 et IPSL-CM5A / WRF381P) par rapport aux températures annuelles et estivales sur l'ensemble des deux régions (Bonnardot *et al*, 2023). Ces modèles sont nommés respectivement CNRM/ALADIN, HadGEM2/CCLM4 et IPSL/WRF pour faciliter la lecture.

Les projections issues du modèle CNRM/ALADIN ont été spatialisées sur l'ensemble des deux régions. Un seul modèle a été sélectionné pour éviter de lisser les années extrêmes en moyennant plusieurs modèles. Les données ont été extraites pour les 962 points de grille des régions Bretagne et Pays de la Loire, en distinguant trois périodes trentennaires selon la norme climatique de l'OMM : une période historique

(1976-2005), une période de futur proche (2021-2050) et une période de futur lointain (2071-2100). De même, seul le scénario RCP 8.5 a été choisi, correspondant à un réchauffement de 2,6°C à 4,8°C en moyenne globale d'ici 2100 pour mettre en place une méthodologie applicable à d'autres modèles et d'autres scénarios.

### 1.3. Modélisation de la date de maturité des cépages Chardonnay et Chenin

L'indice Grapevine Sugar Ripeness (GSR) (Parker *et al.*, 2020) a été utilisé pour modéliser les dates de maturité des cépages. Ce modèle phénologique linéaire, fondé sur des cumuls de températures, a été établi à partir d'une large base de données d'observations phénologiques réalisées sur plusieurs années, regroupant des informations sur 65 cépages cultivés dans différentes régions viticoles du monde et soumises à des conditions climatiques variées. Ce modèle permet de déterminer des dates de maturité pour des concentrations spécifiques de sucre dans les baies de raisin, allant de 170 à 220 g/L. Il se calcule en cumulant les températures moyennes quotidiennes supérieures à 0°C à partir du 1<sup>er</sup> avril pour l'hémisphère nord. Des valeurs seuils dépendant de l'exigence thermique de chaque cépage ont été calibrées et permettent de calculer les dates de maturité auxquelles sont atteintes des taux de sucre ciblés. L'équation est la suivante :

$$\sum_{t_0=91}^{t_s} T_{md} \geq F^*$$

où le cumul quotidien commence le 1<sup>er</sup> avril ( $t_0 = 91$ ),  $T_{md}$  désigne les températures moyennes quotidiennes supérieures à zéro, et  $t_s$  le jour de l'année calculé à partir du 1<sup>er</sup> janvier lorsque le seuil de cumul thermique  $F^*$  prédéfinie en fonction du cépage et du taux de sucre ciblé est atteint.

Les résultats présentés dans ce travail concernent deux cépages blancs : le Chardonnay et le Chenin, largement plantés dans les régions viticoles septentrionales françaises et présentant des niveaux différents de précocité de maturité (Huglin et Schneider, 1998 ; Parker *et al.*, 2020).

Dans cette étude, le taux de sucre a été ciblé à 190 g/L dans un objectif de production de vins secs, comme précédemment utilisé et justifié dans les

travaux de Zavlyanova *et al.* (2023). Il est identique pour les deux cépages afin de pouvoir mettre en avant la variabilité de leur potentiel de maturité pour un même objectif de production. Pour atteindre ce taux de sucre, le cépage Chardonnay, à maturité précoce, exige un minimum de 2813 degrés-jours tandis que le Chenin, à maturité plus tardive, en a besoin de 2909. Ces seuils ont permis de calculer les dates de maturité annuellement sur chaque point de grille pour les périodes définies.

### 1.4. Spatialisation du potentiel de maturité

Deux méthodes de représentation cartographique du potentiel de maturité sont présentées. La première s'appuie sur la spatialisation de la date de maturité correspondant à celle du décile supérieur de chaque période trentenaire. Cette méthode a l'avantage d'identifier les secteurs qui, pour 90 % des années des périodes étudiées, atteignent le seuil de maturité désiré (190 g/L) avant des dates prédéfinies. Pour cela, des dates précoces (1<sup>er</sup> septembre) et tardives (15 octobre) ont été définies à partir des dates de maturité à 190 g/L observées actuellement pour le Chenin sur les vignobles du Val de Loire, assurant ainsi une vendange de qualité. Ces bornes dépendent donc de la région viticole étudiée, du cépage ou encore du type/style de vin produit. Les niveaux de maturité pouvant fortement changer d'une semaine à l'autre en raison de la variabilité météorologique, la légende propose un découpage par période de 7 jours. Contrairement à la cartographie de la date moyenne de maturité qui masque la variabilité interannuelle (Zavlyanova *et al.*, 2023), cette méthode permet de représenter les limites spatiales des années tardives et ainsi d'évaluer en partie la durabilité et viabilité économique de la production.

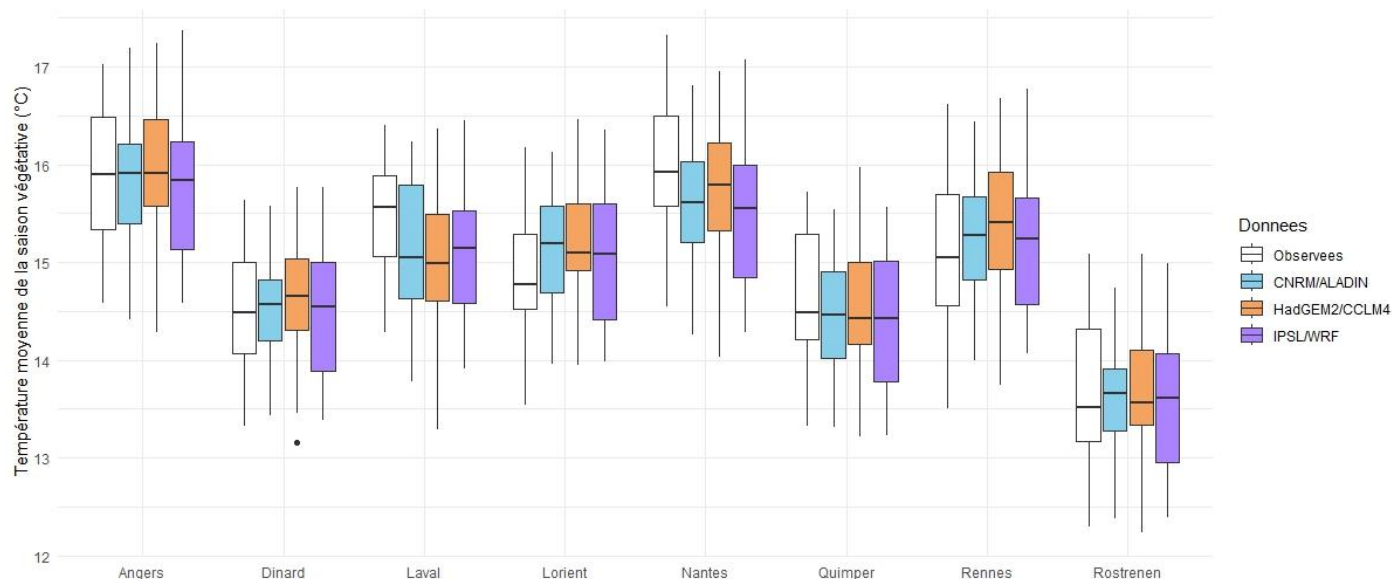
La seconde méthode se fonde sur la spatialisation du pourcentage d'années pour lesquelles la maturité (190 g/L) est atteinte durant une période fixe prédéfinie. En effet, une maturité trop précoce ou trop tardive modifie la qualité de la récolte. Le mois de septembre a été choisi car il correspond à la période moyenne de maturité du Chenin à 190 g/L observée sur le Val de Loire durant les 10 dernières années. Cette fenêtre temporelle est ajustable en fonction des cépages et selon les objectifs de production. Une période du 10 septembre au 10

octobre a par exemple été utilisée pour le Pinot noir en Californie (Skahill *et al.*, 2023), basée sur les travaux de van Leeuwen *et al.* (2019) et Rienth *et al.* (2020). Cette méthode a l'avantage d'identifier les secteurs qui atteignent cette potentialité de maturité sur la fenêtre temporelle définie (>80 % des années) en fonction de la variabilité interannuelle. Les pourcentages les plus faibles représentent les secteurs pour lesquels ce degré de maturité (190 g/L) est atteint trop tôt ou trop tard, mais également les secteurs pour lesquels des degrés de maturité moindres ou supérieurs sont atteints sur cette fenêtre temporelle.

## 2. Résultats

### 2.1. Une sous-estimation des années extrêmes modélisées

La figure 2 illustre la dispersion des températures moyennes calculées sur la saison végétative (mars-octobre). Elle compare les données observées sur huit localités avec celles issues des trois modèles contrastés, en retenant le point de grille le plus proche des observations.



**Figure 2.** Distribution statistique des températures moyennes de la saison végétative (mars-octobre) sur la période de référence 1976-2005 des données observées issues de huit stations météorologiques (réseau synoptique Météo-France) du secteur d'étude et des données modélisées provenant de trois modèles climatiques (CNRM/ALADIN, HadGEM2/CCLM4 et IPSL/WRF) au point le plus proche des observations. *Statistical distribution of mean temperature during the growing season (March-October) over the 1976-2005 reference period for observed data from eight meteorological stations (Météo-France) in the study area and for simulated data from three climate models (CNRM/ALADIN, HadGEM2/CCLM4 and IPSL/WRF) by the closest point from the observations.*

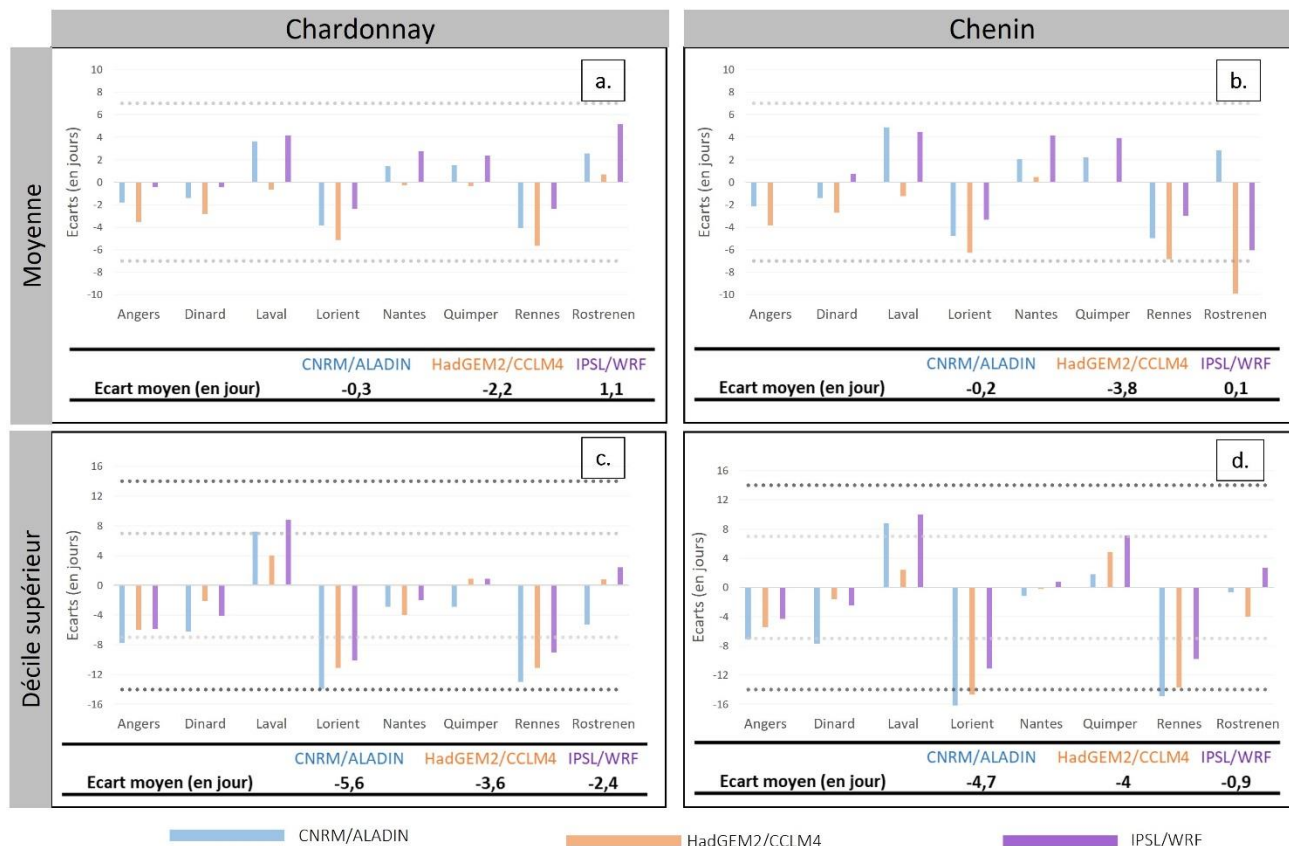
L'amplitude thermique est légèrement plus réduite sur les séries modélisées, particulièrement pour les modèles CNRM/ALADIN et HadGEM2/CCLM4, indiquant une sous-estimation des années extrêmes chaudes et froides par rapport aux séries observées. Les résultats sont toutefois différents selon les localités. Les données modélisées ont tendance à sous-estimer les températures moyennes de la saison végétative pour les stations de Laval et de Nantes, mais elles les surestiment pour celles de Lorient et Rennes. On note très peu de différences entre les valeurs médianes des moyennes des trois modèles.

Ces écarts engendrent des biais sur les dates de maturité calculées (figure 3). A partir des données modélisées, on note des dates de maturité plus précoces ou plus tardives selon les localités. Les écarts des jours de maturité moyens pour les deux cépages (figure 3) sont modérés pour les trois modèles et sur l'ensemble des localités, avec des écarts pouvant aller jusqu'à une semaine de décalage pour le Chardonnay sur le modèle HadGEM2/CCLM4, à Rennes et Rostrenen. Les écarts moyens sur l'ensemble des sites sont très faibles pour les modèles CNRM/ALADIN (-0,3 jour) et IPSL/WRF (1,1 jours), mais un peu plus

importants pour le modèle HadGEM2/CCLM4 (-2,2 jours).

Les écarts des jours de maturité obtenus à partir des déciles supérieurs sont toutefois plus importants (figure 3). En effet, les écarts moyens augmentent

pour les deux cépages et sur l'ensemble des modèles, avec des dates de maturité plus précoces de 1 à 6 jours. Ces écarts sont particulièrement marqués à Lorient et Rennes et avoisinent deux semaines de décalage par rapport aux données observées.

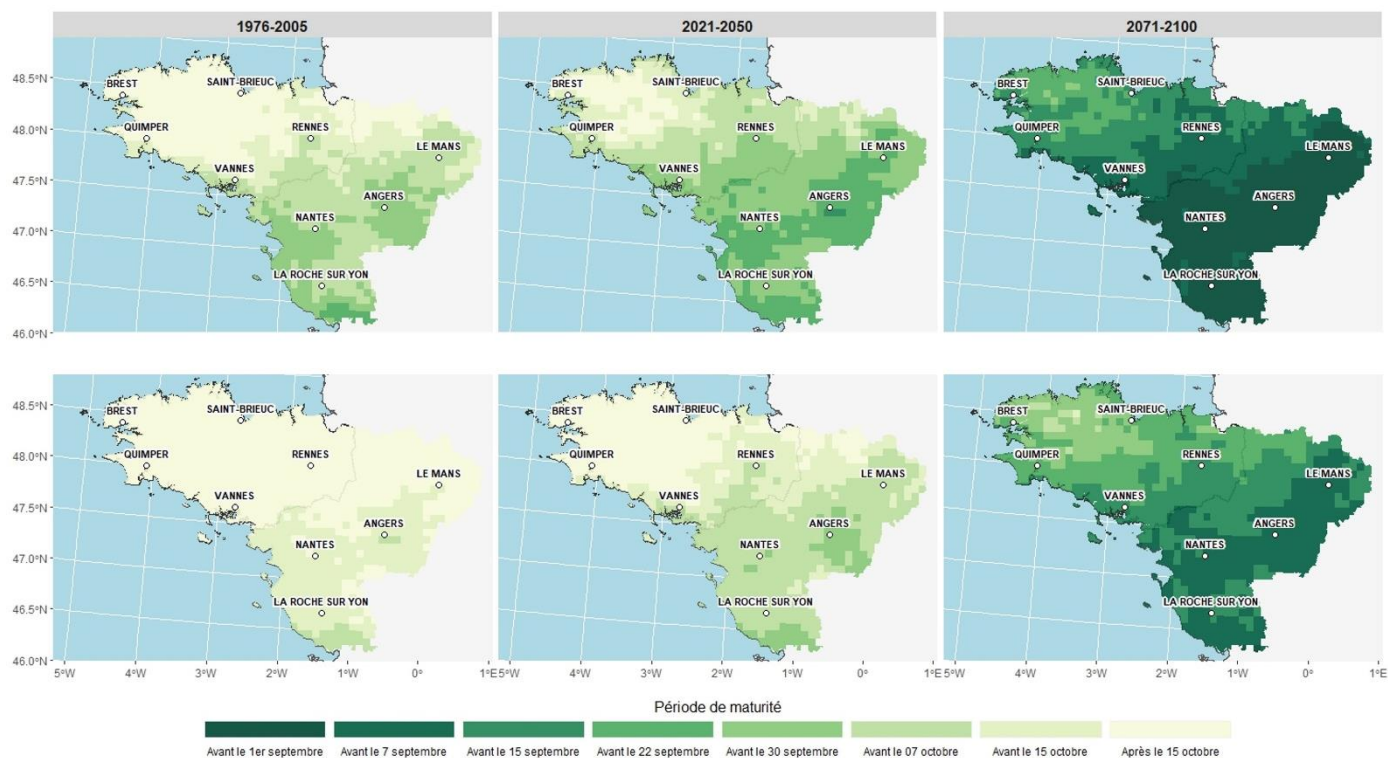


**Figure 3.** Ecarts des dates de maturité (en jours) calculés à partir de la valeur moyenne (en haut, a. et b.) et du décile supérieur (en bas, c. et d.) de la maturité ciblée à 190 g/L du Chardonnay (à gauche, a. et c.) et du Chenin (à droite, b. et d.) entre les données modélisées issues des modèles CNRM/ALADIN, HadGEM2/CCLM4 et IPSL/WRF et les données observées à huit localités sur la période historique de référence 1976-2005. *Differences between day of maturity calculated from the average value (top, a. and b.) and the upper decile (bottom, c. and d.) for the targeted maturity (190 g/L) for Chardonnay (left, a. and c.) and Chenin (right, b. and d.) between modeled data from CNRM/ALADIN, HadGEM2/CCLM4 et IPSL/WRF models and observed data at eight locations over the 1976-2005 historical reference period.*

## 2.2. Évolution future des dates de maturité du Chardonnay et du Chenin ciblée à 190 g/L

En s'attachant au vignoble actuel du Val de Loire, la spatialisation des dates de maturité ciblée à 190 g/L (figure 4, gauche) met en avant des dates plus précoces de maturité pour les deux cépages sur la période historique (1976-2005). Dans le futur proche (figure 4, centre), le cépage Chardonnay présente des dates de maturité plus précoces, et atteindrait ce seuil de maturité avant le 7 octobre pour 90 % des années sur l'ensemble des Pays de la

Loire et sur toute la partie sud-est de la Bretagne. On observe des évolutions similaires pour le Chenin, très largement cultivé dans cette région, avec des dates de maturité toutefois plus tardives en raison d'une exigence thermique plus importante. Ce cépage atteindrait le niveau de maturité de 190 g/L avant le 7 octobre dans 90 % des années sur une grande partie du territoire des Pays de la Loire, ainsi qu'au sud et à l'est de la Bretagne. Plus à l'ouest et au nord du territoire breton, ainsi qu'au nord des Pays de la Loire, ce niveau de maturité n'est quasiment jamais atteint avant le 15 octobre.



**Figure 4.** Période durant laquelle les cépages Chardonnay (haut) et Chenin (bas) atteindraient la maturité de 190 g/L sur 90 % des années sur les périodes 1976-2005 (à gauche), 2021-2050 (au centre) et 2071-2100 (à droite) pour le scénario RCP 8.5 (CNRM/ALADIN) en régions Bretagne et Pays de la Loire. *Maturity period at which Chardonnay (top) and Chenin (bottom) grape varieties would reach 190 g/L for 90% of years over the periods of 1976-2005 (left) 2021-2050 (middle) and 2071-2100 (right) under the RCP 8.5 scenario conditions (CNRM/ALADIN) in the Brittany and Pays de la Loire regions.*

Dans un futur lointain (figure 4, droite), le Chardonnay atteindrait le seuil de maturité à 190 g/L avant le 7 septembre pour 90 % des années sur la totalité de la région Pays de la Loire et sur toute la partie Sud-Est de la Bretagne. Le cépage Chenin l'atteindrait avant le 30 septembre sur l'ensemble du territoire breton, voire avant le 15 septembre au sud à l'est. En région Pays de la Loire, le Chenin atteindrait ce niveau de maturité de plus en plus tôt, avant le 7 septembre, sur toute la partie sud et Est de la région, comprenant l'actuel vignoble du Val de Loire.

### 2.3. Évolution du pourcentage d'années avec une maturité du Chenin et du Chardonnay ciblée à 190 g/L atteinte en septembre

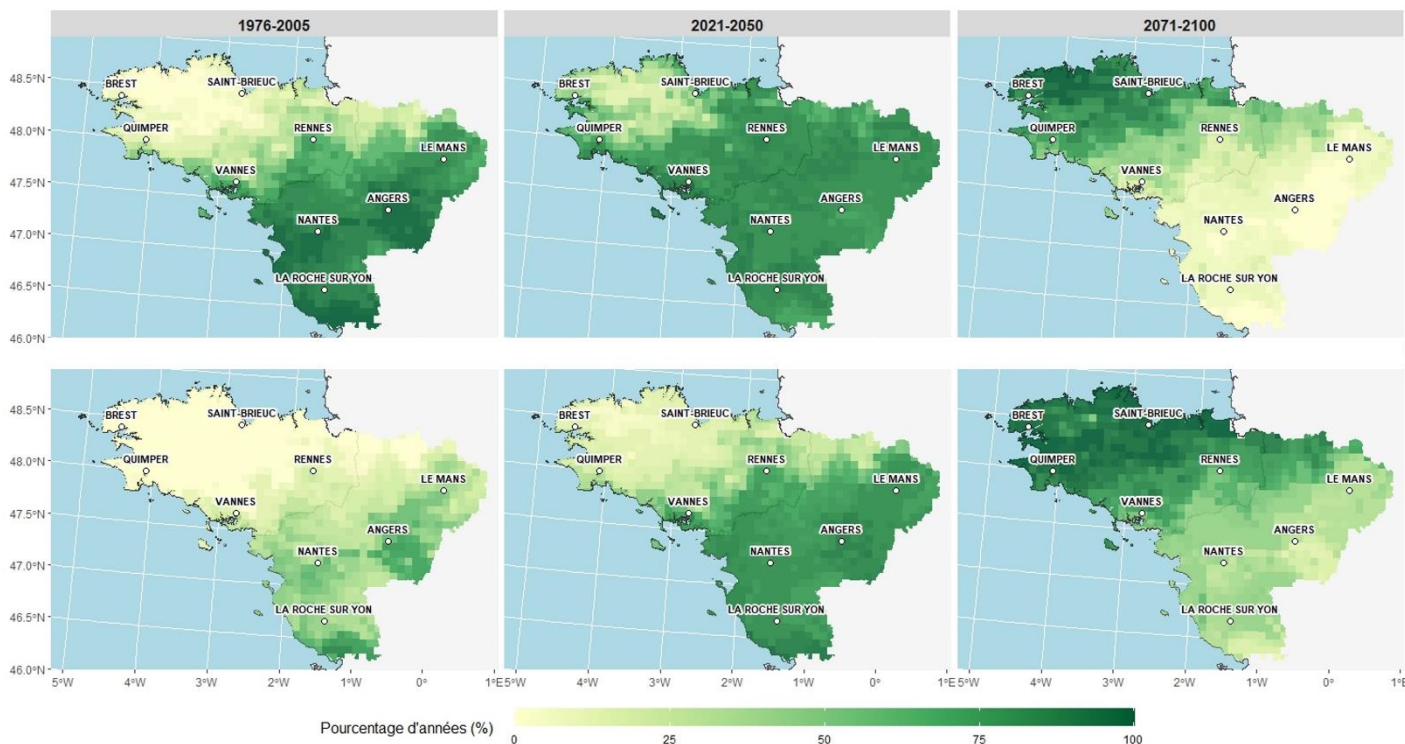
Sur la période historique (1975-2005), la cartographie du pourcentage d'années durant lesquelles les cépages atteignent le seuil de maturité de 190 g/L en septembre révèle la précocité du vignoble du Val de Loire par rapport à la Bretagne (figure 5, gauche). Dans le futur proche (figure 5,

centre), le pourcentage d'années durant lesquelles le Chenin atteint le seuil de maturité de 190 g/L durant le mois de septembre est en grande partie supérieur à 70 % sur l'ensemble des Pays de la Loire et le sud Bretagne. Tandis qu'il reste très faible (0 à 40 %) sur le reste du territoire breton, il est plus important (>75 %) sur le Nord et les zones littorales de la Bretagne pour le Chardonnay. Dans le futur lointain (figure 5, droite), ce degré de maturité serait atteint moins fréquemment en septembre en région Pays de la Loire, avec seulement 10 à 40 % des années pour le Chenin, et entre 0 à 10 % pour le Chardonnay.

L'augmentation des températures dans cette région engendrerait une maturité à 190 g/L plus précoce (atteinte avant le 1<sup>er</sup> septembre) et/ou un degré de maturité plus élevé si une récolte en septembre est conservée, avec le risque de modifier la composition et la typicité du vin. En revanche, les secteurs où le degré de maturité ciblé à 190 g/L est atteint en septembre sont, dans le futur, décalés vers le centre et l'ouest de la région Bretagne avec plus de 80 % des années pour le cépage Chenin. Pour le

Chardonnay, ce degré de maturité en septembre serait atteint de manière régulière seulement sur l'extrémité nord-ouest de la Bretagne à l'inverse du

Val de Loire où ce cépage atteindrait une maturité de 190 g/L avant le 1<sup>er</sup> septembre chaque année.



**Figure 5.** Pourcentage d'années durant lesquelles les cépages Chardonnay (haut) et Chenin (bas) atteignent une maturité de 190 g/L entre le 1<sup>er</sup> et le 30 septembre sur les périodes 1976-2005, 2021-2050 et 2071-2100 pour le scénario RCP 8.5 (CNRM/ALADIN) en régions Bretagne et Pays de la Loire. *Percentage of years during which the Chardonnay (top) and Chenin (bottom) grapevine varieties reach a maturity targeted at 190 g/L between September 1st and 30rd over 1976-2005, 2021-2050 and 2071-2100 periods for the RCP 8.5 scenario (CNRM/ALADIN) in the Brittany and Pays de la Loire regions.*

## Conclusion

Les méthodologies de spatialisation de l'indicateur GSR ont permis d'évaluer le potentiel de maturité du Chardonnay et du Chenin sur deux périodes futures sous les conditions climatiques du scénario RCP 8.5 (CNRM/ALADIN).

La première méthode, fondée sur la représentation des dates de maturité obtenues en calculant le décile supérieur de la période trentenaire, identifie les limites territoriales et la date associée à laquelle la maturité, ciblée à 190 g/L, est atteinte, pour 90 % des années. Dans un futur proche, la maturité du Chardonnay pourrait être atteinte avant le 7 octobre sur toute la partie sud-est de la Bretagne. Dans un futur lointain, ce degré de maturité serait atteint sur l'ensemble de la Bretagne pour le Chenin avant le 7 octobre. Les potentiels de maturité des deux cépages calculés pour les secteurs en Pays de la

Loire sur le futur proche sont projetés sur le territoire de la Bretagne dans le futur lointain. Ces résultats sont toutefois à modérer avec les biais calculés entre les données modélisées et observées, montrant des dates spatialisées plus tardives d'une semaine en moyenne.

En suivant la même méthodologie, la spatialisation des dates de maturité obtenues à partir du calcul du décile inférieur permettrait également de compléter cette analyse en apportant des informations sur les années précoces et leurs limites.

La deuxième méthode a l'avantage de spatialiser les limites territoriales du potentiel de maturité en tenant compte de la variabilité interannuelle et donc, des années trop précoces et celles trop tardives pour obtenir une maturité technique optimale en fonction du style de vin recherché. La représentation du pourcentage d'années durant lesquelles le

Chenin atteindrait la maturité de 190 g/L en septembre nous montre en effet que le potentiel de maturité de ce cépage est bien présent sur le vignoble du Val de Loire sur la période historique ; il se maintient et s'étend sur la région Pays de la Loire dans un futur proche, et s'améliore en Bretagne sur le futur lointain. Ce pourcentage d'années diminue sur les Pays de la Loire à l'horizon lointain à cause du degré de maturité (190 g/L) majoritairement obtenu avant le mois de septembre. Ce phénomène est encore plus marqué pour le cépage Chardonnay (à maturité plus précoce), qui atteindrait ce niveau de maturité en septembre seulement sur l'extrémité nord-ouest de la Bretagne dans un futur lointain. Pour cette méthode, il est toutefois nécessaire de bien définir la période d'étude (fenêtre temporelle de maturation des raisins) en fonction de la région et du cépage étudié.

L'utilisation de l'indice GSR et les deux méthodes de spatialisation présentées dans ce travail offrent de nouvelles informations pour des études sur la durabilité de la culture de la vigne sur une région viticole traditionnelle ainsi que sa viabilité économique sur une région émergente. D'autres cépages, notamment des cépages rouges (Pinot noir et Cabernet franc), sont en cours d'analyse avec d'autres degrés de maturité pour répondre à des objectifs de production variés. De même, des simulations avec des données issues d'autres modèles climatiques et les projections du CMIP6 seront effectuées pour prendre en compte l'incertitude liée aux modèles et aux scénarios.

**Remerciements :** Nous tenons à remercier les Régions Pays de la Loire et Bretagne ainsi que l'ADEME pour le financement du projet CLIMATVEG piloté par le pôle de compétitivité VEGEPOLYS VALLEY ; ainsi que Jeanne Thibault de LETG-Brest pour son soutien technique.

## Références

- Amiot L., Bonnardot V., Dubreuil V., 2022. *Le changement climatique en Bretagne et Pays de Loire*. 10 pages. <https://www.vegepolys-valley.eu/projet-climatveg/les-1ers-resultats/>
- Amiot L., Dubreuil V., Bonnardot V., 2023. Le changement climatique en Bretagne : cartographie sur la période observée (1951-2020) et future (2031-2100). *Norois*, 266, mise en ligne janvier 2026. <http://journals.openedition.org/norois/13069>
- Aigrain P., Bois B., Brugière F., Duchêne E., de Cortazar-Atauri I. G., Gautier J., Giraud-Heraud E., Hammond R., Hannin H., Ollat N., Touzard J.-M., 2019. L'utilisation par la viticulture française d'un exercice de prospective pour l'élaboration d'une stratégie d'adaptation au changement climatique. *BIO Web of Conferences* 12, 03020, EDP Sciences.
- ARVB Vignerons Bretons – Le site de l'Association pour la Reconnaissance des Vins Bretons. <https://vigneronsbretons.bzh/> (consulté le 6 septembre 2023).
- Bachelier J., 2020. Vins et vignobles en Bretagne au Moyen Âge : Premières observations et perspectives, In: Vins, vignobles et viticultures atlantiques Quelles trajectoires contemporaines? *Norois*, 254, Presses Universitaires de Rennes, France.
- Barbeau G., 2008. *L'adaptation aux terroirs des cépages du Val de Loire*. Presented at the Librandi Symposium, Ciro Marina, Calabre, Italy, 9-11 May 2008
- Bonnardot V., Quénot H., 2020. Viticulture en Bretagne : challenge ou opportunité ? Quelques indices bioclimatiques régionaux. *Actes du 33<sup>ième</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes, 127-132.
- Bonnardot V., Thibault J., Petitjean T., Tissot C., Quénot H., 2022. La vigne en Bretagne sous observation climatique. *Actes du 35<sup>ième</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Toulouse 2022, <http://www.meteo.fr/cic/meetings/2022/aic/>
- Bonnardot V., Robine-Kormendi E., Tissot C., Quénot H., 2023. Evaluation de la sensibilité des modèles climatiques de Drias sur les régions Bretagne et Pays de la Loire (France). *Actes du 36<sup>ième</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Bucarest, 33-36.
- Bonnardot V., Quénot H., 2023. *Changement climatique et viticulture en Bretagne*. In *Palimpseste*, Revue de valorisation de la recherche en SHS de l'Université de Rennes 2, Dossier thématique intitulé « *Nature/culture : comment changer ?* », 9, 32-37.
- Bonnefoy C., Quénot H., Bonnardot V., Barbeau G., Madelin M., 2012. Temporal and spatial analysis of temperatures in a french wine-producing area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.3552.
- Dubreuil V., 2022. Le changement climatique en France illustré par la classification de Köppen. *La Météorologie*, 116, 37-47.
- Doutreloup S., Bois B., Pohl B., Zito S., Richard Y., 2022. Climatic comparison between Belgium, Champagne, Alsace, Jura and Bourgogne for wine production using the regional model MAR. *OENO One*, 56(3), 1-17. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.3.5356>
- Dunn M., Rounsevell M.D.A., Boberg F., Clarke E., Christensen J., Madsen M., 2019. The future potential for wine production in Scotland under high-end climate change. *Regional Environmental Change*, 19 (3), 723-732. DOI: 10.1007/s10113-017-1240-3.

- Fraga H., Garcia de Cortázar Atauri I., Malheiro A.C., Santos J.A., 2016. Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. *Global Change Biology*, 22 (11), 3774-3788. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13382>.
- Fraga H., García de Cortázar Atauri I., Malheiro A. C., Moutinho-Pereira J., Santos J. A., 2017. Viticulture in Portugal: A review of recent trends and climate change projections. *OENO One*, 51(2), 61-69. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1621>
- Garcia de Cortázar Atauri I., Caubel J., Quénel H., Bois B., Chuine I., Duchêne E., Leroux R., Parker A.K., van Leeuwen C., Ollat N., 2016. Assessment of future climatic conditions in French vineyards. Consequences for defining adaptation strategies. In proceedings: *ClimWine 2016 (Sustainable grape and wine production in the context of climate change)*, UMR Ecophysiologie et Génomique Fonctionnelle de la Vigne (1287), Apr. 2016, Bordeaux, France, 152 p.
- Garcia de Cortázar Atauri I., Duchêne E., Destrac A., Barbeau G., De Rességuier L., Lacombe T., Parker A., Saurin N., van Leeuwen C., 2017. Grapevine phenology in France: from past observations to future evolutions in the context of climate change. *OENO One*, 51 (2), 115-126. DOI: 10.20870/oeno-one.2017.51.2.1622
- Hannah L., Roehrdanz P. R., Ikegami M., Shepard A.V., Shaw M.R., Tabor G., Zhi L., Marquet P.A., Hijman R.J., 2013. Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (17), 6907-6912. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110>.
- Haut Conseil Breton pour le Climat (HCBC), 2023. *Le changement climatique en Bretagne*. Bulletin 2023, Dossier « 2022, une année annonciatrice du climat futur » <https://www.bretagne.bzh/app/uploads/Bulletin-annuel-du-HCBC-29-mars-2023.pdf>
- Huglin P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 64, 1117-1126.
- Huglin P., Schneider C., 1998. *Biologie et écologie de la vigne*. Tec&doc-Lavoisier, Paris (France).
- Malheiro A. C., Santos J. A., Fraga H., Pinto J. G., 2010. Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Climate Research*, 43 (3), 163-177. DOI: 10.3354/cr00918.
- Mérot P., Dubreuil V., Delahaye D., Desnos P., 2013. *Le climat change dans le Grand Ouest – Tendances, impacts, perceptions*. Presses Universitaires de Rennes, 458 p.
- Mira de Orduna R., 2010. Climate change associated effects on wine quality and production. *Food Research International*, 43, 1844-1855.
- Morales-Castilla I., García de Cortázar-Atauri I., Cook B. I., Lacombe T., Parker A., van Leeuwen C., Nicholas K. A., Wolkovich E. M., 2020. Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(6), 2864-2869. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906731117>
- Moriondo M., Jones G.V., Bois B., Dibari C., Ferrise R., Trombi G., Bindi M., 2013. Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climatic Change*, 119 (3-4), 825-839.
- Neethling E., Barbeau G., Bonnefoy C., Quénel H., 2012. Change in climate and berry composition for grapevine varieties cultivated in the Loire Valley. *Clim. Res.*, 53, 89-101
- Neethling E., 2016. *Adaptation de la viticulture au changement climatique : vers des stratégies à haute résolution*. Thèse de Géographie, Université Rennes 2, 195 p.
- Neethling E., Barbeau G., Coulon-Leroy C., Quénel H., 2019. Spatial complexity and temporal dynamics in viticulture: A review of climate-driven scales. *Agric. For. Meteorol.*, 276-277.
- Nesbitt A., Dorling S., Lovett A., 2018. A suitability model for viticulture in England and Wales: opportunities for investment, sector growth and increased climate resilience. *Journal of Land Use Science*, 13 (4), 414-438. DOI: 10.1080/1747423X.2018.1537312
- Ollat N., Touzard J.-M., Van Leeuwen C., 2016. Climate change impacts and adaptations: New challenges for the wine industry. *Journal of Wine Economics*, 11, 139-149.
- Parker A., García de Cortázar-Atauri I., van Leeuwen C., Chuine I., 2011. General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(2), 206-216. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00140.x>
- Parker A. K., Garcia de Cortázar-Atauri I., Chuine I., Barbeau G., Bois B., Boursiquot J.-M., Cahurel J.Y., Claverie M., Dufourcq T., GénY L., Guimberteau G., Hofmann R. W., Jacquet O., Lacombe T., Monamy C., Ojeda H., Panigai L., Payan J.C., Rodriguez B., Rouchaud E., Schneider C., Spring J.L., Storchi S., Tomasi D., Trambouze W., Trought M., van Leeuwen C., 2013. Classification of varieties for their timing of flowering and veraison using a modelling approach: a case study for the grapevine species *Vitis vinifera* L. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 249-264. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.06.005
- Parker A., García de Cortázar-Atauri I., GénY L., Spring J.-L., Destrac A., Schultz H., Molitor D., Lacombe T., Graça A., Monamy C., Stoll M., Storchi P., Trought M. C. T., Hofmann R. W., & van Leeuwen C., 2020. Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of *Vitis vinifera* L. cultivars. *Agricultural and Forest Meteorology*, 285286, 107902. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107902>
- Petitjean T., Bonnardot V., Tissot C., Chassaing T., 2023. Représentations spatiales du potentiel de maturité des cépages : le cas du Chenin dans l'ouest de la France. *Actes du 36<sup>ième</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Bucarest, 222-225.
- Remenyi T. A., Rollins D. A., Love P. T., Earl N. O., Bindoff N. L., Harris R. M. B., 2020. *Australia's wine future-A Climate Atlas*. University of Tasmania, Australia, <https://eprints.utas.edu.au/32250/>
- Rienth M., Lamy F., Schoenenberger P., Noll D., Lorenzini F.,

Viret O., Zufferey V., 2020. *A vine physiology-based terroir study in the AOC-Lavaux region in Switzerland*. XIII<sup>th</sup> International Terroir Congress November 17-18 2020, Adelaide, Australia; Guest editors: Cassandra Collins and Roberta De Bei, OENO One, 54, 863-880.

Saindrenan G., 2011. *La vigne et le vin en Bretagne : chronique des vignobles armoricains - origines, activité, disparitions et réussites*, du Finistère au pays nantais. Coop Breizh éd., France.

Santos J., Malheiro A., Pinto J., Jones G., 2012. Macroclimate and viticultural zoning in Europe: observed trends and atmospheric forcing. *Climate Research*, 51 (1), 89-103. DOI: 10.3354/cr01056

Skahill B., Berenguer B., Stoll M., 2023. Climate projections for Pinot Noir ripening potential in the Fort Ross-Seaview, Los Carneros, Petaluma Gap, and Russian River Valley american viticultural areas. *Agronomy*, 13, 696. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030696>

van Leeuwen C., Darriet P., 2016. The impact of climate change on viticulture and wine quality. *J. Wine Econ.*, 11, 150-167.

van Leeuwen C., Destrac-Irvine A., Dubernet M., Duchêne E., Gowdy M., Marguerit E., Pieri P., Parker A., de Rességuier L., Ollat N., 2019. An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations. *Agronomy*, 9, 514. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514>

Winkler A.J., Cook J.A., Kliever W.M., Lider L.A., 1974. *General viticulture*. University of California Press, Berkeley Los Angeles, USA.

Zavlyanova M., 2020. *Faisabilité climatique de la viticulture en Bretagne dans le contexte du changement climatique : spatialisation d'indices bioclimatiques et identification des régions viticoles potentielles*. Mémoire de master, Bordeaux Sciences Agro, 47 pages.

Zavlyanova M., Bonnardot V., Van Leeuwen C., Quénot H., Ollat N., 2023. The use of GFV and GSR temperature-based models in emerging wine regions to help decision-making regarding choices in grape varieties and wine styles: Application to Brittany (France). *VITIS - Journal of Grapevine Research*, 62, 1-17.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Citation de l'article</b> : Petitjean T., Bonnardot V., Tissot C., Chassaing T., Quénot H., 2023. Représentations spatiales du potentiel de maturité des cépages Chardonnay et Chenin en régions Bretagne et Pays de la Loire (1976-2100). <i>Climatologie</i>, 21, 2.</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|