

Imaginer des variétés de vigne adaptées au changement climatique du futur

Fritzner Pierre-Louis

▶ **To cite this version:**

Fritzner Pierre-Louis. Imaginer des variétés de vigne adaptées au changement climatique du futur. Agronomie. 2020. hal-03139793

HAL Id: hal-03139793
https://hal.inrae.fr/hal-03139793

Submitted on 12 Feb 2021

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.

2019-2020

MASTER AETPF

Agrosciences, Environnement, Territoire, Paysage, Forêt

Parcours ECOSAFE

Imaginer des variétés de vigne adaptées au changement climatique du futur



Fritzner **PIERRE-LOUIS**

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 31/08/2020

Encadrant UMR INRAE SVQV : Eric **DUCHENE**, Ingénieur de recherche

Encadrant UMR INRAE Agroclim : Iñaki **GARCIA DE CORTAZAR**, Ingénieur de recherche

Tutrice : Alice **MICHELOT-ANTALIK**, Maître de conférences Université de Lorraine

UMR SVQV, INRAE Grand Est-Colmar - Équipe Génétique et Amélioration de la Vigne - 28 rue de Herllisheim, 68000 Colmar

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon maître de stage, Éric DUCHÊNE, pour la confiance qu'il m'a accordée, son accueil, ses conseils, son accompagnement, ses encouragements et tout le temps qu'il a passé à me former et à corriger ce rapport. Je le remercie de m'avoir fait découvrir l'univers de la modélisation.

Je remercie également mon second maître de stage, Iñaki GARCIA DE CORTAZAR, pour ses orientations, ses conseils et le temps disposé à me fournir les données nécessaires à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également à ma professeure référente, Alice MICHELOT-ANTALIK, pour ses conseils.

Je remercie l'ensemble du personnel de l'UMR SVQV et l'équipe GAV pour leur chaleureux accueil et leur bonne humeur. Je remercie également Dumas VINCENT de m'avoir permis de suivre la croissance de la vigne sur le terrain ainsi que leur plantation.

Je remercie mes colocataires, Fred HAMMEL et Faten JAOUAHDOU, pour leur support au cours de la période du stage et le partage de culture.

J'exprime toute ma gratitude envers ma fiancée Berlie JOSEPH, pour m'avoir accueilli durant le déroulement de ce travail, surtout pour son amour, son support moral, ses soutiens et son temps passé à corriger le travail.

Un grand merci à ma famille, ma mère Yfonique LAURISSAINT, mes sœurs, mon frère et mes petits neveux et nièces, pour leur amour, leur support moral et psychologique.

Mes remerciements vont enfin à l'égard de tous ceux et celles qui, d'une façon ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce travail.

« L'esprit divin m'a toujours guidé pour atteindre mes objectifs »

Source de l'image sur la page de couverture : https://www.science-et-vie.com/questions-reponses/vignobles-que-change-le-rechauffement-du-climat-44295

Table des matières

I. Introduction 1
1.1. Objectifs du stage et missions 1
II. État de l'art 2
2.1. Généralités sur la vigne 2
2.2. Les vignobles français 2
2.3. Le changement climatique en France 3
2.3.1. Évolution du climat 3
2.3.2. Les projections du climat du futur 3
2.4. Phénologie de la vigne 3
2.5. Impacts du changement climatique sur la vigne 4
2.6. Concept d'idéotypes de plantes 5
III. Matériels et méthodes 5
3.1. Sources de données climatiques 5
3.1.1. Données climatiques de référence observées de 1986 à 2015 5
3.1.2. Données climatiques simulées de 1986 à 2100 6
3.2. Vignobles retenues pour l'étude climatique 6
3.3. Choix des variétés et exigences des variétés de l'étude 7
3.4. Modèles de prévision de la phénologie 8
3.5. Outils utilisés 9
3.6. Calcul des indicateurs éco-climatiques 10
IV. Résultats 10
4.1. Évaluation du modèle de prévision des stades de développement 10
4.2. Validation des données simulées 11
4.3. Évaluation climatique dans le futur 11
4.3.1. Évolution de la phénologie en fonction des différents modèles 12
4.3.2. Évolution des indicateurs écoclimatiques 13
4.4. Prospective 17
4.4.1. Création de génotypes virtuels 17
4.4.2. Évolution de la véraison 18
4.4.3. Évolution du nombre de jours de gel après le débourrement pour les variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon 19
4.4.4. Évolution de la température au cours de la maturation des variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon 19
V. Discussion 20
5.1. Évaluation du modèle de prévision phénologique et validation des données simulées 20

5.2. Évolution de la phénologie en fonction des différents modèles.....20
5.3. Évolution des indicateurs écoclimatiques 21
5.4. Prospective 22
VI. Conclusion 23
VII. Références bibliographiques.....24
VIII. Résumé.....26
IX. Abbréviations.....27
X. Annexes.....28

Liste des figures

Figure 1: Localisation des mailles des vignobles sélectionnées (source: INRAE Avignon). ...7
Figure 2: Comparaison entre les dates simulées et observées sur la période 1986-2015 pour la variété Riesling à Colmar.....11
Figure 3: Comparaison de la moyenne des températures moyennes (^{o}C) simulées sur les trois phases de développement de la vigne pour la période 1986-2015 avec les modèles IPSL, CNRM et les données SAFRAN.....11
Figure 4: Comparaison du cumul de pluviométrie (mm) simulée sur le cycle végétatif de la vigne pour la période 1986-2015 avec les modèles IPSL, CNRM et les données SAFRAN..11
Figure 5: Évolution des dates de débourrement à partir du 1er Janvier simulées sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015. 12
Figure 6: Évolution des dates de floraison à partir du 1er Janvier, simulées sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015. 12
Figure 7: Évolution des dates de véraison à partir du 1er Janvier simulées sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015. 13
Figure 8: Évolution du nombre moyen de jours par an de gel simulés durant la phase débourrement-floraison sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015. 13
Figure 9: Évolution du cumul de rayonnement simulé durant la phase floraison-véraison sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015. 14
Figure 10 : Évolution de la moyenne des températures moyennes simulées durant la phase véraison-vendange sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015.....14
Figure 11: Évolution de la moyenne des températures maximales simulées durant la phase véraison-vendange sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015.....15
Figure 12: Évolution du cumul de pluviométrie simulée durant la phase véraison-vendange sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparée avec la période 1986-2015. 16
Figure 13: Évolution du cumul de rayonnement simulé durant la phase véraison-vendange sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparé avec la période 1986-2015. 16
Figure 14: Évolution de la moyenne des températures moyennes simulées durant le cycle sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015. 16
Figure 15: Évolution du cumul de pluviométrie simulée durant le cycle végétatif sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparée avec la période 1986-2015. 17
Figure 16 : Évolution de la somme des déficits hydriques simulés durant le cycle végétatif sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015 avec le modèle CNRM.....17
Figure 17: Dates de véraison de toutes les variétés simulées au présent (1986-2015) avec les données SAFRAN à Colmar et Montpellier. 18
Figure 18: Évolution de la date de véraison, des variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon avec le modèle CNRM sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015.....19
Figure 19 : Évolution du nombre moyen de jours par an de gel simulés avec le modèle CNRM, pour les variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015. 19
Figure 20: Évolution de la moyenne des températures moyennes simulées avec le modèle CNRM, des variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon, durant la phase véraison-vendange sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015. Les lignes Q1 et Q3 représentent le premier et le troisième quartile des

températures moyennes simulées avec les données de référence SAFRAN pour les variétés Cabernet-Sauvignon, Chardonnay et Syrah. 20

Liste des tableaux

Tableau 1. Conditions climatiques des vignobles de 1958 à 1971. 2
Tableau 2. Caractéristiques des mailles et variétés retenues. 7
Tableau 3. Valeurs de l'Indice Héliothermique de Huglin pour les variétés retenues. 8
Tableau 4. Paramétrage des modèles phénologiques séquentiels de la dormance au débourrement (Smoothed-Utah, SU), à la floraison et à la véraison (Wang et Engel, WE). 8
Tableau 5. Paramètres des besoins en froid (C) et de forçage (F), utilisés comme seuils au-dessus desquels un stade phénologique donné est atteint, de la dormance au débourrement (C_DB et F_DB), du débourrement à la floraison (F_DB-FL) et de la floraison à la véraison (F_FL-VER). 9
Tableau 6. Liste des indicateurs calculés. S2 = débourrement, S3 = floraison, S4 = véraison, S5 = vendange 10
Tableau 7. Paramètres des besoins en froid (C) et de forçage (F) des variétés Tardive et Précoce. 18

I. Introduction

Depuis la révolution industrielle initiée au 19ème siècle, le développement du transport et plus récemment la révolution verte au 20ème siècle, les émissions de gaz à effet de serre ne cessent d'augmenter car ces secteurs consomment beaucoup d'énergie fossile (Guilyardi et al. 2019). Ces augmentations seraient à la base de l'accroissement de la température de la surface terrestre contribuant ainsi au réchauffement climatique (IPCC, 2018). La plupart des régions sont plus fréquemment exposées à des déficits hydriques (Van Leeuwen et Darriet, 2016). Selon le 5ème rapport du GIEC, la température moyenne de la Terre a subi une augmentation de 0,85°C entre 1880 et 2012. Celle-ci pourrait même dépasser 5°C à l'horizon 2100, selon le scénario le plus pessimiste (IPCC, 2014).

Les productions agricoles végétales sont très sensibles aux variations du climat, la production viticole n'y échappe pas (Duchêne, 2017) avec des effets marqués sur les rendements et la composition des raisins, et une maturation dans des conditions plus chaudes (Rapport LACCAVE, 2016). Selon les infographies publiées par l'INRA en 2018, l'augmentation de la température a entrainé une avancée de la phénologie depuis 1989 à tous les stades. Selon les scénarios les plus alarmistes, la culture de la vigne deviendrait de plus en plus difficile vers la fin du siècle dans les régions méridionales. Au cours des prochaines décennies, l'élévation de la température pourrait causer des brûlures dans certaines régions (notamment avec des augmentations du nombre de jours très chauds entre la floraison et la récolte), mais aussi affecter plus globalement la qualité des vins (INRA, 2018).

Outre le climat, la mise en valeur de la production viticole est très liée à son ancrage territorial puisque en France 59% des surfaces de vigne sont classées en Appellation d'Origine et 26% sous Indication Géographique Protégée. Les prix des vins dépendent de ces classements qui garantissent une qualité liée à l'origine et permettent des synergies avec l'œnotourisme (CNIV, 2019). De ce fait, le secteur de la Vigne et du Vin a une importance économique et culturelle majeure en France. En 2019, 4,2 milliards de litres de vin ont été produits en France, qui représentent 17% de la production mondiale. Il s'agit du 2ème producteur mondial de vin après l'Italie en volume. Et durant cette année la France a été le 1er pays exportateur de vin et eau-de-vie de vin en valeur, qui représentait 13 milliards d'€ de chiffre d'affaires (CNIV, 2020). Dans la balance commerciale, après l'aéronautique, les vins et spiritueux représentent le second poste d'exportation et premier pour le secteur agroalimentaire (Rapport LACCAVE, 2016; CNIV, 2020).

Dans le but de faire face à ce défi majeur, le programme LACCAVE 2.21 de l'INRAE se propose d'apporter plusieurs leviers d'adaptation de la viticulture au changement climatique. C'est dans cette perspective que j'ai réalisé mon stage au sein de l'UMR 1131 SVQV à l'INRAE Grand-Est de Colmar *(Annexe 1)*.

1.1. Objectifs du stage et missions

Dans un premier temps nous allons caractériser et quantifier les principales évolutions, et surtout les contraintes, qui vont apparaître dans les grands bassins viticoles français dans le futur. Dans un second temps, il s'agira d'explorer quelles caractéristiques devraient avoir des variétés de vigne pour minimiser l'impact de ces évolutions. Le travail consiste entre autres :

- À simuler, pour les principaux vignobles français, le comportement de la vigne dans le futur, en utilisant des données climatiques avec le scénario d'évolution du climat le plus pessimiste, couplées à des modèles écophysiologiques de fonctionnement de la vigne.

- À construire des génotypes virtuels de vigne en mesure d'assurer une production la plus stable possible, tant en volume qu'en qualité, dans le futur.
- À confronter les caractéristiques attendues de ces génotypes virtuels à la variabilité génétique existante.

II. État de l'art

2.1. Généralités sur la vigne

La vigne, dont le nom latin est *Vitis vinifera* Linné, fait partie du groupe euro-asiatique des vitacées. Dans ce groupe nous retrouvons un archétype, le *Vitis vinifera sylvestris* qui est la vigne sauvage et *Vitis vinifera sativa* qui est la vigne cultivée (Huglin et al., 1998). La vigne est un arbuste vivace, au feuillage caduc et aux fleurs vert pâle, de type liane sarmenteuse et grimpante, qui s'accroche à tout type de support grâce à ses vrilles. Pour atteindre la canopée, ses tiges peuvent s'élever jusqu'à six mètres de haut sans intervention de taille. Cette plante hermaphrodite est cultivée pour sa production de fruits en grappes, appelés raisins, lesquels sont consommés à l'état frais, séchés ou fermentés pour être transformés en vin. Afin de trouver un équilibre entre le rendement et la qualité de la production des fruits, elle a été domestiquée par l'homme (Nader et al., 2019). C'est aussi une plante qui résiste bien au froid, elle peut supporter des températures allant jusqu'à -20° C, mais elle ne croit ni en-dessous de 10° C, ni au-dessus de 30° C (Sun *et al.,* 2006; Limier, 2018). Dans la partie souterraine se trouve un système racinaire qui se développe de deux façons différentes: les racines superficielles qui évoluent horizontalement dans les cinquante premiers centimètres et qui puisent l'eau superficielle disponible et les éléments nutritifs, puis les racines profondes qui évoluent verticalement et qui peuvent atteindre jusqu'à dix mètres de profondeurs, servant à alimenter la vigne en eau en périodes de sécheresse car elles ont accès aux nappes phréatiques et autres sources (Sun *et al.,* 2006 ; Limier, 2018).

2.2. Les vignobles français

Les régions viticoles françaises sont classées en trois zones climatiques de maturité (frais, tempéré, chaud) dans lesquelles les variétés utilisées présentent des possibilités de maturation satisfaisante. Le choix de telle ou telle variété précoce ou tardive dépendra du climat régional et du taux de maturité à atteindre pour obtenir tel ou tel type de vin [1]. La vigne doit accumuler assez de chaleur pour que son cycle végétatif et la maturation de ses raisins se déroulent dans les meilleures conditions. C'est pour cela que les besoins thermiques spécifiques des variétés de vignes sont l'élément le plus important de leur répartition dans les différentes zones viticoles (Huglin et al., 1998) *(Tableau 1).*

Tableau 1. *Conditions climatiques des vignobles de 1958 à 1971.*

Vignoble	Tmoy (°C)	S.T°> 10°C	ETP (mm)	Précipitions annuelles (mm)	Bilan hydrique théorique (mm)	Indice Héliothermique de Huglin
Reims	15,3	958	477	598	36	1550
Angers	15,8	1069	598	600	79	1650
Dijon	16,2	1133	535	739	77	1710
Colmar	16,4	1179	592	519	-42	1730
Cognac	17,0	1282	538	812	-62	1780
Bordeaux	18,1	1480	542	814	41	2100
Montpellier	19,8	1798	960	752	-238	2250

Source : Huglin et al., 1998

[1] http://www.vinsvignesvignerons.com/Geologie/Notion-de-terroir-viticole/Facteur-climat-et-terroir-viticole

2.3. Le changement climatique en France

2.3.1. Évolution du climat

En France, la température continue d'augmenter avec un réchauffement d'environ 30% plus élevé que le réchauffement moyen planétaire (Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019). D'après les observations, il y a une augmentation significative du nombre de jours chauds et une diminution du nombre de jours froids (Moisselin et Dubuisson, 2006; Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019). En dépit de cette baisse significative et celle de la fréquence des vagues de gel, il y a eu les épisodes de gel en 2012, 2016 et 2017 qui continuent d'avoir des conséquences marquées sur la production agricole (Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019). De 1900 à 2010 la température moyenne de l'air a augmenté de 1,4ºC avec une inflexion depuis 1980 et sur la période de 1959 à 2009 les précipitations annuelles ont augmenté dans le Nord et baissé dans le Sud, mais, en été, la diminution est globale, plus marquée dans le Sud (INRAE, 2018).

2.3.2. Les projections du climat du futur

La modélisation du climat et les scénarios climatiques futurs

Pour prévoir l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur les agro-écosystèmes, les experts utilisent la modélisation. Ils font des projections: production de données climatiques du futur qui sont simulées avec un ensemble de modèles qui décrivent le fonctionnement global du climat à grande échelle, avec des mailles entre 150 et 300 km. Ces modèles utilisent les scénarios d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre du GIEC (Terray et al., 2010). La résolution spatiale étant trop faible, en 2014 Ouzeau et al. ont pu réaliser un travail de descente d'échelle servant à atteindre des résolutions plus élevées d'environ 8 à 12 km. Ceci permet aux experts de l'INRAE d'utiliser des données issues de deux modèles climatiques (IPSL-WRF et CNRM-Aladin-Climat) disponibles dans la plateforme DRIAS[2]. Ces derniers permettent de faire des simulations, servant à caractériser les conditions climatiques du futur, avec une résolution de 8 km pour tout le territoire métropolitain (Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019).

En France, selon le scénario RCP (Radiative Concentration Pathway) *(Annexe 2)* et le modèle climatique utilisé, la température augmenterait d'environ +1.5ºC (RCP2.6), +2ºC (RCP4.5) et environ +4ºC (RCP8.5) en hiver, et de 1.5ºC (RCP2.6), supérieure à 2ºC (RCP4.5) et d'environ +6ºC (RCP8.5) en été (Ouzeau et al., 2014). D'après les deux modèles français, les précipitations hivernales s'amplifieraient jusqu'à la fin du siècle tandis qu'il y aurait une tendance vers une diminution pendant l'été. La pluie, étant un phénomène discontinu, les tendances ne peuvent être évaluées que sur de très longues périodes (plusieurs décennies), donc ces prévisions sont moins fiables que celles des températures (Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019). Cependant, l'état hydrique de la vigne est déterminé autant par l'évapotranspiration que par les précipitations (Lebon et al., 2003; Van Leeuwen et Darriet, 2016). L'évapotranspiration augmente avec la température. Par conséquent, un climat plus chaud est également un climat plus sec, même si les précipitations ne diminuent pas. Le changement climatique augmentera également le rayonnement et la fréquence des événements météorologiques extrêmes (IPCC, 2014).

2.4. Phénologie de la vigne

La phénologie est l'étude des variations des phénomènes périodiques de la vie des organismes vivants, en fonction du climat. Elle fait partie des différents traits qui décrivent le fonctionnement des espèces et elle a été déterminée en tant que premier indicateur du changement climatique (Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019). Les conditions

[2] http://www.drias-climat.fr/

météorologiques, principalement la température, sont les facteurs qui pilotent les événements phénologiques. Les rythmes périodiques du monde vivant sont en train d'être bouleversés par le changement climatique. La phénologie est donc une des principales caractéristiques permettant d'évaluer la capacité adaptative des espèces aux changements climatiques. L'observation de l'évolution des stades phénologiques sur différentes espèces permet de mesurer l'ampleur du changement climatique et d'évaluer ses conséquences à moyen terme sur le développement des plantes, leur croissance et/ou la qualité des fruits.
Les principaux stades phénologiques *(Annexe 3)* :

- Débourrement – Apparition de pointes vertes ou rouges du bourgeon à la fin de la période post-dormance (Huglin et al., 1998 et Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019).
- Floraison – Suite au débourrement, il y a apparition rapide des inflorescences au sommet des pousses entre les premières feuilles, puis ouverture des fleurs, qui marque le début de la phase reproductive (Huglin et al., 1998).
- Véraison – Période de ralentissement de croissance, de courte durée, marquée par un changement de couleur des baies pour atteindre leur couleur spécifique, rouge ou translucides pour les raisins blancs[3].

Deux autres stades peuvent être ajoutés à liste:

- La levée de dormance qui n'est pas observée directement sur le terrain, mais seulement sur des boutures en chambre de forçage.
- La vendange qui n'est pas considéré comme un stade phénologique en tant que tel, puisqu'il est décidé par des critères techniques qui varient selon la région, la variété et le vin recherché (Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019).

2.5. Impacts du changement climatique sur la vigne

Depuis 1989, l'augmentation de la température a conduit à des avancées à tous les stades phénologiques dans toutes les régions viticoles (INRAE, 2018; Van Leeuwen et al., 2019). Selon l'étude du projet CLIMATOR, l'ensemble des stades de développement serait avancé de 20 à 40 jours, entre le passé récent et la fin du 21^{e} siècle (Pieri, 2010). En Alsace, des observations sur la période de 1950 à 2019, montre que le débourrement a avancé de 10 jours, la floraison de 23 jours, la véraison de 39 jours et la récolte de 25 jours (Van Leeuwen et al., 2019). Ces effets font que les raisins arrivent à maturité dans des conditions plus chaudes (Van Leeuwen et Darriet, 2016; Van Leeuwen et al., 2019), ce qui va faire sortir les variétés locales de leur plage de maturation idéale (Lereboullet et al., 2014). La phénologie varie d'une variété à l'autre (Parker et al., 2013) et c'est en fonction de cela que les variétés ont été historiquement sélectionnées pour être les plus performantes dans un vignoble donné (Van Leeuwen et al., 2019).

Sachant que les raisins sont naturellement acides et sucrés, le rapport acides/sucres est primordial pour l'équilibre, la structure et la conservation des vins (INRAE, 2018). Des observations montrent que la teneur en sucre augmente avec la température (Lereboullet et al., 2014). Des métabolites secondaires comme les anthocyanes sont affectés négativement par une température élevée. Tandis que l'acidité du raisin, particulièrement la teneur en acide malique diminue et la teneur en alcool des vins augmente à haute température. Ces modifications ont des effets sur la qualité des raisins qui deviennent moins aromatiques, accompagnées d'apparition de composés spécifiques (Van Leeuwen et Darriet, 2016; INRAE, 2018 ; Van Leeuwen et al., 2019). Le débourrement est aussi exposé plus fréquemment aux risques de gel printanier, lesquels dépendent des conditions climatiques de chaque région viticole spécifique et qui peuvent causer des dégâts sur la vigne (Van Leeuwen et al., 2019).

[3] https://www.oenologie.fr/vigne/cycles/cycle_home.shtml

Avec le changement climatique, les vignes sont de plus en plus exposées à un stress hydrique, soit à cause d'une diminution des précipitations, soit à cause d'une évapotranspiration plus élevée du fait de l'augmentation de la température. Un stress hydrique peut engendrer une baisse des rendements car il réduit la taille des baies et influence la fertilité des bourgeons. De plus, un stress hydrique exagéré peut engendrer des dégâts sur les feuilles et empêcher la maturation du raisin. En outre, des observations montrent qu'un déficit hydrique modéré a un effet positif sur la qualité du vin rouge car il y a une augmentation des composés phénoliques de la pellicule du raisin et un développement plus complexe des arômes au cours du vieillissement en bouteille. Mais pour les vins blancs, seuls les déficits hydriques très faibles sont positifs pour la qualité du vin, les déficits plus élevés sont néfastes. Tant que l'eau n'est pas un facteur limitant, la photosynthèse de la vigne augmente avec l'intensité de la lumière puis se stabilise. Des résultats ont montré que la quantité d'anthocyanes dans la peau du raisin augmente avec la lumière mais est affectée négativement par une température élevée (Van Leeuwen et Darriet, 2016; Van Leeuwen et al., 2019).

Des experts de l'INRAE de Colmar ont déjà étudié les effets du changement climatique sur les variétés Riesling et Gewurztraminer en Alsace. Comme mesures d'adaptation, ils ont proposé de créer des génotypes à maturation très tardive ou capables de produire des vins de haute qualité sous des températures élevées (Duchêne et Schneider, 2005; Duchêne et al., 2010).

2.6. Concept d'idéotypes de plantes

Ce concept proposé par les écophysiologistes représente une plante idéale (génotype virtuel) portant un ensemble de caractères qui lui confère la meilleure possibilité d'adaptation au système agricole considéré. C'est la définition d'une plante modèle pour un environnement et des objectifs donnés puis la sélection sur les différents caractères de cette plante modèle « ideotype breeding » (Donald, 1968). Historiquement, ce concept a été initié pour orienter un programme de sélection, par la suite son utilisation a été entendue au choix variétal (Debaeke et al., 2014).

III. Matériels et méthodes

3.1. Sources de données climatiques

Les données climatiques sont de deux types : données climatiques de référence observées et données climatiques simulées.

3.1.1. Données climatiques de référence observées de 1986 à 2015

SAFRAN est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface. Développé par Météo-France, il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire des variables climatiques (listées ci-dessous), elles sont analysées par pas de 300 m d'altitude et sont ensuite interpolées sur une grille de calcul régulière (8km x 8 km)[4].

Nous avons utilisé la période de 1986 à 2015 comme référence et les données SAFRAN de Météo-France[5], disponibles dans la base de données de l'unité INRAE AgroClim, sur des mailles des principaux vignobles citées dans le *tableau 1* à l'échelle de 8 km par 8 km. Ce sont des données météorologiques journalières historiques disponibles dans l'application INRAE SICLIMA depuis le 1er janvier 1959 jusqu'à la dernière année civile complète.

[4] https://siclima.intranet.inrae.fr/siclima/help/extraction.html et http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/165

[5] https://www6.paca.inrae.fr/agroclim/Demande-des-donnees-de-Meteo-France/SAFRAN-SICLIMA

3.1.2. Données climatiques simulées de 1986 à 2100

Les simulations sont réalisées avec les données disponibles à l'unité INRAE AgroClim issues de la plateforme DRIAS en utilisant les deux modèles climatiques français *Aladin-Climat* du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) et *WRF* de l'Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL), toujours avec l'application SICLIMA. Ce sont des données de projections climatiques simulées au pas de temps journalier, sur une grille spatiale (8km x 8km) et sont de deux types:

- Les données de « *Référence* » (passé, depuis 1950) qui sont modélisées par les modèles climatiques, c'est pourquoi elles sont différentes des données historiques SAFRAN sur la même période[6] ;
- Les données du *« Futur »*, qui sont simulées (jusqu'en 2100) avec trois scénarios futurs d'émission RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5, scénarios publiés dans le rapport du GIEC en 2014[7].

Afin de prendre en compte l'hypothèse d'évolution des conditions climatiques la plus pessimiste, nous avons utilisé les données du scénario RCP 8.5. En vue de s'assurer que les mailles des données simulées soient similaires aux données observées, les correspondances des mailles de données SAFRAN avec DRIAS *(tableau 4)*, à la même échelle de 64 km^2, ont été utilisées. Les simulations commencent en 1986, puis s'étalent jusqu'en 2100 en utilisant 3 périodes :

- Présent (1986-2015), période de référence permettant de faire la comparaison avec les données historiques observées (SAFRAN)
- Futur proche (2031-2060)
- Futur lointain (2071-2100)

Les variables climatiques suivantes ont été utilisées pour les mailles présélectionnées (SAFRAN et DRIAS)[8] :

- Température moyenne, température maximale et température minimale (^{o}C)
- Evapotranspiration potentielle (mm)
- Précipitations liquides (mm)
- Rayonnement visible (J/cm^2 : SAFRAN et W/m^2 : ALADIN) (non disponible pour IPSL)

3.2. Vignobles retenues pour l'étude climatique

L'étude a été réalisée sur neuf mailles (*figure 1*) choisies parmi les principaux vignobles français. Ces mailles ont été choisies en fonction de la surface cultivée en vigne (surface supérieure à 5%) et de leur proximité avec une station météorologique AgroClim. Ces informations ont été recueillies dans la base de données d'AgroClim INRAE. Le *tableau 2* présente les coordonnées géographiques de chacune de ces mailles ainsi que les variétés retenues pour chacune d'entre elles.

[6] https://siclima.intranet.inrae.fr/siclima/help/extraction/notes/notes_base_vars.html
[7] http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/175
[8] https://siclima.intranet.inrae.fr/siclima/help/extraction/notes/notes_base_vars.html#identifiants-des-bases-mod%C3%A8les-et-sc%C3%A9narios

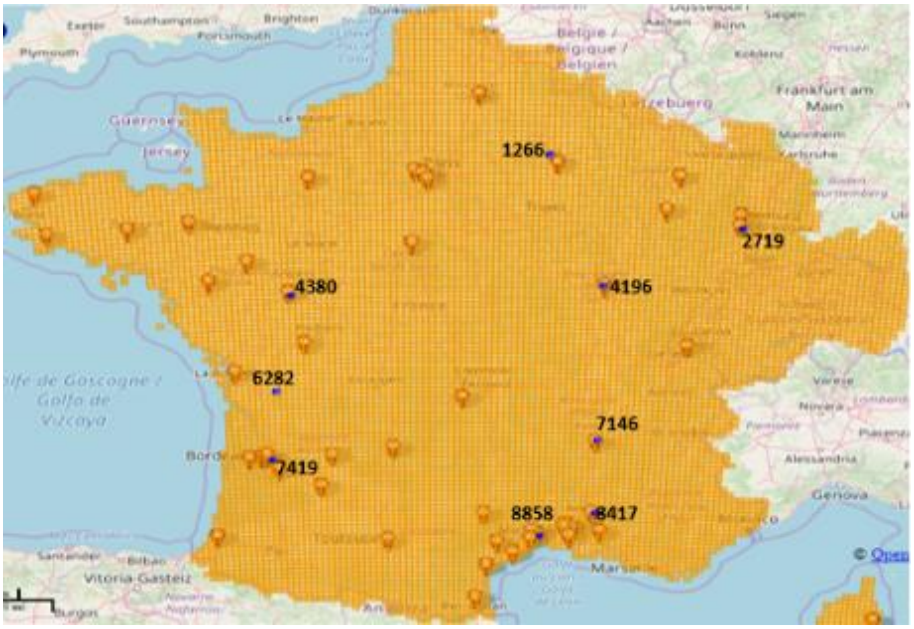


***Figure 1**: Localisation des mailles des vignobles sélectionnées (source: INRAE Avignon[9]).*

***Tableau 2.** Caractéristiques des mailles et variétés retenues.*

Régions	**Mailles**		**Latitude (º Nord)**	**Longitude (º Est)**	**Altitude (m)**	**% superficie vignoble**	**Variétés**
	SAFRAN	**DRIAS**					
Colmar	2719	13270	48,0419	7,1985	195	27,11	Riesling
Vallée du Rhône	7146	7100	45,0308	4,5554	172	5,48	Syrah
Angers	4380	11198	47,0853	-0,0855	46	10,47	Merlot
Reims	1266	14954	49,0171	3,5531	126	24,64	Chardonnay
Avignon	8417	4955	43,5837	4,5259	32	11,35	Syrah et Grenache
Montpellier	8858	4231	43,3783	3,582	28	17,59	Syrah et Grenache
Bordeaux	7419	6475	44,4553	-0,2647	62	31,08	Cabernet-sauvignon et Merlot
Dijon	4196	11533	47,1687	5,0202	238	5,25	Chardonnay
Cognac	6282	8478	45,4609	-0,2336	33	44,08	Ugni blanc

3.3. Choix des variétés et exigences des variétés de l'étude

Les variétés ont été choisies en fonction de leur ancrage géographique et dans le but de couvrir une grande diversité des vignobles français (*tableau 2).*

Pour étudier la corrélation entre les sommes de températures et les teneurs en sucres des raisins sur une période de six mois, les chercheurs ont mis au point l'Indice Héliothermique de Huglin. Le tableau ci-dessous reprend les caractéristiques des variétés, pour atteindre un taux de sucre de l'ordre de 180-200 g/l suivant les rendements et les systèmes de conduite. (Huglin et al., 1998) *(Tableau 3).*

[9] http://w3.avignon.inra.fr/geoserver/www/get_safran_number.html

Tableau 3. *Valeurs de l'Indice Héliothermique de Huglin pour les variétés retenues.*

Variétés	Indice Héliothermique de Huglin
Chardonnay, riesling	1700
Cabernet-sauvignon, merlot	1900
Ugni blanc	2000
Grenache, syrah	2100

Source : Huglin et al., 1998

3.4. Modèles de prévision de la phénologie

Les estimations ont été faites pour trois stades clés du développement de la vigne: le débourrement, la floraison et la véraison en suivant la démarche proposée par Morales-Castilla et al. (2020). Le stade de débourrement a été simulé à l'aide d'un modèle séquentiel combinant le modèle Smoothed-Utah (Richardson, 1974), qui simule la rupture de la dormance (accumulation d'unités de refroidissement) et le modèle de Wang et Engel (Wang et Engel, 1998), qui simule la phase post-dormance jusqu'au débourrement. Ensuite, le modèle de Wang et Engel a été utilisé pour simuler l'accumulation d'unités de forçage jusqu'à la floraison, et après la floraison, il a été utilisé pour simuler l'accumulation d'unités de forçage jusqu'à la véraison. La structure curviligne des modèles Smoothed-Utah et Wang et Engel reproduit l'effet connu d'un ralentissement du développement à des températures élevées *(Annexe 4)*.

Le modèle Smoothed-Utah suppose que le refroidissement ne peut se produire que dans une plage de températures donnée, et permet un refroidissement négatif les jours chauds. Le modèle de Wang et Engel appartient à la famille des fonctions bêta et est asymétrique. Dans cette approche de modélisation, les seuils pour les températures minimales et maximales (Tmin à 0°C et Tmax à 40°C pour le modèle de Wang & Engel) ont été fixés en fonction de seuils physiologiques sur la vigne et d'autres espèces. Les valeurs de Tmax comprises entre 35 et 40°C sont courantes dans la littérature qui montre souvent une réduction drastique de l'activité photosynthétique au-dessus de 40°C, et donc du développement phénologique. Les modèles phénologiques, en s'appuyant sur des paramètres de seuil tels que Tmin, Tmax et Topt, peuvent prévoir des réponses différentes au-dessus et en dessous des seuils (par exemple, les unités de forçage sont accumulées à Tmax de 39,9 mais pas à 40,1°C) (Morales-Castilla et al., 2020).

Cependant, les recherches sur la physiologie du raisin à vin semblent confirmer l'existence de seuils de température au-dessus desquels les dommages peuvent être trop importants pour le développement ultérieur de la plante. Au fur et à mesure que de nouvelles données seront disponibles, il sera intéressant de voir comment les modèles phénologiques prennent en compte l'incertitude autour de leurs paramètres de seuil (Morales-Castilla et al. en 2020). Alors que Tmin, Topt et Tmax ont été ajustés ou fixés au niveau de l'espèce, les seuils cumulés de refroidissement (C) et de forçage (F) correspondant à chaque stade phénologique et ont été paramétrés au niveau de la variété (*tableaux 4 et 5*) *(voir Annexe 5 pour la description)*.

Tableau 4. *Paramétrage des modèles phénologiques séquentiels de la dormance au débourrement (Smoothed-Utah, SU), à la floraison et à la véraison (Wang et Engel, WE).*

Modèle SU	Valeurs SU	Modèle WE	Valeurs DB	Valeurs DB.FL	Valeurs FL.VER
Tm1	-6,7	**Tmin**	0	0	0
Topt	7,94	**Topt**	27,5	30,8	25
Tn2	40,58	**Tmax**	40	40	40
Min	-0,17				

Source : données fournies par l'unité AgroClim INRAE

Tableau 5. *Paramètres des besoins en froid (C) et de forçage (F), utilisés comme seuils au-dessus desquels un stade phénologique donné est atteint, de la dormance au débourrement (C_DB et F_DB), du débourrement à la floraison (F_DB-FL) et de la floraison à la véraison (F_FL-VER).*

Variétés	C_DB	F_DB	F_DB-FL	F_FL-VER
Cabernet-Sauvignon	104,034	18,246	17,121	61,027
Chardonnay	99,319	15,868	15,87	59,164
Chasselas	135,44	13,57	17,8	49,71
Grenache	69,91	21,06	18,04	64,12
Merlot	103,08	16,08	17,88	60,52
Mourvèdre	95,68	19,96	20,94	60,54
Pinot noir	163,27	11,86	15,78	54,73
Riesling	107,19	15,4	15,9	59,05
Sauvignon	120,11	14,81	18,33	55,33
Syrah	71,529	20,339	17,406	57,309
Ugni blanc	127,53	18,43	17,76	62,67

Source : données fournies par l'unité AgroClim INRAE

Nous avons calculé les stades de débourrement, floraison et véraison dans l'application SICLIMA *(voir la section suivante)* pour les variétés Cabernet-Sauvignon, Chardonnay et Syrah. Pour les autres variétés, les données climatiques de SICLIMA nous ont permis de simuler les différents stades phénologiques avec le logiciel PMP[10]. Enfin, la maturité a été calculée en ajoutant 40 jours à la date de véraison.

3.5. Outils utilisés

Dans le cadre de cette étude, les logiciels suivants, développés par l'Unité AgroClim d'INRAE, ont été utilisés :

1) SICLIMA, application en ligne de l'INRAE qui contient deux fonctions :

- *Extraction de données*, à travers laquelle nous pouvons choisir un ensemble de données météorologiques quotidiennes et préparer des fichiers climatiques par maille;
- *Calculs d'indicateurs,* celle-ci permet de calculer des indicateurs agro-climatiques et éco-climatiques à partir de données maillées choisies dans la partie « extraction de données ».

Actuellement, SAFRAN et DRIAS sont les deux bases de données climatiques journalières produites par Météo-France qui couvrent la France Métropolitaine. Ces données sont maillées à une résolution de 8 km x 8 km.

2) PMP version 5.5, logiciel de modélisation biophysique qui permet de calculer des dates de stades phénologiques des plantes à partir :

- Des données météorologiques quotidiennes maillées téléchargées depuis SICLIMA pour les vignobles concernés ;
- Des modèles phénologiques pour les principales variétés proposées par Morales-Castilla et al. (2020)

3) GETARI, logiciel INRAE libre, qui permet de calculer les indicateurs éco-climatiques pour une culture donnée et un lieu donné. Les indicateurs sont calculés pour différents stades de développement. Pour faire les calculs, deux types de données sont utilisés :

- Données météorologiques quotidiennes maillées téléchargées sur SICLIMA ;

[10] https://www.cefe.cnrs.fr/fr/recherche/ef/forecast/phenology-modelling-platform

- Données phénologiques calculées préalablement sur PMP[11]

Enfin, le logiciel R Studio et Excel ont été utilisés pour traiter les données. Et pour évaluer la précision et la performance du modèle, nous avons calculé :
1) l'erreur quadratique moyenne (RMSE), qui donne le nombre de jours où les prévisions s'écartent de la moyenne observée (ainsi, la RMSE = 0 correspondrait à un ajustement parfait).
2) l'efficacité du modèle (EFF) fournit une estimation de la variance des observations expliquées par le modèle. Si EFF = 0 ou moins, le modèle n'explique aucune variation (*voir Annexe 6 pour les formules*).

3.6. Calcul des indicateurs éco-climatiques

Dans le but d'évaluer les effets des variables météorologiques sur la vigne pour les mailles présélectionnées, des indicateurs écoclimatiques ont été calculés pour les différentes phases phénologiques. Un modèle de prévision de la phénologie a été utilisé pour ces périodes : du débourrement à la floraison (S2S3), de la floraison à la véraison (S3S4), de la véraison à la vendange[12] (S4S5) du débourrement à la vendange (S2S5). Les indicateurs utilisent les principales variables climatiques (température, pluie, radiation solaire…) (*Tableau 6*).

Tableau 6. *Liste des indicateurs calculés. S2 = débourrement, S3 = floraison, S4 = véraison, S5 = vendange*

Phase	**Indicateur**	**Description**	**Variable utilisée**
S2S3	Jours froids Tmin	Nombre de jours de gel (Tmin < 0 °C)	Tmin
S3S4, S4S5 et S2S5	Rayonnement cumulé	Rayonnement cumulé (joule/cm² ou W/m²)	Radiation
S4S5	Moyenne des températures maximales	Moyenne des températures maximales pour chaque phase de développement	Tmax
S4S5 et S2S5	Moyenne des températures moyennes	Moyenne des températures moyennes pour chaque phase de développement	Tmean
	Somme des pluies	Cumul des précipitations	Pluie
S2S5	Déficits hydriques	Pluviométrie moins l'évapotranspiration potentielle	Pluie et ETP

IV. Résultats

4.1. Évaluation du modèle de prévision des stades de développement

Pour vérifier la pertinence du calcul des différents stades phénologiques, nous avons procédé à la comparaison des stades phénologiques calculés avec les données SAFRAN de 1986 à 2015 (débourrement, floraison et véraison) pour la variété Riesling dans la zone de Colmar avec les données observées sur le terrain pour la même variété et pour la même période. Les résultats montrent que les dates sont relativement proches *(Figure 2)*, un peu moins pour le débourrement par rapports aux deux autres. Par contre le modèle semble moins cohérent pour le débourrement, car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est nettement plus élevée et l'efficacité est de 26% alors qu'elle était de 75% dans l'étude de Duchêne et al. en 2010.

[11] https://www6.paca.inrae.fr/agroclim/Les-outils
[12] Véraison +40 jours

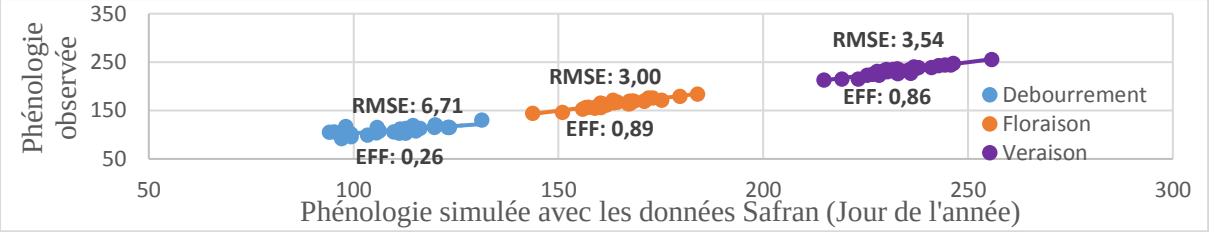


Figure 2: *Comparaison entre les dates simulées et observées sur la période 1986-2015 pour la variété Riesling à Colmar.*

4.2. Validation des données simulées

Afin de vérifier la cohérence des indicateurs calculés avec les modèles CNRM et IPSL pendant les phases phénologiques, nous avons évalué leurs tendances par rapports aux données de référence SAFRAN. Ainsi nous présentons la moyenne des températures moyennes pour les phases S2S3, S3S4 et S4S5 et la somme des précipitations sur tout le cycle végétatif (S2S5) avec les 12 combinaisons mailles x variétés. Globalement, les températures simulées à partir des modèles coïncident avec les données de référence. Mais, nous observons que les températures simulées avec le modèle IPSL sont toujours un peu plus froides et que les deux modèles sous-estiment les températures entre débourrement et floraison (S2S3) *(Figure 3).*

La simulation de la pluviométrie avec les modèles parait globalement cohérente par rapport aux données de référence SAFRAN. Nous devons tout de même signaler une surestimation avec les modèles. Par contre le modèle CNRM parait plus cohérent dans les basses pluviométries, contrairement au modèle IPSL qui semble plus cohérent avec les plus fortes pluviométries *(Figure 4).*

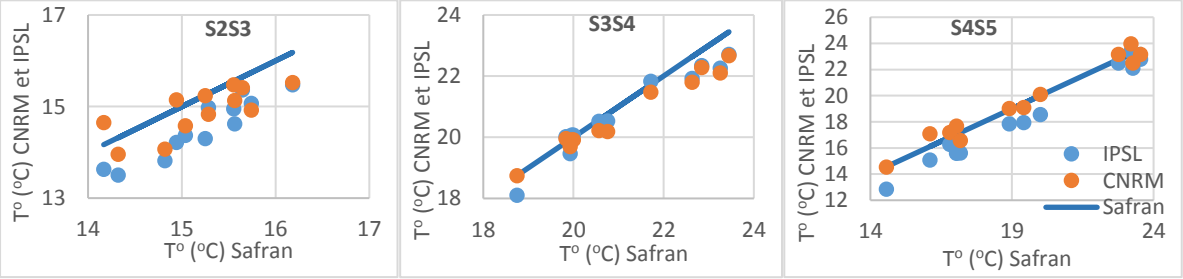


Figure 3: *Comparaison de la moyenne des températures moyennes (°C) simulées sur les trois phases de développement de la vigne pour la période 1986-2015 avec les modèles IPSL, CNRM et les données SAFRAN.*

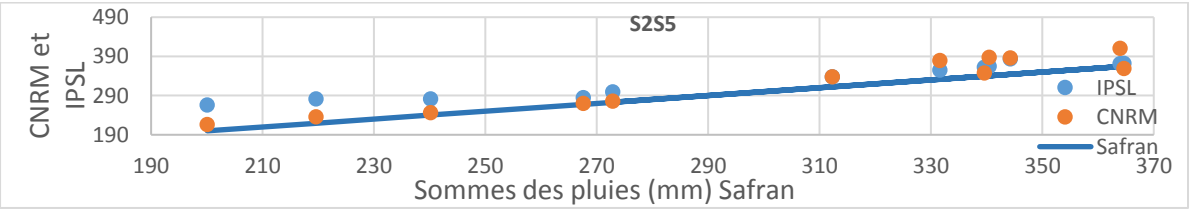


Figure 4: *Comparaison du cumul de pluviométrie (mm) simulée sur le cycle végétatif de la vigne pour la période 1986-2015 avec les modèles IPSL, CNRM et les données SAFRAN.*

4.3. Évaluation climatique dans le futur

Dans cette partie, nous allons analyser les conditions climatiques futures des vignobles concernés par l'étude avec les données DRIAS. Ces données nous permettrons d'avoir une idée des évolutions possibles du climat dans le futur selon le scénario climatique le plus pessimiste (RCP 8.5). Nous allons nous intéresser aux évolutions moyennes des différents facteurs

(phénologie et indicateurs) sur deux périodes (2031-2060 et 2071-2100) comparées avec la période de référence (1986-2015).
En effet, nous allons nous intéresser à l'évolution :

- De la phénologie de la vigne pour les 12 combinaisons mailles x variété
- Des indicateurs écoclimatiques calculés pour trois phases phénologiques d'intérêt

À noter que delta est la différence entre les périodes du futur et la période de référence.

4.3.1. Évolution de la phénologie en fonction des différents modèles

Les *figures* 5, 6 et 7 montrent l'évolution des différents stades simulés dans le futur en fonction du scénario RCP 8.5 pour les deux modèles du climat français et en fonction des mailles. De façon générale nous observons des avancements à tous les stades, encore plus prononcés à la fin du siècle.

À l'exception du débourrement de la variété Ugni blanc à Cognac qui ne présente aucune avancée même à la fin du siècle et Merlot à Bordeaux à l'horizon de 2060 avec le modèle CNRM, ce modèle prévoit des avancées dans toutes les autres mailles, allant de 1 à 12 jours à l'horizon de 2060 et de 3 à 23 à la fin du siècle. Une observation presque similaire avec le modèle IPSL, qui ne présente aucune avancée pour les variétés Merlot à Angers et à Bordeaux, Cabernet-Sauvignon à Bordeaux et Ugni blanc à Cognac à l'horizon de 2060.

Pour la floraison, les résultats montrent un avancement respectif de 5 à 10 jours et de 15 à 25 jours, à l'horizon de 2060 et à la fin du siècle, assez uniforme quelles que soient les régions. Cet avancement est généralement plus marqué avec le modèle CNRM dans le futur proche. Les dates de véraison suivent la même tendance, avec un effet légèrement accentué dans les vignobles du Nord dans un futur lointain (v*oir Annexe 7 pour les symboles*).

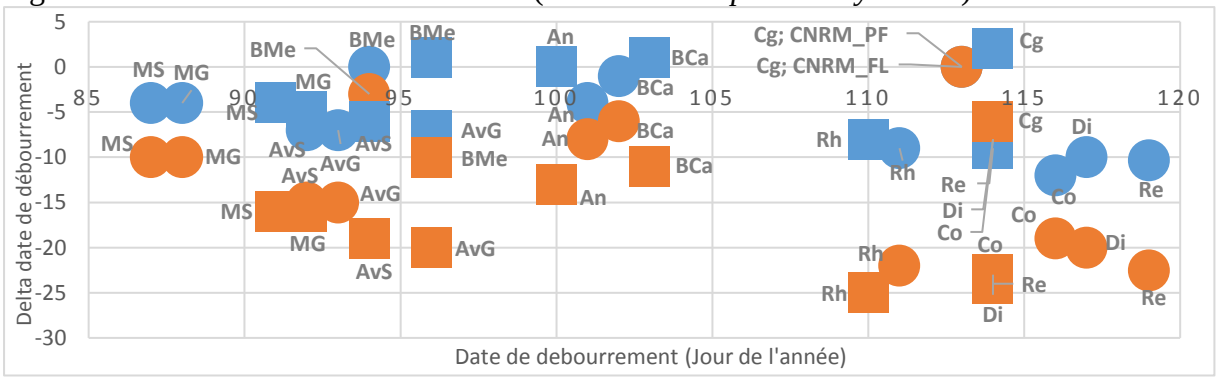


Figure 5: *Évolution des dates de débourrement à partir du 1er Janvier simulées sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015.*

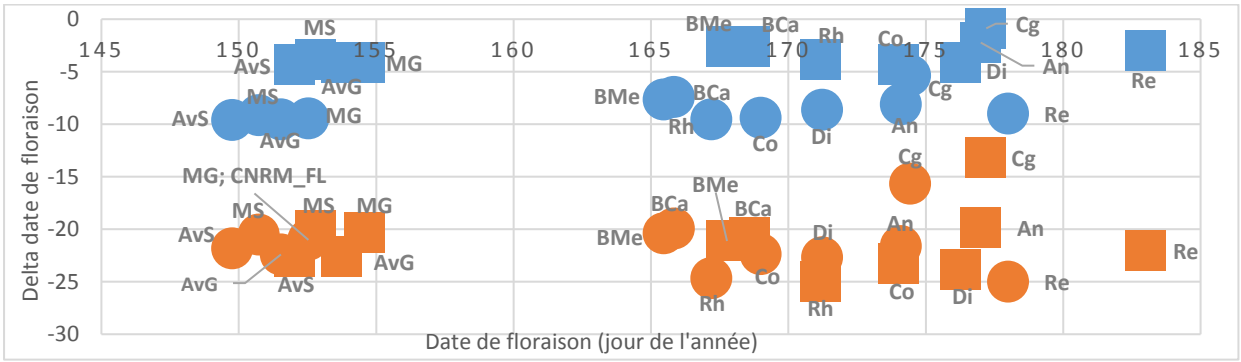


Figure 6: *Évolution des dates de floraison à partir du 1er Janvier, simulées sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015.*

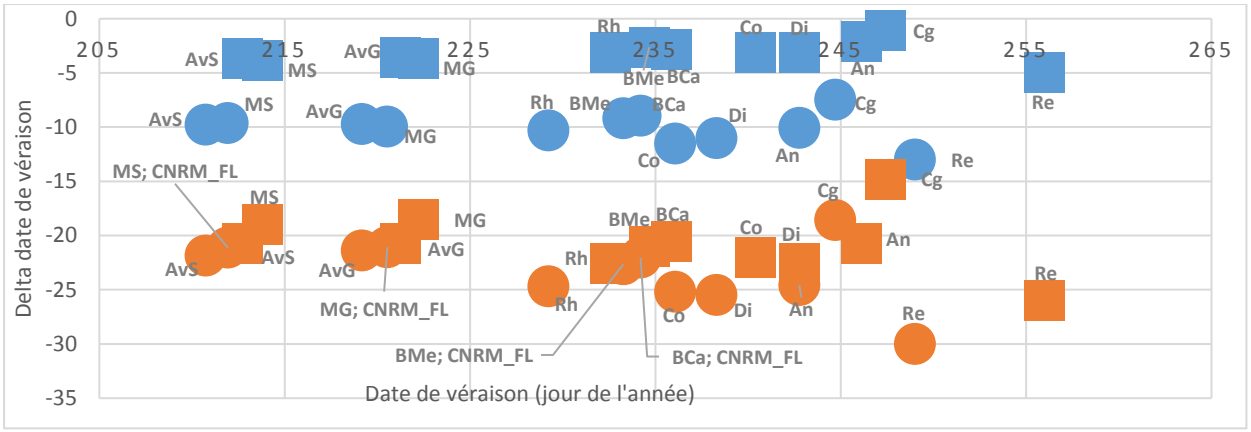


Figure 7: *Évolution des dates de véraison à partir du 1er Janvier simulées sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015.*

CNRM_FP CNRM_FL IPSL_FL IPSL_FP

Légende 1: Représentation des indications des différentes figures

4.3.2. Évolution des indicateurs écoclimatiques

Dans cette partie, nous allons analyser les différents indicateurs écoclimatiques choisis en fonction des stades phénologiques.

- **Débourrement-floraison**

- **Évolution du nombre moyen de jours de gel par an**

Les résultats de la *figure 8* montrent qu'une baisse du nombre de jours de gel après le débourrement n'est pas systématique. A notre grand étonnement, nous observons une légère augmentation du nombre moyen de jours de gel par an dans la zone méditerranéenne avec les variétés Syrah et Grenache avec le modèle IPSL à l'horizon de 2060. La même tendance est aussi observée à Colmar, Reims et Dijon avec leur variété correspondante mais cette fois-ci avec le modèle CNRM *(voir Annexe 8)*.

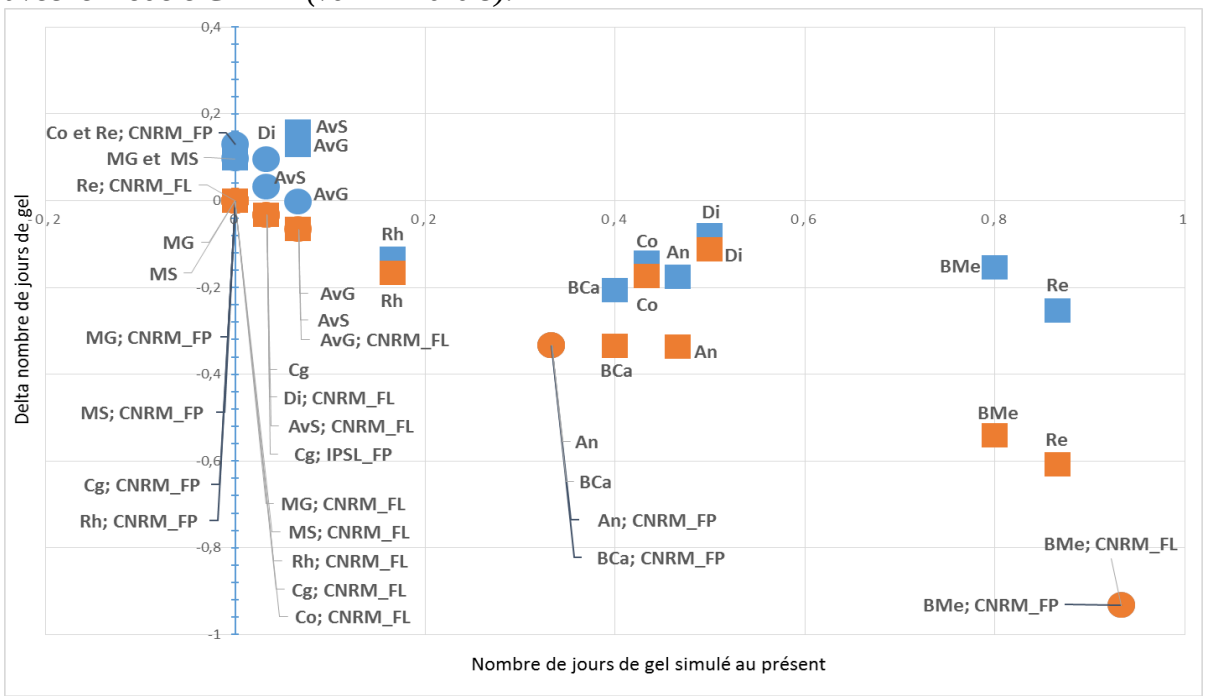


Figure 8: *Évolution du nombre moyen de jours par an de gel simulés durant la phase débourrement-floraison sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015.*

- **Floraison-véraison**

- **Évolution du cumul de rayonnement**

La *figure 9* montre que le rayonnement sera globalement plus élevé dans le futur sur la période floraison-véraison, avec un effet plus marqué dans le Nord de la France par rapport au présent et à la fin du siècle ; à l'exception des variétés Syrah et Grenache à Avignon et à Montpellier qui ne présentent que très peu de variation respectivement, dans le futur lointain par rapport au présent, et dans le futur lointain comparativement au futur proche.

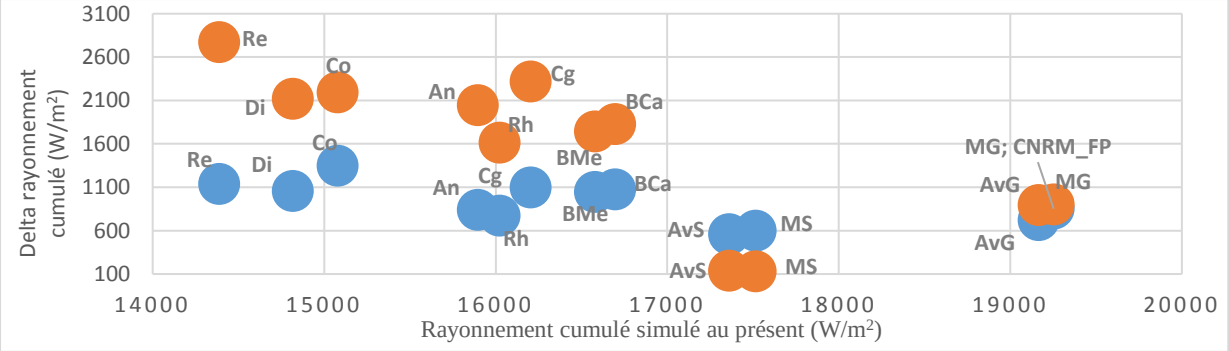


Figure 9: *Évolution du cumul de rayonnement simulé durant la phase floraison-véraison sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015.*

- **Véraison-vendange**

- **Évolution des indicateurs de température**

Nous analysons ici, les indicateurs de température pour la période « véraison-vendange », du fait qu'elle serait la plus affectée par l'augmentation des températures et l'avancement de cette phase vers les périodes les plus chaudes de l'été.

Les résultats des *figures 10 et 11* montrent une augmentation des températures moyennes et maximales dans le futur dans les mailles des vignobles sélectionnés. À la fin du siècle les évolutions seront encore plus élevées ; elles pourraient varier de +5 à +10°C (contre de +2 à 4°C à l'horizon de 2060) avec le modèle CNRM et de +4 à 6°C (contre de +1 à +2°C à l'horizon de 2060) avec le modèle IPSL. La tendance générale continue de montrer des variations plus marquées dans les vignobles du Nord de la France.

La *figure 10.1* montre la variabilité de l'évolution de la température moyenne sur trois zones représentatives du Nord au Sud, selon l'évolution du climat. Certes, la température augmentera, mais avec plus de variabilité dans le futur, qui pourrait représenter un plus grand inconvénient pour les variétés, puisque c'est moins stable autour de la moyenne, et la température la plus élevée peut s'avérer beaucoup plus néfaste pour la culture.

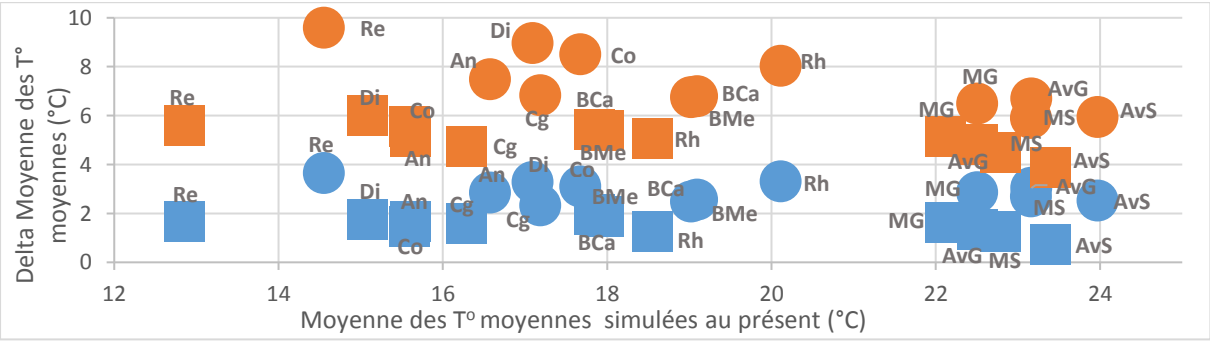


Figure 10 : *Évolution de la moyenne des températures moyennes simulées durant la phase véraison-vendange sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015.*

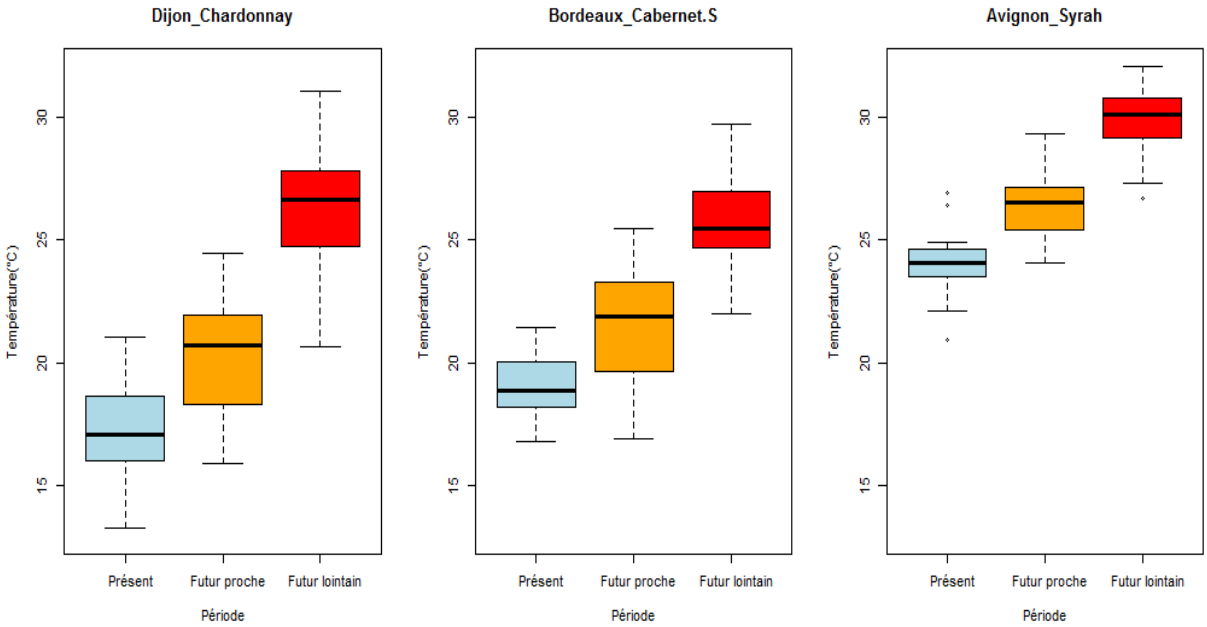


Figure 10.1 : *Variabilité de l'évolution de la moyenne des températures moyennes.*

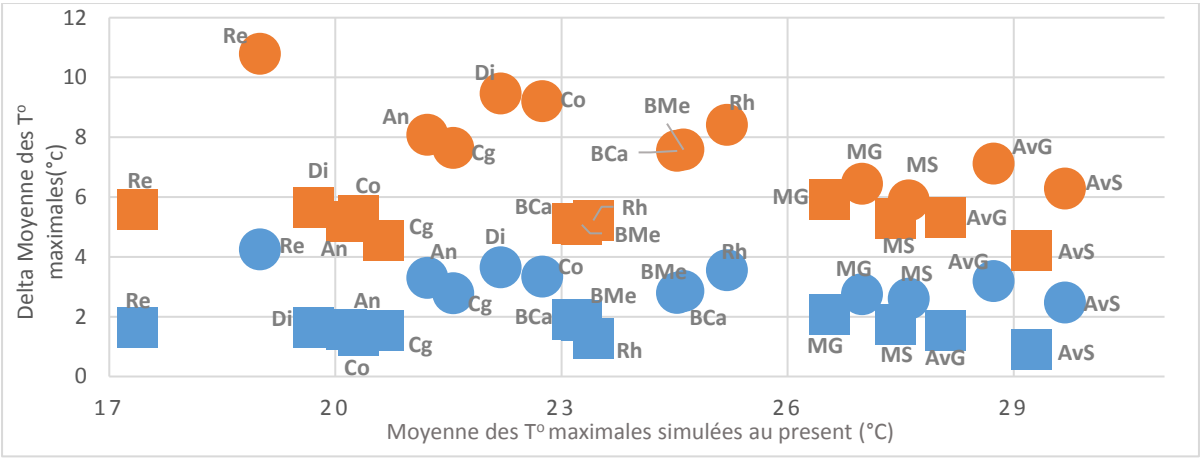


Figure 11: *Évolution de la moyenne des températures maximales simulées durant la phase véraison-vendange sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015.*

- **Évolution des précipitations**

La tendance de l'évolution des précipitations estivales (période de maturation) parait très contrastée entre les deux modèles, puisque le modèle CNRM prévoit une diminution dans tous les vignobles, l'écart est encore plus marqué à la fin du siècle dans le Nord de la France par rapport à la Méditerranée. Tandis que le modèle IPSL prévoit qu'il y aurait des augmentations plus élevées à la fin du siècle, de l'ordre de 30 à 40 mm de plus à Colmar, Bordeaux et Cognac (contre 2 à 18 mm à l'horizon de 2060). Cette même tendance est aussi observée à Dijon avec près de 12 mm de plus à la fin du siècle contre 2 mm à l'horizon de 2060. Mais pour Reims et Angers, c'est plutôt le contraire, du fait que les augmentations sont plus élevées (environ 10 mm) dans le futur proche avec le modèle IPSL. Et à la fin du siècle, pour ces deux vignobles, il n'y a qu'à Reims que nous observons une légère augmentation de 2 mm de pluie de plus *(Figure 12).*

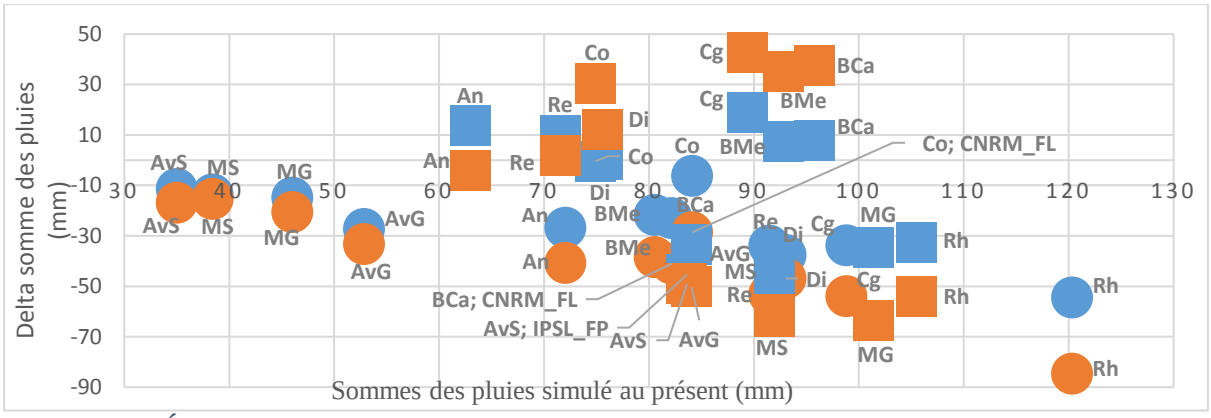


Figure 12: *Évolution du cumul de pluviométrie simulée durant la phase véraison-vendange sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparée avec la période 1986-2015.*

- **Évolution du cumul de rayonnement**

La *figure 13* montre également que le rayonnement augmentera dans le futur dans tous les vignobles, encore plus accentuée à la fin du siècle. La tendance continue de montrer un plus grand écart par rapport au présent dans le Nord comparativement à la Méditerranée. *(voir Annexe 9 pour voir son évolution sur tout le cycle).*

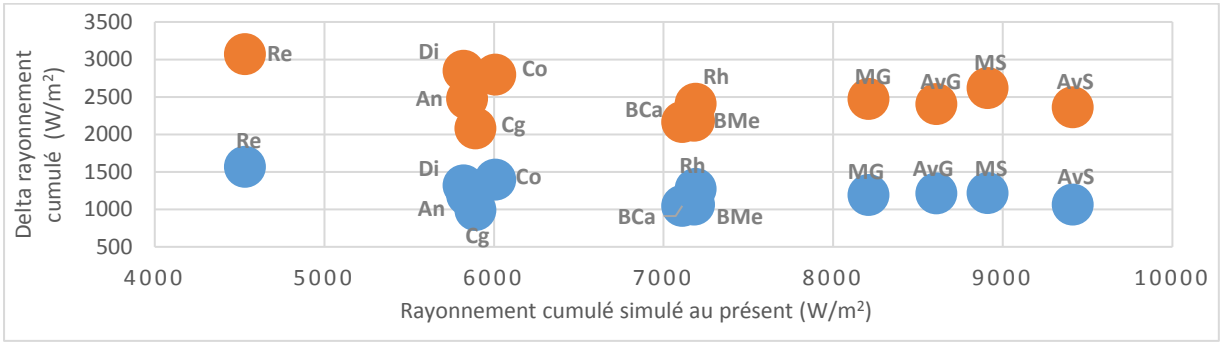


Figure 13: *Évolution du cumul de rayonnement simulé durant la phase véraison-vendange sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparé avec la période 1986-2015.*

- **Débourrement-vendange**
- **Évolution des températures moyennes**

Globalement, les résultats de la *figure 14* nous montrent que la température sera beaucoup plus élevée dans le futur durant tout le cycle végétatif de la vigne. L'évolution serait encore plus élevée avec le modèle CNRM et à la fin du siècle. Avec des exceptions à Colmar, Dijon, à Reims et à Rhône, qui ne montrent aucune variation avec le modèle IPSL à l'horizon de 2060.

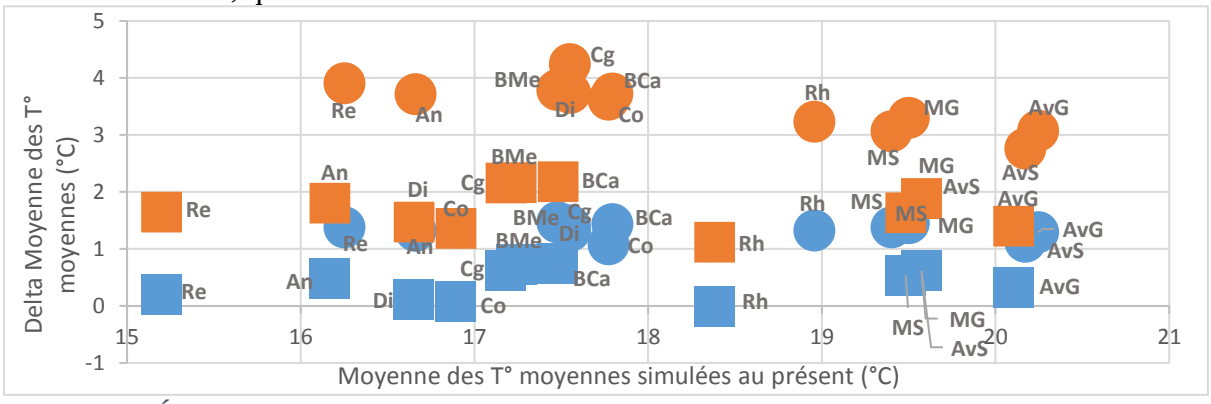


Figure 14: *Évolution de la moyenne des températures moyennes simulées durant le cycle sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015.*

- **Évolution des précipitations**

La *figure 15* nous montre que le modèle CNRM prévoit globalement une diminution de la pluviométrie durant tout le cycle végétatif de la vigne dans le futur, encore plus marquée à la fin du siècle, sauf à Colmar où nous observons une augmentation des précipitations de plus de 30 mm à l'horizon de 2060. Mais nous remarquons également que la zone méditerranéenne serait moins affectée par cette diminution.

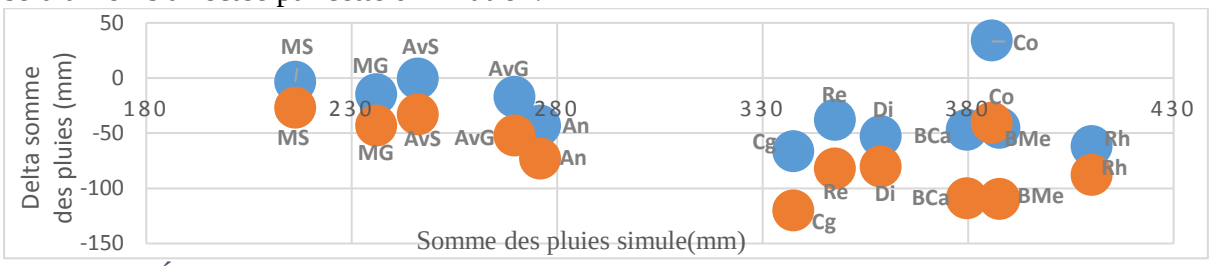


Figure 15: *Évolution du cumul de pluviométrie simulée durant le cycle végétatif sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparée avec la période 1986-2015.*

- **Évolution des déficits hydriques**

La *figure 16* montre une importante évolution du déficit hydrique sur toute la période de végétation dans les vignobles de Bordeaux avec la variété Cabernet-Sauvignon, Dijon avec la variété Chardonnay et Avignon avec la variété Syrah, dans le futur. L'effet parait encore plus marqué à la fin du siècle. Il faut aussi signaler qu'à Bordeaux et à Dijon, l'augmentation, même à la fin du siècle, ne dépasse pas les valeurs de déficit d'Avignon actuellement.

Malheureusement, nous n'avons pas eu la possibilité d'analyser cette évolution pour tous les vignobles de l'étude, car il n'y a que ces trois variétés qui sont disponibles sur l'application SICLIMA pour le calcul des indicateurs. Dans les extractions, l'application ne fournit l'ETP que pour les données SAFRAN, qui pourrait nous permettre d'effectuer les calculs avec le logiciel GETARI, mais les ingénieurs de l'unité AgroClim INRAE ont pu l'effectuer en interne de l'application SICLIMA pour les trois variétés citées ci-dessus.

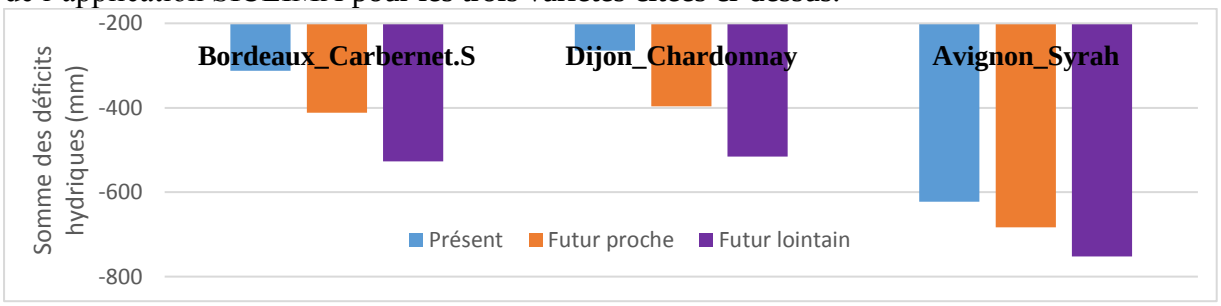


Figure 16 : Évolution *de la somme des déficits hydriques simulés durant le cycle végétatif sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015 avec le modèle CNRM.*

4.4. Prospective

4.4.1. Création de génotypes virtuels

Dans le but de trouver des variétés qui ne risquent pas le gel après le débourrement et qui peuvent arriver à maturité dans la gamme de température actuelle permettant la production de vins de qualité, nous avons créé deux variétés virtuelles. Pour créer ces variétés nous nous sommes basés sur les paramètres des besoins en froid et en chaud des modèles de prévision phénologique Smoothed-Utah et Wang et Engel *(Tableau 5).*

D'abord, nous avons créé une variété Précoce en utilisant les besoins en froid et en chaud les plus faibles connus actuellement ; plus précisément, le modèle prend en compte le besoin en

froid de la variété Grenache pour simuler la levée de la dormance et les besoins de la variété Pinot noir pour simuler le débourrement puis la floraison et de la variété Chasselas pour simuler la véraison *(Tableau 7)*.

Puis, une variété Tardive a été créée, celle-ci devrait prendre en compte le besoin en froid le plus élevé connu actuellement pour simuler la levée de la dormance. Mais avec ce besoin en froid, pour plusieurs années dans le futur, aucun débourrement n'a été observé durant l'année en cours, sinon après 365 jours. De ce fait, nous avons pris la moyenne des besoins en froid des autres variétés pour simuler la levée de la dormance. Ensuite, nous avons simulé la phase post-dormance jusqu'à la véraison en utilisant les besoins en chaud de la variété Grenache pour simuler le débourrement et la véraison, et de la variété Mourvèdre pour simuler la floraison qui sont, les besoins en chaud actuellement les plus élevés parmi les variétés du *tableau 5*.

Tableau 7. *Paramètres des besoins en froid (C) et de forçage (F) des variétés Tardive et Précoce.*

Variétés	C_DB	F_DB	F_DB-FL	F_FL-VER
Variété précoce	69,91	11,86	15,78	49,71
Variété tardive	100,00	21,06	20,94	64,12

4.4.2. Évolution de la véraison

4.4.2.1. Simulation de la véraison au présent des variétés à Colmar et à Montpellier

Nous avons fait une simulation au présent avec les principales variétés connues en France ainsi que les deux génotypes virtuels à Colmar, qui représente une zone tempérée, et à Montpellier, zone chaude, dans le but de trouver les variétés qui seraient plus précoces et plus tardives. Ainsi nous observons que les génotypes virtuels occuperaient les deux positions extrêmes à la véraison ; l'une serait la plus précoce, devant le Chasselas et l'autre serait la plus tardive, devant la Mourvèdre. *(Figure 17)*.

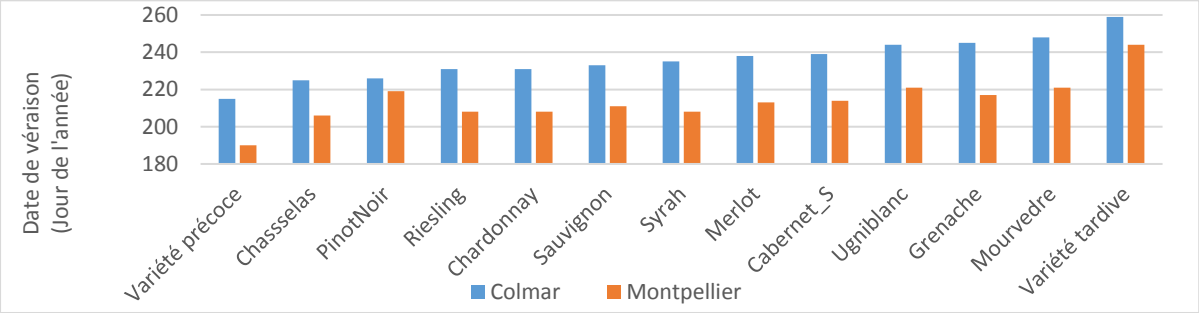


Figure 17 : *Dates de véraison de toutes les variétés simulées au présent (1986-2015) avec les données SAFRAN à Colmar et Montpellier.*

4.4.2.2. Évolution de la date de véraison des variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon

La *figure 18* montre l'évolution des dates de véraison simulées avec le modèle CNRM et le scénario RCP 8.5 pour les variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon. Globalement, nous observons des avancements avec les trois variétés dans les trois mailles. Entre la variété précoce et la variété tardive, des écarts de 39 jours à Bordeaux et à Dijon et de 35 jours à Avignon sont observés dans le présent. Tandis qu'à l'horizon de 2060, des écarts de 39 jours à Bordeaux et de 36 jours à Dijon et à Avignon, et l'horizon de 2100 des écarts de 40 jours à Bordeaux, de 36 jours à Dijon et de 42 jours à Avignon sont observés entre les deux variétés précitées. Ce graphe nous montre aussi que la variété tardive, qui est une variété virtuelle, n'est pas si différente de la variété Mourvèdre qui existe réellement.

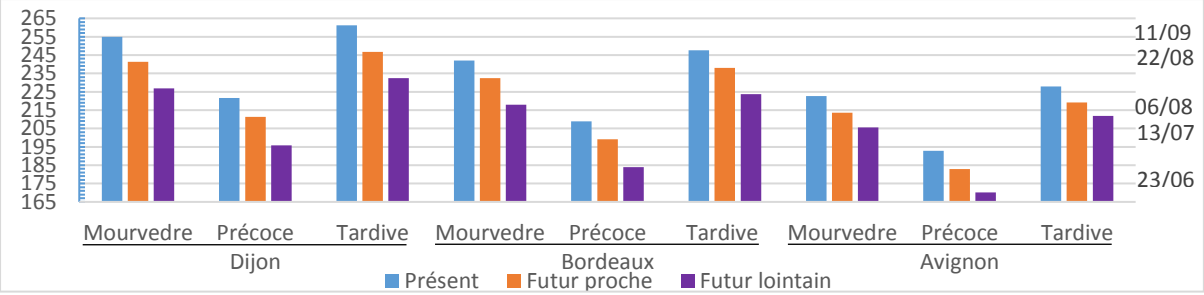


Figure 18 : *Évolution de la date de véraison, des variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon avec le modèle CNRM sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparée avec la période 1986-2015.*

4.4.3. Évolution du nombre de jours de gel après le débourrement pour les variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon

Contrairement à la *figure 8 (voir Annexe 8)* où les variétés Chardonnay à Dijon et Syrah à Avignon courent un risque de gel, seule la variété Précoce est concernée dans le futur. Sauf à Dijon nous observons un risque très négligeable, seulement deux jours sur 30 ans, par rapport à aujourd'hui avec les variétés Mourvèdre et Tardive *(Figure 19)*.

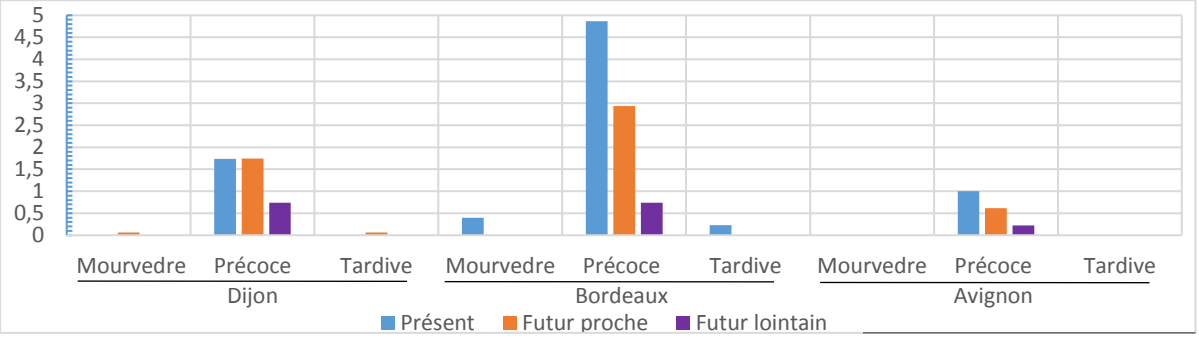


Figure 19 : *Évolution du nombre moyen de jours par an de gel simulés avec le modèle CNRM, pour les variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015.*

4.4.4. Évolution de la température au cours de la maturation des variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon

D'après la *figure 20*, même avec l'augmentation de la température attendue, les variétés Mourvèdre et Tardive pourraient servir d'alternative à l'horizon de 2060 à Bordeaux et à Dijon, tandis qu'à Avignon, il faut une super tardive pour garder les même caractéristiques, puisqu'elles arriveraient à maturité dans les même gammes de température des variétés actuelles qui fournissent du bon vin.

À la fin du siècle, il est encore possible de continuer à produire des vins de qualité à Bordeaux et à Dijon, puisqu'encore les variétés Mourvèdre et Tardive arriveraient à maturité à une température ne dépassant pas la gamme de température la plus haute où la variété Syrah produit des vins de qualité à Avignon actuellement. À contrario, à Avignon, aucune solution ne serait envisageable par rapport à ce critère, car même la variété la plus tardive que l'on pourrait imaginer, arriverait à maturité à une température beaucoup plus haute que celles connues actuellement. Dans ce même ordre d'idée, la variété précoce pourrait aussi servir d'alternative à Bordeaux et à Dijon à l'horizon de 2060. Il faut aussi signaler que la température au cours de la maturation évolue beaucoup plus faiblement avec la variété précoce.

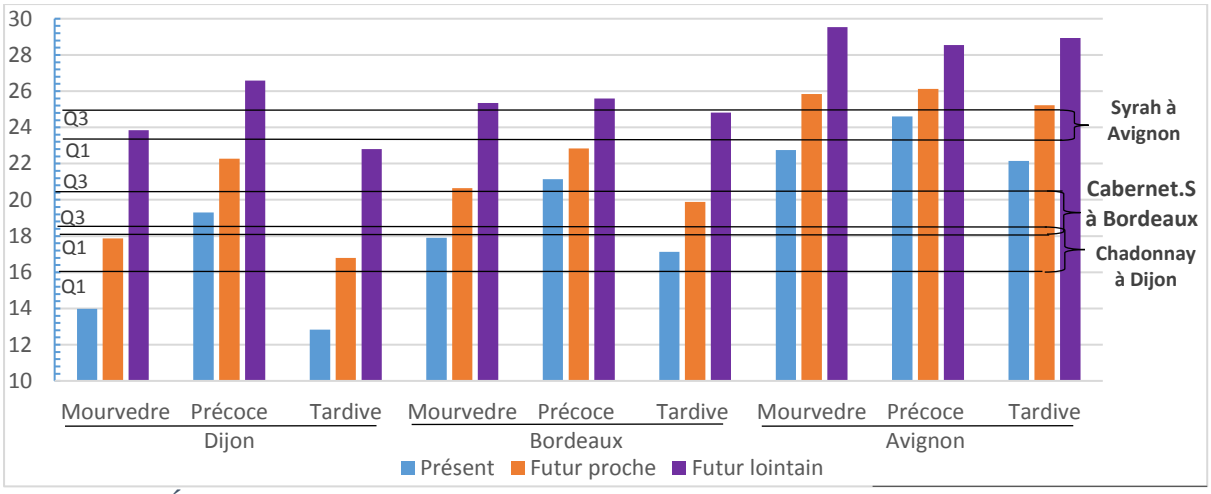


***Figure 20**: Évolution de la moyenne des températures moyennes simulées avec le modèle CNRM, des variétés Mourvèdre, Précoce et Tardive à Dijon, Bordeaux et Avignon, durant la phase véraison-vendange sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparées avec la période 1986-2015. Les lignes Q1 et Q3 représentent le premier et le troisième quartile des températures moyennes simulées avec les données de référence SAFRAN pour les variétés Cabernet-Sauvignon, Chardonnay et Syrah.*

V. Discussion

5.1. Évaluation du modèle de prévision phénologique et validation des données simulées

Le modèle de prédiction des stades est plus efficace à prédire la floraison et la véraison. L'efficacité du modèle pour ces deux phases est presque similaire au modèle utilisé par Duchêne et al. en 2010. Le modèle de débourrement est moins fiable que les modèles de calculs des autres phases, puisque que cette simulation est réalisée en sortie d'hiver, période à laquelle les températures journalières sont encore assez faibles et qu'autour des seuils de réponse de la plante, le modèle peut considérer que le stade est atteint, alors qu'il ne l'est pas encore visiblement (Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019). En plus, l'amélioration de la prédiction du débourrement est beaucoup difficile, ce stade dépend également de la température du sol (Duchêne et al., 2010) et des dates de taille (Martin et Dunn, 2000). Les travaux de Parker et al. (2011) avaient aussi montré que la dispersion entre les données simulées avec les modèles de prévision de la floraison et de la véraison étaient presque similaires avec les données observées pour les mêmes variétés que dans notre étude.

5.2. Évolution de la phénologie en fonction des différents modèles

La phénologie étant extrêmement liées aux températures cumulées, surtout pour une culture d'été qui arrive à maturité dans des conditions beaucoup plus chaudes et sèches, le changement climatique devrait donc se traduire par une avancée généralisée de tous les stades phénologiques et ce, quelle que soit la variété et le modèle choisi. Pour tous les vignobles français, l'ensemble du cycle serait avancée de 20 à 40 jours entre le passé récent (1970-1999) et le futur lointain (2070-2099) (Pieri, 2010). Les dates de véraison pourraient être avancées de plus 40 jours (Duchêne et al., 2010 ; Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019). Nos prédictions en termes d'avancement du cycle sont moins élevées par rapport à ces estimations, nos simulations n'excèdent pas les 30 jours. À ce point, il faut se rappeler que le modèle Wang & Engel plafonne la réponse de la plante à des seuils de températures variant de 0°C et 40°C. Même avec ces avancements, moins élevés que les études précédentes, les vignes arriveraient à maturité sous une température beaucoup plus élevée par rapport à aujourd'hui, ce qui peut avoir des impacts sur les raisins.

5.3. Évolution des indicateurs écoclimatiques

Le nombre de jour de gel devrait diminuer dans le futur (Ouzeau et al., 2014), mais il y a encore beaucoup d'incertitude. Pour cette raison, une éventuelle hausse des dégâts à cause du gel ne peut être exclue dans certaines régions au cours des prochaines décennies (INRA, 2018). Nous avons également observé cette même tendance selon laquelle la diminution du nombre de jours de gel après le débourrement n'est pas systématique avec le réchauffement climatique. Cela est une conséquence de l'avancée des phases qui fait que le débourrement arrive plus tôt en hiver (Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019).

Le changement climatique en lui-même n'est pas désastreux ; au contraire, il est même favorable à la photosynthèse. Le problème est que l'augmentation des teneurs en CO_2 participe à augmenter la température[13]. Or, la première conséquence de l'élévation des températures sur la vigne est une avancée de la maturation vers le milieu de l'été, donc une maturation sous de fortes températures (Duchêne et al., 2010). De ce fait, des températures plus élevées pendant la maturation ont de forts risques de dégradation de la qualité des raisins et du vin, car elles s'avèrent néfastes sur la composition des raisins (Pieri, 2010 et Duchêne et al., 2014). En France métropolitaine durant l'été, pour quelles que soient la période du futur et le scénario, le modèle IPSL simule une augmentation des températures moyennes moins marquées par rapport au modèle CNRM. Avec le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5), le modèle IPSL prévoit des augmentations des températures moyennes de +0,6 °C à l'horizon de 2050 et +1,2 °C à la fin du siècle tandis que le modèle CNRM simule des augmentations de +2,6 °C à l'horizon de 2050 et +5,3 °C à la fin du siècle (Ouzeau et al., 2014). Nos résultats suivent cette même tendance avec des écarts beaucoup plus élevés. La température parait toujours plus élevée avec le modèle CNRM, quel que soit le vignoble dans le futur. Un fait est certain, la température va continuer à augmenter dans le futur, cette situation serait très contraignante pour les vignes.

Les projections climatiques du futur pour la pluviométrie sont peu fiables. Il y a donc beaucoup d'incertitudes, non seulement sur les quantités mais surtout sur la distribution géographique[14] (GIEC, 2013). D'après les simulations, une légère hausse des précipitations moyennes, en été comme en hiver, serait attendue en France à l'horizon de 2050. Mais à la fin du siècle, le modèle CNRM avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 prédisent une diminution durant la période estivale. Contrairement au modèle IPSL qui simule une augmentation des précipitations pour ces mêmes scénarios encore plus élevée à la fin du siècle (Ouzeau et al., 2014). Nous avons également observé cette même tendance avec les deux modèles français, à la seule différence, nos deux modèles s'accordent sur une diminution dans le Sud de la France. Nous avons certaines réserves quant à ces prévisions, puisque, comme nous l'avons souligné précédemment, la pluie est un phénomène beaucoup plus complexe à évaluer que la température sur des courtes périodes (Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019). Mais les résultats obtenus avec le modèle IPSL semblent compatibles avec les prévisions de l'INRA (2018) réalisées avec le modèle CNRM, qui prévoyaient aussi une augmentation des précipitations dans le Nord et une diminution dans le Sud. Même si nous pouvions nous fier à cette augmentation, nous devrions toujours nous attendre à un impact sur le rendement et la qualité à cause de l'augmentation de la température, qui contribuera à amplifier l'évapotranspiration (INRA, 2018). Le changement climatique augmentera également le rayonnement et la fréquence des événements météorologiques extrêmes (IPCC, 2014). Notre étude le montre clairement aussi que le rayonnement sera beaucoup plus élevé dans le futur, avec un effet plus accentué à la fin du siècle.

[13] https://www6.colmar.inrae.fr/svqv/Axes-de-recherche/Vigne-et-changement-climatique

Le niveau de confort hydrique dont pourrait bénéficier la vigne reste la plus grande inconnue. Puisqu'il y a plus de paramètres à prendre en compte, l'analyse devient beaucoup plus complexe. Par contre, l'élévation des températures est plus certaine, avec pour cause une augmentation du stress hydrique et une accentuation des sècheresses estivales dans certaines régions (Ollat et Touzard, 2014). Vraisemblablement dans le futur, avec le prolongement de cette tendance observée, le déficit hydrique va augmenter[14]. Un déficit hydrique plus élevé va entrainer un ralentissement de la croissance (Ollat et Touzard, 2014 ; Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri, 2019).

5.4. Prospective

L'utilisation de clones ou de variétés tardives fait partie des premières idées qui arrivent à l'esprit lorsque nous évoquons l'adaptation à des conditions plus chaudes. Or, il existe une grande variabilité génétique parmi les variétés existantes (Parker et al., 2013). Dans ce cas, nous devrons trouver des variétés qui peuvent s'adapter aux conditions de températures élevées, avec une maturité plus tardive, avec moins de sucres et plus d'acidité (INRA, 2018). L'hypothèse initiale de cette recherche était de trouver des idéotypes modèles qui permettraient de relever le défi du changement climatique, tout en conservant les mêmes conditions de maturation ou encore celles qui sont plus chaudes actuellement (exemple : Mourvèdre, Grenache) dans lesquelles des vins de qualité sont produits.

Notre étude confirme l'hypothèse qu'il serait encore possible de continuer à produire des vignes de qualité dans les mêmes conditions actuelles, même à la fin du siècle ; contrairement à l'étude Duchêne et al. (2010) où même la variété la plus tardive utilisée (Muscat d'Alexandrie) connaîtrait des conditions de maturation plus chaudes que celles connues aujourd'hui. Comme nous l'avons aussi constaté le rejet des variétés précoces, en cherchant uniquement des variétés tardives, dans le futur pourrait être contesté. Du fait de l'évolution plus faible de la température pendant la maturité au courant du siècle à venir, si nous voulions garder la même qualité le plus longtemps possible, la variété précoce serait à envisager. L'inconvénient majeur d'une telle variété est cependant une exposition accrue au risque de gel printanier. Dans le but d'explorer la diversité génétique qui existe, nous disposons de données observées sur le terrain sur plusieurs espèces du genre *Vitis* à Bergheim. Cela nous a permis de remarquer qu'il existe bel et bien des espèces encore plus tardives que notre génotype virtuel voire que le Mourvèdre et le Grenache *(voir Annexe 10)*. L'exploitation de telles ressources génétiques est une solution envisageable pour la création variétale en vue de l'adaptation au changement climatique.

Avec l'augmentation des températures, on s'attend à une augmentation du taux de sucres et une diminution de l'acidité des baies (Duchêne, 2016 ; Bigard, 2018), en raison de la dégradation de l'acide malique (Duchêne, 2016). Outre la solution consistant à utiliser des variétés et/ou espèces tardives, il existe une diversité en termes de concentration en sucres au sein des variétés (Bigard, 2018) et les sélectionneurs ont déjà créé des variétés à faible teneur en sucres produisant des vins ne contenant pas plus de 10-11% d'alcool (Escudier, 2009 et Duchêne, 2016). Par ailleurs, la concentration en acide tartrique dans les baies est beaucoup moins sensible aux températures élevées que la concentration en acide malique (Duchêne, 2016 ; Duchêne et al. 2020). En effet, la quantité d'acide tartrique par baie est généralement constante tout au long de la maturation des baies (DeBolt et al., 2008 ; Duchêne et al., 2020). Les variétés de vigne ayant un rapport tartrique/malique élevé devraient mieux s'adapter aux conditions climatiques plus chaudes (Duchêne, 2016). De ce fait comme l'a suggéré Duchêne et al. (2020), il est aussi possible de créer des génotypes de vigne avec une forte acidité dans les baies et des concentrations plus élevées en acide tartrique. La diversité parmi les variétés

[14] https://www6.colmar.inrae.fr/svqv/Axes-de-recherche/Vigne-et-changement-climatique

pour l'accumulation de sucres et le rapport acide tartrique/malique pourrait être exploitée pour la création de nouvelles variétés. Cela offre des perspectives intéressantes pour améliorer la vigne afin d'atténuer certains effets néfastes du réchauffement climatique sur le volume et la qualité des fruits de la vigne.

VI. Conclusion

Dans cette étude, nous avons combiné la modélisation écophysiologique, des données de simulation du climat du futur et des informations sur la variabilité génétique chez la vigne. Les modèles utilisés montrent des avancées de la phénologie de la vigne sur toutes les phases dans le futur. Elles sont plus ou moins importantes selon le climat des vignobles, avec une tendance légèrement plus marquée au Nord.

En premier lieu, ces avancées font craindre une augmentation des risques de gel après le débourrement à l'horizon de 2060, qui peuvent s'avérer néfaste à la culture. En second lieu, elles font déplacer la phase de maturation du raisin vers des périodes plus chaudes de l'été, effet encore plus marqué dans le Nord et à la fin du siècle. Cela est dû au fait que la température continue d'augmenter à un rythme élevé, surtout durant période estivale. Dans le but de trouver des variétés non exposées à des risques de gel, pouvant éviter une maturation pendant la période la plus chaude de manière à produire des raisins et vins de qualité, nous avons créé deux génotypes virtuels : un génotype « Précoce » et un génotype « Tardif ». Ainsi, nous avons montré que le génotype Tardif et la variété Mourvèdre pourraient servir d'alternatives en ce sens, même à la fin du siècle, sauf dans les vignobles de climat chaud actuellement, où ces variétés devraient arriver à maturité à des températures plus élevées qu'aujourd'hui.

L'élévation de la température reste le facteur le plus certain qui va changer dans le futur comparativement au niveau des précipitations qui demeure incertaine. Nous sommes donc conscients des incertitudes qu'il y a dans les prédictions, puisque nous n'avons pas pu analyser le confort hydrique avec les variétés proposées comme alternatives, lequel est l'un des critères clés de l'adaptation de la vigne. Une augmentation de la température va engendrer une hausse de l'évapotranspiration, laquelle pourrait provoquer un déficit hydrique. Quelles que soient ces incertitudes, cette étude a permis de mettre en évidence des effets que devront subir les vignobles français et des solutions adaptatives avec des variétés tardives. Ainsi nos données peuvent aider les sélectionneurs dans la recherche de variétés et/ou espèces de vigne qui peuvent s'adapter au changement climatique.

En perspective, il serait intéressant :

- d'intégrer les principales variétés connues en France et le paramètre déficit hydrique dans l'application de simulations SICLIMA pour les périodes du futur afin que le confort hydrique puisse être analysé convenablement.
- d'explorer la variété génétique au sein des variétés et/ou espèces de vigne qui existent, pour étudier leur comportement dans les vignobles par rapport au changement climatique ; car, parmi elles, existent des variétés et/ou espèces encore plus tardives que notre idéotype tardif.

Ces recommandations devraient être prises en compte dans les prochaines études du programme LACCAVE 2.21, afin de mieux valoriser les prédictions. Enfin, comme Marjou et Garcia de Cortázar-Atauri (2019) l'avaient suggéré, il n'y a pas une solution unique et universelle. Les solutions à adopter devront être un compromis entre plusieurs innovations techniques. Elles doivent prendre en compte l'ensemble des acteurs de la filière viti-vinicole y compris la préférence des consommateurs, pour un éventuel remplacement des variétés.

VII. Références bibliographiques

- Bigard A., Berhe D.T., Maoddi E., Sire Y., Boursiquot J.M., Ojeda H., Péros J.P., Doligez A., Romieu C. et Torregrosa L., 2018. Vitis vinifera L. fruit diversity to breed varieties anticipating climate changes. Frontiers Plant Sciences.. DOI: 10.3389/fpls.2018.00455.
- CNIV, 2019 et 2020. Études et économie de la filière vitivinicole française. Chiffres clés. France. URL : https://www.intervin.fr/etudes-et-economie-de-la-filiere/chiffres-cles.
- Debaeke, P., André, T. et Lorgeou J., 2014. La notion d'idéotype de plante. Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. Écoles-chercheurs INRA-CIRAD. pp41-56.
- Donald, C.M., 1968. The breeding of crop idéotypes. Euphytica, 17, pp.385-403.
- Duchêne, E. et Schneider, C., 2005. Grapevine and climatic change: A glance at the situation in Alsace. Agron. Sustain. Dev., 25, pp.93–99.
- Duchêne, E., 2017. Changements climatiques. Conséquences du changement climatique sur la vigne et possibilités génétiques d'adaptation. INRA Colmar. France. Retrouvée le 26/ 01/2020 sur : https://www6.colmar.inrae.fr/svqv/Axes-de-recherche/Vigne-et-changement-climatique
- Duchêne, E., Dumas, V., Butterlin, G., Jaegli, N., Camille Rustenholz, C. et al., 2020. Genetic variations of acidity in grape berries are controlled by the interplay between organic acids and potassium. Theoretical and Applied Genetics, , 133(3), pp.993-1008.
- Duchêne, E., Huard F., Dumas V., Schneider C. et Merdinoglu D., 2010. The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Clim. Res.*, 41, pp.193-204.
- GIEC, 2013. Changements climatiques. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs.
- Guilyardi, E., Lescarmontier, L., Matthews, R., Pen Point, S., Rumjaun, A. B., Schlüpmann J. et Wilgenbus D., 2019. Rapport Spécial du GIEC « Réchauffement à 1,5°C ». Résumé à destination des enseignants. Office for Climate Education. France. p24.
- Huglin, P. et Schneider, C., 1998. Biologie et écologie de la vigne. 2e edition revue et corrigé. (edition Lavoisier TEC & DOC). France. p370.
- INRAE, 2018. La vigne, le vin, et le changement climatique en France. Infographie. Projet LACCAVE. France.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Retrouvée le 22/03/2020 sur : http://ipcc-wg2.gov/AR5/report/final-drafts/.
- IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. (Geneva, Switzerland).
- Laurent, T., Christian, P., Déqué, M. et Flécher Cédric, F., 2010. L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs AgroClimatiques. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulation d'impacts sur les principales espèces 2007-2010. Livre du projet CLIMATOR. ANR. INRA. ADEME. pp.19-62.
- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., et Schultz, H., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. Functional Plant Biology, 30(6), pp.699–710.
- Lereboullet, A.-L., Beltrando, G., Bardsley, D.K. et Rouvellac, E., 2014**.** The viticultural system and climate change: Coping with long-term trends in temperature and rainfall in Roussillon, France. Reg. Environ. Chang., 14, Pp.1955–1966. Retrouvée le 10/04/2020 sur : https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-013-0446-2.
- Limier B., 2018. « Approche éco-anatomique du bois de vigne (*Vitis vinifera* L.) pour une meilleure connaissance de l'histoire de la viticulture en Méditerranée nord-occidentale ».

- Marjou M. et Garcia de Cortázar-Atauri I., 2019. Analyse climatique passée et future des terres viticoles sur le secteur Ventoux. Rapport INRA. pp.94.
- Martin, S.R. et Dunn, G.M., 2000. Effect of pruning time and hydrogen cyanamide on budburst and subsequent phenology of Vitis vinifera L. variety Cabernet Sauvignon in central Victoria. Aust. J. Grape Wine Res., 6, pp31–39.
- Moisselin, J.M. et Dubuisson, B., 2006. Évolution des extrêmes de températures et de précipitations en France au cours du XXe siècle. La Météorologie. p54. URL : http://hdl.handle.net/2042/20099.
- Morales-Castilla I., García de Cortázar-Atauri I., Cook B.I., Lacombe T., Parker A., Van Leeuwen C., Nicholas K.A. et Wolkovich E.M., 2020. Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 117(6), pp.2864- 2869. URL : www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1906731117.
- Nader K.B., Stoll M., Rauhut D., Patz C-D., Jung R., Loehnertz O. et Schultz H-R., 2019. « Impact of Grapevine Age on Water Status and Productivity of *Vitis Vinifera* L. Cv. Riesling ». *European journal of agronomy*, 104, pp.1-12. URL :https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.009.
- Ollat, N., et Touzard J.M., 2014. Stress hydrique et adaptation au changement climatique pour la viticulture et l'œnologie : le projet LACCAVE. Progrès Agricole et Viticole, 132(7), pp.28-35.
- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S. et Vautard, R., 2014. Le Climat de la France au XXI^{e}. Volume 4 Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. p.62.
- Parker, A., Garcia de Cortázar, I., Chuine, I., Van Leeuwen, C., 2011. General phenological model to characterize the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L.. Australian Journal of Grape and Wine Research, 17, pp.206-216.
- Parker, A., Garcia de Cortázar, I.. Chuine, I., Barbeau, G., Bois, B., Boursiquot, J.-M., Cahurel, J.-Y., Claverie, M., Dufourcq, T., Gény, L., et al., 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. Agric. For. Meteorol., 180, pp.249–264.
- Pieri, P., 2010. Changement climatique et culture de la vigne : l'essentiel des impacts. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulation d'impacts sur les principales espèces 2007-2010. Livre du projet CLIMATOR. ANR. INRA. ADEME. pp213-224.
- Rapport LACCAVE, 2016. Long term Adaptation to Climate Change in Viticulture and Enology.LACCAVE. Métaprogramme ACCAF. Rapport final: résultats pour la période 2012–2016. Version française. France. p62.
- Richardson, E.A., 1974. A model for estimating the completion of rest for ''Redhaven'' and ''Elberta'' peach trees. HortScience, 9, pp.331–332.
- Sun, Q., Rost, T.L., et Matthews M.A., 2006. « Pruning-induced tylose development in stems of current-year shoots of *Vitis vinifera* (Vitaceae) ». *American Journal of Botany*, 93(11), pp1567-1576. https://doi.org/10.3732/ajb.93.11.1567.
- Van Leeuwen, C. et Darriet P., 2016. The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. American Association of Wine Economists. Journal of Wine Economics, 11(1), pp.150–167.
- Van Leeuwen, C., Destrac, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Mark Gowdy, M., et al.. 2019. An update on the impact of climate change in viticulture and potential adaptations. Agronomy, MDPI, 9 (9), pp.1-20.
- Wang, E. et Engel, T., 1998. Simulation of phenological development of wheat crops. Agric. Syst., 58, pp.1–24.

VIII. Résumé

Après la validation d'un modèle de prédiction phénologique, nous avons pu simuler les dates de débourrement, de floraison et de véraison pour 7 variétés dans 9 mailles reparties de façon à couvrir la grande diversité des vignobles français. Puis, nous avons pu caractériser et quantifier les changements auxquels la viticulture sera confrontée dans le futur. Par rapport à la période de 1986 à 2015, tous les stades phénologiques devraient connaitre des avancées importantes dans le futur, surtout la véraison qui peut atteindre jusqu'à 30 jours. Ces avancées font craindre le risque de gel dans certains vignobles et la maturation devrait arriver dans des conditions beaucoup plus chaudes et sèches. Les conséquences qui en découlent auront probablement un impact majeur sur la qualité du raisin et du vin. Par la suite, nous avons exploré la variabilité génétique des paramètres phénologiques avec les 11 principales variétés françaises. Ainsi, nous avons créé deux génotypes virtuels, un génotype Précoce et un génotype Tardif, afin de pouvoir trouver des variétés qui peuvent éviter le risque de gel et la période la plus chaude pour arriver à la maturation. Après modélisation, nous avons pu remarquer que le génotype Tardif et la variété Mourvèdre pourraient éviter le risque de gel et arriver à maturité dans les mêmes conditions connues actuellement où des vins de qualité sont produits.

Mots clés : Vigne – Changement climatique – Phénologie – Modélisation – Adaptation

Abstracts

After the validation of a phenological prediction model, we were able to simulate the dates of bud-break, flowering and veraison for 7 varieties in 9 grids distributed in order to cover the great diversity of French vineyards. We were then able to characterize and quantify the changes that viticulture will face in the future. Compared to the period from 1986 to 2015, all phenological stages are expected to experience significant advances in the future, especially the veraison which can last up to 30 days. These advances raise concerns about the risk of frost in some vineyards and ripening is expected to occur under much warmer and drier conditions. The resulting consequences will probably have a major impact on grape and wine quality. Subsequently, we explored the genetic variability of phenological parameters with the 11 main French varieties. Thereby, we created two virtual genotypes, an Early and a Late genotype, in order to find varieties that can avoid the risk of frost and the hottest period for ripening. After modeling, we were able to observe that the Late genotype and the Mourvèdre variety could avoid the risk of frost and mature under the same conditions currently known where quality wines are produced.

Key words : Vine – Climatic change – Phenology – Modeling – Adaptation

IX. Abbréviations

ALADIN : Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational
C : Chilling units (besoin en froid)
CNIV : Comité National des Interprofessions des Vins
CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques
ºC : Degré Celsius
DB : Debourrement
DRIAS : Donner accès aux scenarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements
EFF : Model efficiency
ETP : Evapotranspiration potentielle
F : Forcing units (besoin en chaud)
FL : Floraison
FL : Futur Lointain
FP : Futur Proche
GETARI: Generic Evaluation Tool of AgroClimatic Indicators
GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
INRA : Institut national de la recherche agronomique
INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
IPSL: Institut Pierre Simon Laplace
PMP: Phenological Modeling Platform
Pr : Présent
RCP : Radiative Concentration Pathway
RMSE : Root Mean Square Error
SAFRAN : Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige)
SICLIMA : Système d'information de données climatiques maillées
SU : Smoothed-Utah
SVQV : Santé de la Vigne et Qualité du Vin
Tmax : Température maximale
Tmin : Température minimale
Topt : Température optimale
UMR : Unité Mixte de recherche
VER : Veraison
WE : Wang et Engel
WRF : Weather Research and Forecasting

X. Annexes

Annexe 1 : Présentation de l'UMR 1131 SVQV.....29
Annexe 2 : Scénarios RCP. 29
Annexe 4 : Stades phénologiques.....30
Annexe 4 : Exemple de réponses du modèle Wang et Engel avec les variétés Chardonnay, Syrah et Cabernet_Sauvignon.....31
Annexe 5 : Description des paramètres des modèles phénologiques Smoothed-Utah et Wang et Engel. 32
Annexe 6 : Supléments des tests statistiques.....32
Annexe 7 : Définition des symboles.....32
Annexe 8 : Nombre moyen de jours de gel par an sur 30 ans pour les mailles où ce risque augmente dans le futur. 33
Annexe 9 : Évolution du cumul de rayonnement durant le cycle végétatif. 33
Annexe 10 : Nombre de jour à la véraison en fonction de plusieurs espèces. 33

***Annexe 1** : Présentation de l'UMR 1131 SVQV*

L'unité mixte de recherche 1131 'Santé de la Vigne et Qualité du Vin' (SVQV) conduit des recherches sur les maladies de la vigne, fongiques et virales, parmi les plus préjudiciables pour le vignoble français. Grâce à la compréhension des interactions entre la vigne et ses agresseurs et de l'élaboration de la qualité de la baie de raisin, les chercheurs peuvent proposer des solutions innovantes et durables répondant aux enjeux d'une viticulture durable.

Sur le Centre Inra Grand Est-Colmar, l'UMR SVQV associe des personnels permanents de l'Inra, de l'Université de Strasbourg et de l'Université de Haute Alsace. Elle est structurée en trois équipes qui développent trois programmes interconnectés : 'Résistance durable de la vigne aux bioagresseurs', 'Métabolisme secondaire de la vigne' et 'Vection des phytovirus par les vecteurs invertébrés'.

Le programme d'étude 'Résistance durable de la vigne aux bioagresseurs' porté par l'équipe **Génétique et Amélioration de la Vigne** vise à identifier les mécanismes de résistance et de défense naturels au mildiou et à l'oïdium existant dans les espèces de vigne sauvages et à les caractériser, notamment pour évaluer leur efficacité et leur potentiel de durabilité. Ces caractères de résistance sont ensuite introduits, par hybridation, dans des fonds génétiques cultivés pour créer des variétés résistantes. Afin de garantir la qualité viti-vinicole et l'adaptation au changement climatique des variétés résistantes, les bases génétiques de la qualité et du développement de la vigne sont également étudiées.

***Figure A 1 :** Présentation de l'UMR 1131 SVQV.*

***Annexe 2** : Scénarios RCP.*

Les scenarios d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre du GIEC sont au nombre de quatre. Les figures ci-dessous résument ; le forçage radiatif total approximatif pour l'année 2100 par rapport à l'année 1750, pour chacun des quatre scénarios, de même que leur concentration en CO_2 (GIEC, 2013).

Scénario de forçage	*Concentration de CO2 en 2100*	*Hypothèses*
RCP 2.6	490	Diminution forte des émissions de GES dès 2020
RCP 4.5	650	Diminution des émissions de GES avant 2050
RCP 6.0	850	Diminution des émissions de GES après 2050
RCP 8.5	1370	Aucune mesure d'atténuation n'est envisagée et les émissions continuent d'augmenter de manière exponentielle jusqu'à bien après 2100

***Figure A 2** : Hypothèses et concentrations en CO_2 à l'horizon 2100 des quatre scénarios d'émissions retenus par le GIEC pour évaluer l'évolution du climat futur.*

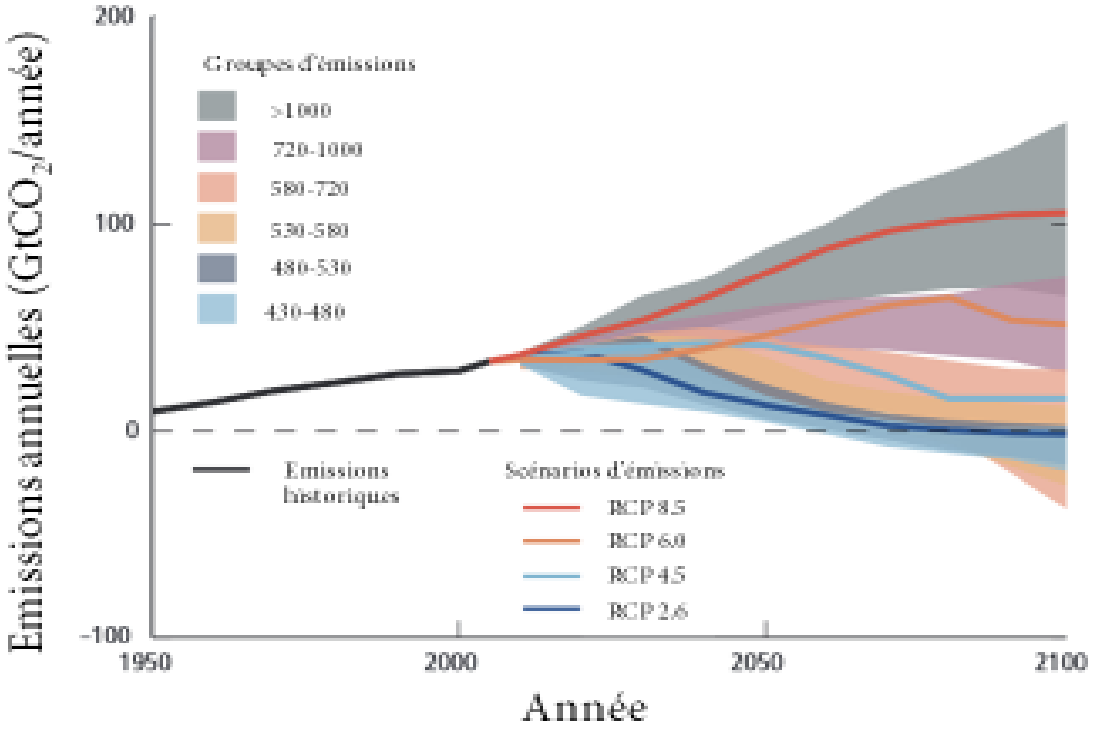


***Figure A 3** : Évolution des émissions de gaz à effet de serre (le CO_2) en fonction des différents scénarios proposés par le GIEC en 2013.*

***Annexe 3** : Stades phénologiques*



A.- Dormance B.-Débourrement C.-Floraison D.-Véraison

***Figure A 4** : Les Stades principales de la phénologie de la vigne.*

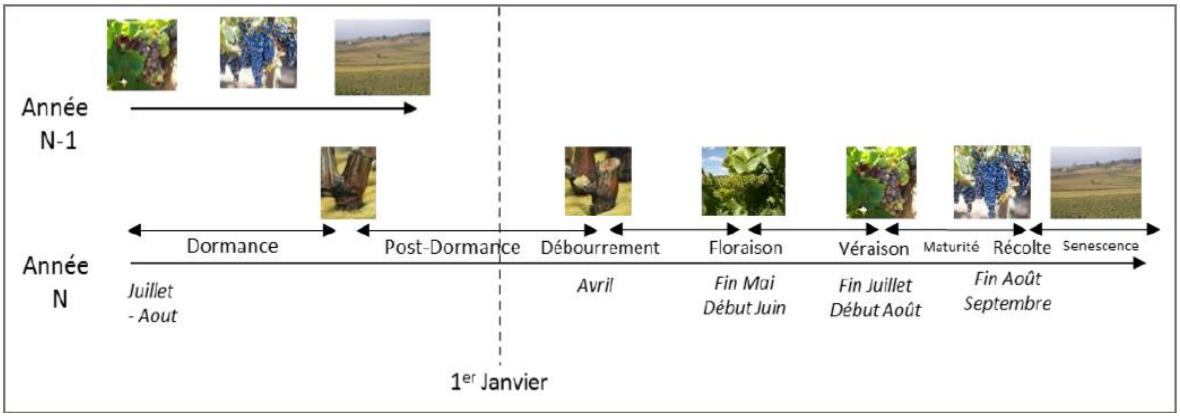
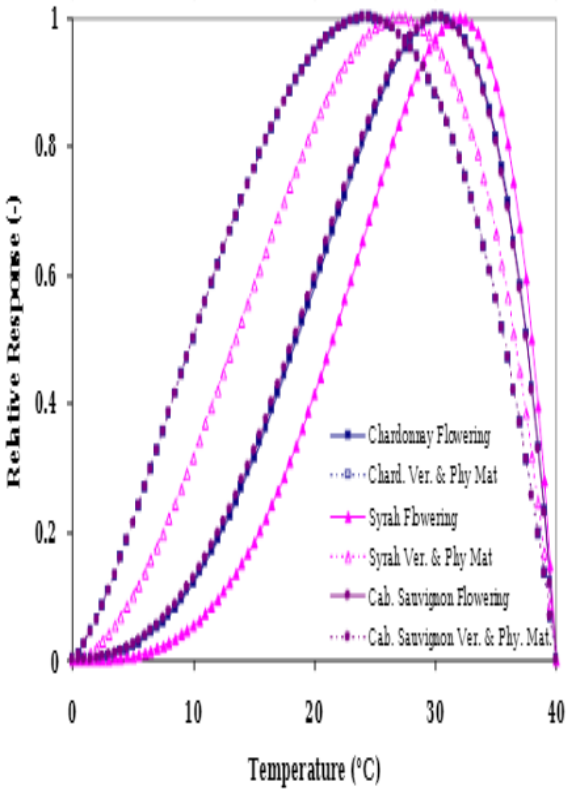


***Figure A 5** : Cycle de développement de la vigne de l'année N (année en cours). L'entrée en dormance des bourgeons de l'année N se réalise au moment de l'arrêt de croissance végétative de l'année N-1 (année précédente). A ce moment les bourgeons entrent en dormance jusqu'à la levée de la dormance (fin de l'année N-1). Ces bourgeons fructifères vont débourrer en début du printemps pour faire le cycle complet jusqu'à la récolte des grappes et ensuite entrer dans la phase de sénescence foliaire.*

***Annexe 4** : Exemple de réponses du modèle Wang et Engel avec les variétés Chardonnay, Syrah et Cabernet_Sauvignon.*

	Budbreak - Flowering		Flowering - Veraison		Veraison - Physiological Maturity	
	Topt	F*	Topt	F*	Topt	F*
Chardonnay	30.3	18.8	24.3	56.2	24.3	46.0
Syrah	32.0	12.5	27.0	52.8	27.0	43.2
Cabernet Sauvignon	30.2	20.3	24.3	63.0	24.3	51.5



Future scenarios were built using a stochastic weather generator, LARS-WG (Semenov et al., 1998), capable of reproducing weather data at single site (i.e., at grid scale). ECMWF historical series (1982-2008), taken to

***Figure A 6** : Exemple de réponse du modèle de prédiction de la phénologie.*

Source: https://www.researchgate.net/publication/267698044_A_curvilinear_process-based_phenological_model_to_study_impacts_of_climatic_change_on_grapevine_Vitis_vinifera_L_Garcia_de_Cortazar-Atauri_I

***Annexe 5** : Description des paramètres des modèles phénologiques Smoothed-Utah et Wang et Engel.*

Le modèle SU comprend quatre paramètres :
1) Tm1 est la diminution de l'efficacité du froid pour l'endodormance des bourgeons,
2) Topt la température moyenne quotidienne optimale,
3) Tn2 la température avec la moitié de l'efficience de Topt pour induire l'endodormance, et
4) min l'impact négatif des températures élevées.

Le modèle WE comprend trois paramètres; Tmin, Topt et Tmax, représentant respectivement les valeurs de température minimale, optimale et maximale pour calculer l'ampleur du forçage. Les paramètres sont exprimés en °C. Les paramètres ajustés sont identiques pour toutes les variétés.

***Annexe 6** : Supléments des tests statistiques.*

- **Erreur quadratique moyenne**

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Pi - Oi)^2}$$

Où n est le nombre d'années dans l'ensemble de données, Pi est la date prévue pour l'année i, Oi est la date observée pour l'année i.

- **Efficacité du modèle**

$$\mathbf{EFF} = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi-Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{o})^2}\right)$$

ō est la moyenne des observations.

***Annexe 7** : Définition des symboles.*

***Tableau A 1** : Définition des symboles.*

	Significations	
Symboles	**Vignobles**	**Variétés**
Re	Reims	Chardonnay
Co	Colmar	Riesling
Di	Dijon	Chardonnay
An	Angers	Merlot
Cg	Cognac	Ugni blanc
Rh	Rhône	Syrah
BCa	Bordeaux	Cabernet_Sauvignon
BMe	Bordeaux	Merlot
AvS	Avignon	Syrah
AvG	Avignon	Grenache
MS	Montpellier	Syrah
MG	Montpellier	Grenache

***Annexe 8** : Nombre moyen de jours de gel par an sur 30 ans pour les mailles où ce risque augmente dans le futur.*

Les nombres et/ou chiffres en rouge du *tableau A2* montrent l'augmentation du nombre de jours de gel dans le futur comparativement au présent dans les mailles sélectionnées.

***Tableau A 2**. Nombre moyen de jours de gel par an sur 30 ans pour les mailles où ce risque augmente dans le futur.*

Région	Variété	Safran	CNRM_Pr	CNRM_FP	CNRM_FL	IPSL_Pr	IPSL_FP	IPSL_FL
Colmar	Riesling	0	0	0,10	0	0,43	0,29	0,26
Dijon	Chardonnay	0,1	0,03	0,13	0	0,5	0,42	0,39
Avignon	Syrah	0	0,03	0,06	0	0,07	0,23	0
Avignon	Grenache	0	0,07	0,06	0	0,07	0,19	0
Montpellier	Syrah	0	0	0	0	0	0,10	0
Montpellier	Grenache	0	0	0	0	0	0,10	0
Reims	Chardonnay	0,3	0	0,13	0	0,87	0,61	0,26

***Annexe 9 :** Évolution du cumul de rayonnement durant le cycle végétatif.*

Ici nous observons que le rayonnement sera globalement plus élevé dans le futur durant tout le cycle végétatif de la vigne. Mais contrairement à la phase véraison-vendange, l'effet n'est pas forcément plus marqué à la fin du siècle surtout dans le sud de la France. A l'inverse, l'écart sera encore plus élevé au Nord et à la fin du siècle *(Figure A6).*

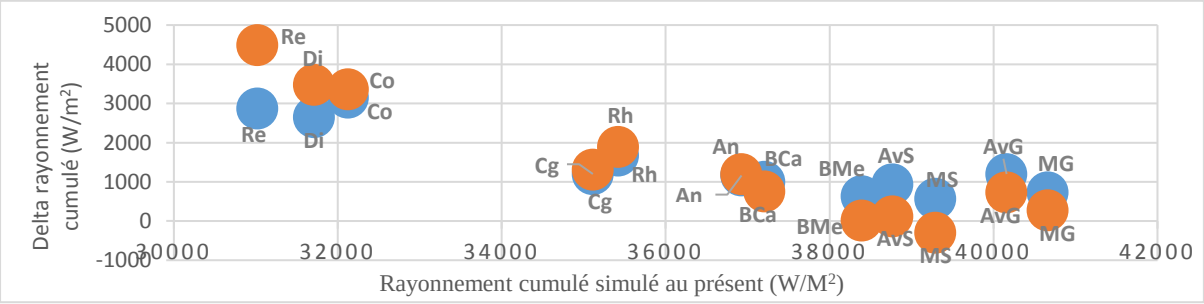


***Figure A 7** ; Évolution du cumul de rayonnement simulé durant le cycle végétatif sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 comparés avec la période 1986-2015.*

***Annexe 10 :** Nombre de jour à la véraison en fonction de plusieurs espèces.*

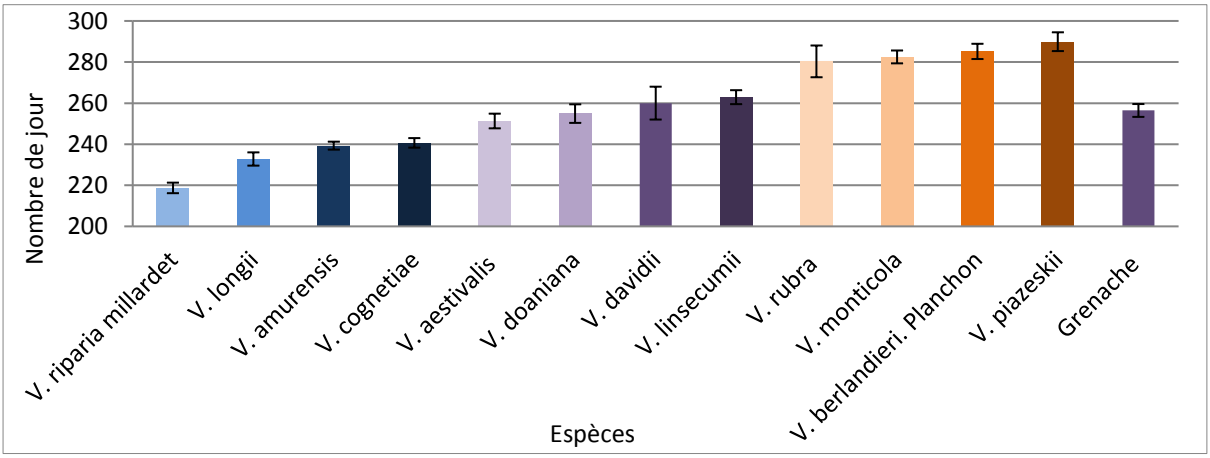


***Figure A 8** : Nombre de jour à la véraison en fonction de plusieurs espèces.*