

## Mémoire

**Auteur :** Sacré, Igor

**Promoteur(s) :** Doutreloup, Sébastien

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

**Année académique :** 2023-2024

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/21340>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

# UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Faculté des Sciences  
Département de Géographie



## Évolution bioclimatique des vignes en Belgique de 1950 à 2023 à l'aide du modèle atmosphérique régional MAR

Mémoire présenté par : **Igor SACRÉ**

pour l'obtention du titre de  
**Master en sciences géographiques,  
orientation global change**

Année académique : **2023-2024**

Date de défense : **Septembre 2024**

Président du jury : **Pr. Xavier FETTWEIS**

Promoteur : **Dr. Sébastien DOUTRELOUP**

Jury de lecture : **Dr. Guénaël DEVILLET**

Jury de lecture : **Dr. Brice NOËL**



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement l'ensemble des étudiants, professeurs et assistants que j'ai eu le plaisir de côtoyer durant mes années d'études en géographie à l'Université de Liège. La bonne ambiance et l'entraide qui régnaient dans les couloirs du département ont grandement contribué à rendre cette expérience inoubliable. Mon passage au B11 restera à jamais gravé dans ma mémoire.

Je souhaite également remercier Simon et Benjamin, mes fidèles collègues, pour leur aide précieuse, leurs conseils avisés, et pour tous les moments partagés ensemble.

Un grand merci à mes parents pour leur soutien constant et la confiance qu'ils ont placée en moi durant ces six années ainsi qu'à Françoise et à Claire pour leur aide dans la relecture de ce mémoire.

Je suis également reconnaissant envers Xavier Fettweis pour l'ensemble des connaissances qu'il m'a transmises ainsi que pour ses réponses toujours pertinentes à mes nombreuses questions de programmation au cours de ces deux années de master.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon promoteur, Sébastien Doutreloup, pour son suivi rigoureux, sa disponibilité et ses conseils précieux durant cette année de rédaction, qui a été particulièrement exigeante.



## Résumé

Ce mémoire traite de l'évolution bioclimatique de la vigne en Belgique entre 1950 et 2023 en utilisant le modèle atmosphérique régional MAR. Il se concentre sur deux des cépages les plus cultivés en Belgique, le chardonnay et le pinot noir, et analyse l'impact des changements climatiques sur leurs stades phénologiques (débourrement, floraison, véraison et maturité) ainsi que sur des indices bioclimatiques comme l'indice héliothermique de Huglin et l'indice de fraîcheur des nuits. Les résultats montrent un réchauffement notable en Belgique viticole et un avancement significatif des différents stades phénologiques. L'Ardenne, en particulier, a connu un réchauffement qui semble plus prononcé que d'autres régions de Belgique, permettant potentiellement aujourd'hui une maturation complète du raisin, ce qui n'était pas possible dans les années 1950, par exemple. Ces changements s'alignent avec les tendances observées dans d'autres régions viticoles européennes proches de la Belgique. Ce mémoire souligne également l'importance de surveiller ces évolutions pour adapter la viticulture aux nouvelles conditions climatiques en Belgique.



## **Abstract**

This master's thesis examines the bioclimatic evolution of the vine in Belgium from 1950 to 2023 using the regional atmospheric model MAR. It focuses on two of the most widely cultivated grape varieties in Belgium, Chardonnay and Pinot Noir, and analyzes the impact of climate change on their phenological stages (budburst, flowering, veraison, and maturity), as well as on bioclimatic indices such as the Huglin heliothermal index and the cool night index. The results reveal a notable warming trend in the Belgian wine region and a significant advancement in the various phenological stages. In particular, the Ardennes region has experienced a more pronounced warming compared to other regions in Belgium, potentially allowing for complete grape maturation today, which was not possible in the 1950s. These changes align with trends observed in other nearby European wine regions. This master's thesis also highlights the importance of monitoring these developments to adapt viticulture to the new climatic conditions in Belgium.





# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>1</b>
<b>Table des figures</b>	<b>3</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>7</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>9</b>
1.1 Introduction générale . . . . .	9
1.2 Vigne . . . . .	10
1.2.1 Description générale et cépages . . . . .	10
1.2.2 Yeux et bourgeons . . . . .	13
1.2.3 Physiologie . . . . .	15
1.2.4 Phénologie . . . . .	18
1.3 Conséquences déjà observées de la hausse des températures . . .	26
1.3.1 Indices bioclimatiques . . . . .	26
1.3.2 Stades phénologiques . . . . .	28
1.4 Objectifs . . . . .	32
<b>2 Matériels et méthodes</b>	<b>33</b>
2.1 Modèle climatique régional . . . . .	33
2.2 Belgique viticole . . . . .	34
2.3 Indices bioclimatiques . . . . .	37
2.3.1 Indice héliothermique de Huglin . . . . .	37
2.3.2 Indice de fraîcheur des nuits . . . . .	38
2.4 Modèles phénologiques . . . . .	39
2.4.1 Modélisation du débourrement . . . . .	39
2.4.2 Modélisation de la floraison et de la véraison . . . . .	42
2.4.3 Modélisation de la maturité . . . . .	43

## TABLE DES MATIÈRES

---

2.4.4	Résumé . . . . .	44
2.5	Ruptures et tendances . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Résultats</b>	<b>47</b>
3.1	Situation en 2023 et évolution depuis les années 1950 . . . . .	47
3.2	Indices bioclimatiques . . . . .	62
3.2.1	Indice héliothermique de Huglin . . . . .	62
3.2.2	Indice de fraîcheur des nuits . . . . .	64
3.3	Stades phénologiques . . . . .	66
3.3.1	Débourrement . . . . .	66
3.3.2	Floraison . . . . .	70
3.3.3	Véraison . . . . .	74
3.3.4	Maturité . . . . .	78
<b>4</b>	<b>Discussion</b>	<b>89</b>
4.1	Indices bioclimatiques . . . . .	89
4.2	Stades phénologiques . . . . .	91
<b>5</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>95</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>97</b>
<b>A</b>	<b>Liste des cépages plantés en Belgique en 2017</b>	<b>103</b>
<b>B</b>	<b>Échelles de notation phénologique</b>	<b>105</b>

# Table des figures

1.1	Classification phylogénétique d’après <a href="#">Zah-Bi (2014)</a> . . . . .	11
1.2	Chardonnay ( <a href="#">Viala et al., 1901</a> ). . . . .	12
1.3	Pinot noir ( <a href="#">Viala et al., 1901</a> ). . . . .	12
1.4	Différents types de bourgeons sur un pied de vigne ( <a href="#">Benmehaia, 2017</a> ). . . . .	14
1.5	Coupe schématique d’un œil latent ( <a href="#">Reynier, 2016</a> ) . . . . .	14
1.6	Cycle biologique de la vigne ( <a href="#">Reynier, 2016</a> ) . . . . .	16
1.7	Cycles végétatif et reproducteur de la vigne ( <a href="#">Reynier, 2016</a> ). . . . .	17
1.8	Débourrement ( <a href="#">Destrac-Irvine et al., 2017</a> ). . . . .	19
1.9	Floraison ( <a href="#">Destrac-Irvine et al., 2017</a> ). . . . .	19
1.10	Véraison ( <a href="#">Destrac-Irvine et al., 2017</a> ). . . . .	19
1.11	Stade de débourrement des bourgeons de la vigne ( <a href="#">Pouget, 1988</a> ). . . . .	22
1.12	Étapes successives lors de la chute du capuchon ( <a href="#">Vasconcelos et al., 2009</a> ). . . . .	23
1.13	Indice héliothermique de Huglin à Colmar (France) entre 1972 et 2003 ( <a href="#">Duchêne et Schneider, 2005</a> ). . . . .	26
1.14	Indice héliothermique de Huglin à Saumur (France) entre 1960 et 2010 ( <a href="#">Neethling et al., 2012</a> ). . . . .	27
1.15	Indice héliothermique de Huglin à Hainfeld (Allemagne) entre 1975 et 2015 ( <a href="#">Koch et Oehl, 2018</a> ). . . . .	27
1.16	Dates annuelles du débourrement, de la floraison et de la véraison pour cinq cépages différents à Hainfeld (Allemagne) entre 1975 et 2015 ( <a href="#">Koch et Oehl, 2018</a> ). . . . .	29
1.17	Dates annuelles des vendanges pour cinq cépages différents à Hainfeld (Allemagne) entre 1975 et 2015 ( <a href="#">Koch et Oehl, 2018</a> ). . . . .	30
1.18	Séries chronologiques des principaux événements phénologiques des cépages müller-thurgau, riesling et silvaner cultivés dans le vignoble LWG ainsi que du cépage silvaner cultivé dans le vignoble Bürgerspital (Wurtzbourg, Allemagne) ( <a href="#">Bock et al., 2011</a> ) . . . . .	31

## TABLE DES FIGURES

---

2.1	Création d'un masque raster à partir de données vectorielles (Hales <i>et al.</i> , 2021). . . . .	34
2.2	Masque raster correspondant à la Belgique viticole . . . . .	35
2.3	Application d'un masque à plusieurs tableaux (Hales <i>et al.</i> , 2021). . . . .	36
3.1	Les indices (a) héliothermique de Huglin et (b) de fraîcheur des nuits en 2023. . . . .	48
3.2	Jour de débourrement du (a) chardonnay et du (b) pinot noir en 2023. . . . .	49
3.3	Jour de floraison du (a) chardonnay et du (b) pinot noir en 2023. . . . .	50
3.4	Jour de véraison du (a) chardonnay et du (b) pinot noir en 2023. . . . .	51
3.5	Jour de maturité (170 g/L) du (a) chardonnay et du (b) pinot noir en 2023. . . . .	52
3.6	Jour de maturité (190 g/L) du (a) chardonnay et du (b) pinot noir en 2023. . . . .	53
3.7	Jour de maturité (200 g/L) du pinot noir en 2023. . . . .	54
3.8	Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour (a) l'indice héliothermique de Huglin et (b) l'indice de fraîcheur des nuits. . . . .	55
3.9	Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de débourrement du (a) chardonnay et du (b) pinot noir. . . . .	56
3.10	Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de floraison du (a) chardonnay et du (b) pinot noir. . . . .	57
3.11	Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de véraison du (a) chardonnay et du (b) pinot noir . . . . .	58
3.12	Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de maturité (170 g/L) du (a) chardonnay et du (b) pinot noir . . . . .	59
3.13	Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de maturité (190 g/L) du (a) chardonnay et du (b) pinot noir . . . . .	60
3.14	Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de maturité (200 g/L) du pinot noir . . . . .	61
3.15	Indice héliothermique de Huglin pour la Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	63

## TABLE DES FIGURES

---

3.16	Indice de fraîcheur des nuits pour la Belgique viticole entre 1950 et 2023 . . . . .	65
3.17	Jour de débourrement du chardonnay en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	67
3.18	Jour de débourrement du pinot noir en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	69
3.19	Jour de floraison du chardonnay en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	71
3.20	Jour de floraison du pinot noir en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	73
3.21	Jour de véraison du chardonnay en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	75
3.22	Jour de véraison du pinot noir en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	77
3.23	Jour de maturité du chardonnay (170 g/L) en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	79
3.24	Jour de maturité du chardonnay (190 g/L) en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	81
3.25	Jour de maturité du pinot noir (170 g/L) en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	83
3.26	Jour de maturité du pinot noir (190 g/L) en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	85
3.27	Jour de maturité du pinot noir (200 g/L) en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 . . . . .	87
B.1	Tableau reprenant la première partie des échelles BBCH et de Baggiolini ( <a href="#">Bloesch et Viret, 2008</a> ). . . . .	106
B.2	Tableau reprenant la deuxième partie des échelles BBCH et de Baggiolini ( <a href="#">Bloesch et Viret, 2008</a> ). . . . .	107
B.3	Tableau reprenant la troisième partie des échelles BBCH et de Baggiolini ( <a href="#">Bloesch et Viret, 2008</a> ). . . . .	108

B.4 Échelle d'Eichhorn et Lorenz ([Martins, 2012](#)). . . . . 109

# Liste des tableaux

2.1	Indice héliothermique de Huglin ( <a href="#">Tonietto et Carbonneau, 2004</a> ). . . . .	37
2.2	Indice de fraîcheur des nuits ( <a href="#">Tonietto et Carbonneau, 2004</a> ). . . . .	38
2.3	Résumé des différents modèles phénologiques utilisés . . . . .	44
A.1	Superficie par cépage en Belgique ( <a href="#">Direction de l’Inspection économique, 2018</a> ). . . . .	104





# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Introduction générale

Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone a augmenté de 40% (Ollat et Touzard, 2024). En 2023, cette concentration était de 419,3 parties par million (Lindsey, 2024). La hausse des températures qui découle de cette augmentation des concentrations de gaz à effet de serre a été estimée en 2020 par l’Institut royal météorologique entre 1,8°C et 1,9°C (IRM, 2020). Cette estimation correspond à l’augmentation de la température annuelle moyenne pour la Belgique lorsque les années 1990-2019 sont comparées aux années 1880-1909 (IRM, 2020).

La vigne étant influencée par des facteurs abiotiques tels que la température, les conséquences du réchauffement climatique sur celle-ci sont déjà perceptibles depuis plusieurs années (Ollat et Touzard, 2024). En effet, les vignobles situés dans les régions méridionales de l’hémisphère nord deviennent de plus en plus chauds, rendant la production de vins de haute qualité de plus en plus difficile (Comte *et al.*, 2022). En revanche, le déplacement des isothermes vers des latitudes et des altitudes plus élevées permet à de nouvelles régions, comme le nord-ouest de l’Europe et la Belgique, de bénéficier de conditions climatiques plus favorables à la viticulture (Doutreloup *et al.*, 2022).

Afin d’évaluer l’aptitude de chaque région à produire des vins de cépages spécifiques, des indices bioclimatiques basés sur la température comme l’indice héliothermique de Huglin ou l’indice de fraîcheur des nuits ont été créés (Comte *et al.*, 2022). La phénologie de la vigne, étant fortement influencée par le climat, celle-ci permet également d’en apprendre davantage sur le contexte climatoviticole d’une région (Jones *et al.*, 2005). En effet, l’étude de la phénologie est un excellent outil pour comprendre comment le réchauffement climatique impacte la viticulture (Jones *et al.*, 2005).

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente la vigne, sa physiologie et sa phénologie. Le deuxième chapitre décrit les méthodes utilisées tandis que le troisième chapitre présente les résultats obtenus. Le dernier chapitre est dédié à la discussion des résultats.

## 1.2 Vigne

### 1.2.1 Description générale et cépages

La vigne est une plante de la famille des *Vitaceae* (Reynier, 2016). Cette famille regroupe des plantes sous forme de lianes ou d'arbrisseaux dotés de tiges le plus souvent sarmenteuses, bien qu'elles puissent parfois être herbacées (Reynier, 2016). De plus, les vitacées se distinguent par leur capacité à grimper, notamment grâce aux vrilles opposées à leurs feuilles (Reynier, 2016).

La famille des *Vitaceae* est composée de dix-sept genres, parmi lesquels figure le genre *Vitis* (voir figure 1.1), auquel appartiennent les vignes cultivées (Reynier, 2016). Ce genre, constitué de plantes vivaces originaires des régions chaudes ou tempérées de l'hémisphère nord, se subdivise en deux sous-genres (Reynier, 2016). D'une part, le sous-genre *Muscadinia*, originaire des zones chaudes et humides d'Amérique, se distingue par trois espèces, dont une seule (*V. rotundifolia*) est cultivée pour la consommation de raisins frais, la production de vin ainsi que la fabrication de confitures, gelées et marmelades (Reynier, 2016). D'autre part, le sous-genre *Vitis* (anciennement *Euvitis*) qui comprend une soixantaine d'espèces originaires d'Europe, d'Asie et d'Amérique (André et al., 2017). Parmi cette soixantaine d'espèces, citons l'espèce asiatique *V. amurensis*, reconnaissable par ses raisins peu sucrés et très acides, ainsi que l'espèce américaine *V. labrusca* caractérisée par son goût foxé et cultivée aux États-Unis pour la production de jus, de marmelades et de vin (Reynier, 2016; André et al., 2017). Cependant, parmi les quelques soixante espèces du sous-genre *Vitis*, *Vitis vinifera*, originaire d'Europe et d'Asie occidentale, se démarque particulièrement en tant qu'espèce majeure pour la viticulture, assurant l'essentiel de la production mondiale de vin (Reynier, 2016). Outre son importance dans la production de raisins de cuve, l'espèce *Vitis vinifera* est également cultivée pour ses raisins de table et ses raisins secs (Reynier, 2016). Au sein de cette espèce, plus de 5000 cépages sont répertoriés (Reynier, 2016).

Le terme « cépage » est utilisé pour désigner une variété spécifique de vigne au sein d'une espèce (Reynier, 2016). Un cépage ne constitue pas une population homogène car chaque variété a été obtenue par la sélection, au cours du temps, d'individus au sein d'une population sauvage (Reynier, 2016). Un cépage est donc composé d'individus qui diffèrent sur le plan génétique mais qui possèdent des caractéristiques morphologiques et technologiques assez proches pour être regroupés sous un même nom (Reynier, 2016). L'usage de chaque cépage est déterminé sur base des caractéristiques morphologiques de ses grappes et de ses baies (Reynier, 2016). Ainsi, on distingue les cépages de cuve, les cépages de table, ceux destinés au séchage, ainsi que les cépages à usages multiples (Reynier, 2016).

En ce qui concerne la Belgique, le nombre de cépages plantés s'élevait à plus de quatre-vingt-cinq en 2017 (Direction de l'Inspection économique, 2018). Le Chardonnay était le cépage le plus représenté avec 121,36 hectares plantés, suivi du Pinot noir avec 40,15 hectares et du Pinot gris avec 21,63 hectares

([Direction de l'Inspection économique, 2018](#)). Dans les dix premières places, se trouvent également l'Auxerrois (20,07 ha), le Pinot blanc (12,21 ha), le Müller-Thurgau (6,92 ha) ou encore le Dornfelder (6,73 ha) ([Direction de l'Inspection économique, 2018](#)). Il est également important de mentionner la présence aux 5<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup> et 8<sup>e</sup> places de cépages dits résistants ([Direction de l'Inspection économique, 2018](#)). En effet, le Johanniter, le Regent et le Solaris sont des cépages hybrides, aussi appelés « cépages interspécifiques », créés pour mieux résister aux maladies que peut connaître la vigne et ainsi, diminuer fortement les traitements et l'usage de pesticides ([Vanel, 2022](#)).

Dans le cadre de ce mémoire, j'ai décidé de travailler sur le Chardonnay et le Pinot noir car ce sont les deux cépages les plus répandus en Belgique. De plus, l'ensemble des modèles phénologiques utilisés par la suite ont été paramétrisés pour le Chardonnay ainsi que le Pinot noir, ce qui n'est pas le cas pour tous les cépages présents sur le territoire belge. La liste complète des cépages plantés en Belgique en 2017 peut être consultée à l'annexe A.

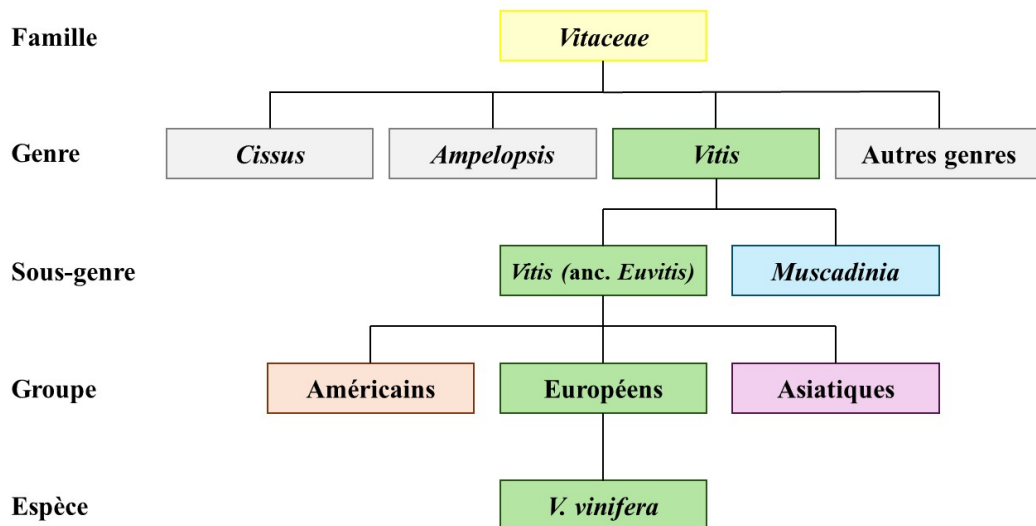


FIGURE 1.1 – Classification phylogénétique d'après [Zah-Bi \(2014\)](#).

### 1.2.1.1 Chardonnay

Le chardonnay B est un cépage blanc qui est apparu en France au début du XX<sup>e</sup> siècle, résultat présumé d'un croisement naturel entre le pinot et le gouais B (Reynier, 2016; Raisin et Ménard, 2022a). Traditionnellement cultivé en Bourgogne et en Champagne, le chardonnay se distingue par ses petites grappes compactes à baies sphériques ou légèrement allongées, ainsi que par sa capacité à s'adapter à de nombreux climats, ce qui explique sa présence dans de nombreuses régions du monde (Reynier, 2016; Raisin et Ménard, 2022a). Ce cépage se caractérise par un débourrement précoce, une maturité tardive de 1<sup>re</sup> époque<sup>1</sup> et une grande sensibilité aux gelées de printemps (Reynier, 2016). Il est également sujet au stress hydrique en terrains secs (Reynier, 2016).



FIGURE 1.2 – Chardonnay (Viala *et al.*, 1901).

### 1.2.1.2 Pinot noir

Le pinot noir N est un cépage noir cultivé en Champagne, en Bourgogne ou encore en Alsace qui se distingue par ses petits grains serrés (Reynier, 2016; Raisin et Ménard, 2022b). Réintroduit en France en 1395 après l'interdiction de la culture du gamay par le duc de Bourgogne, Philippe le Hardi, le pinot noir est considéré comme une des plus anciennes variétés de raisin (Raisin et Ménard, 2022b). Caractérisé par sa sensibilité aux gelées de printemps, sa maturité de 1<sup>re</sup> époque et sa grande résistance aux gelées d'hiver, ce cépage s'accommode mieux aux climats tempérés qu'aux climats chauds (Reynier, 2016).



FIGURE 1.3 – Pinot noir (Viala *et al.*, 1901).

---

1. Un cépage est catégorisé de « 1<sup>re</sup> époque » lorsqu'il mûrit cinq jours avant ou après le chasselas (Classification de Pulliat) (Reynier, 2016).

### 1.2.2 Yeux et bourgeons

La vigne présente plusieurs types de bourgeons et d'yeux<sup>2</sup> (voir figure 1.4) (Reynier, 2016). Sur le rameau en croissance, on distingue les types suivants de bourgeons et d'yeux :

- 1) Bourgeon terminal : il se situe à l'extrémité du rameau et assure la croissance de ce dernier par multiplication cellulaire et différenciation de nouveaux mérithalles, nœuds, feuilles, bourgeons et vrilles (Reynier, 2016). Le bourgeon terminal meurt et tombe à la fin de la croissance du rameau (Reynier, 2016).
- 2) Prompt-bourgeon : on retrouve ce bourgeon au niveau de chaque nœud et à l'aisselle de la feuille (Reynier, 2016). Situé à côté du bourgeon latent, le prompt-bourgeon est apte à se développer lors de son année de formation (Benmehaia, 2017; Reynier, 2016). Il donne ainsi naissance à un rameau court appelé « entre-cœur » ou « rameau anticipé » (Benmehaia, 2017). Ce type de rameau peut être fructifère et porter des petites grappes appelées « grapillons » (Benmehaia, 2017).
- 3) Œil latent (voir figure 1.5) : situé au niveau de chaque nœud, comme le prompt-bourgeon, et composé de plusieurs bourgeons, un bourgeon primaire encadré par un ou plusieurs bourgeons secondaires plus petits, il ne se développe que l'année suivant celle de sa formation, après une phase de dormance (Reynier, 2016; Benmehaia, 2017). Les différents bourgeons d'un même œil sont protégés par la bourre, et extérieurement, par deux écailles (Reynier, 2016). Généralement, le bourgeon primaire est le seul à se développer et à donner naissance au rameau l'année suivante (Reynier, 2016). C'est l'œil latent qui nous intéresse dans le cadre de ce mémoire.

Sur le cep, on retrouve :

- 1) Yeux de la couronne : situés au niveau du point d'attache du sarment sur le bois de deux ans ou sur le vieux bois, ces yeux sont plus ou moins apparents (Reynier, 2016). Ils ne se développent généralement pas et deviennent par la suite des bourgeons du vieux bois (Benmehaia, 2017). Le plus développé d'entre-eux est appelé le « bourillon » (Reynier, 2016).
- 2) Yeux du vieux bois : il s'agit d'anciens yeux latents qui se situent dans le bois de plusieurs années (Benmehaia, 2017; Reynier, 2016). Alors que certains restent à l'état latent pendant toute la durée de vie du pied de vigne et peuvent se faire progressivement recouvrir par le bois ou bien rester visibles, d'autres peuvent aussi donner naissance à des rameaux appelés « gourmands » (Benmehaia, 2017).

---

2. Selon Reynier (2016), un œil est un complexe de bourgeons élémentaires rassemblés sous des écailles communes.

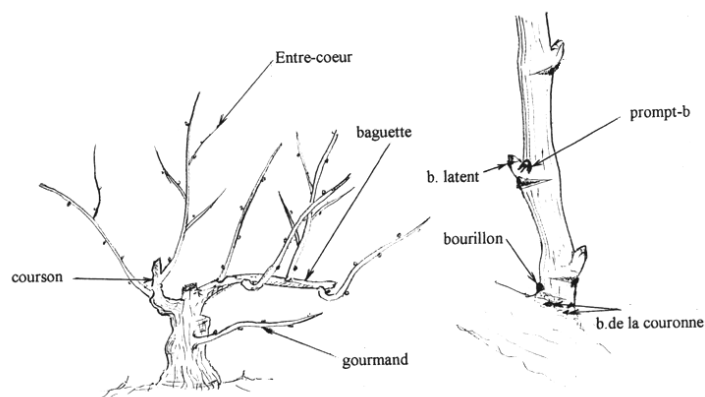


FIGURE 1.4 – Différents types de bourgeons sur un pied de vigne (Benmehaia, 2017).

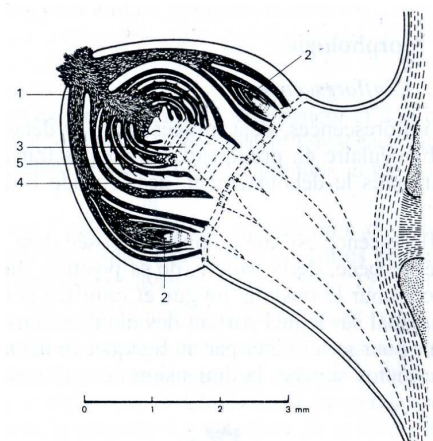


FIGURE 1.5 – Coupe schématique d'un œil latent : 1.bourgeon primaire ; 2.bourgeons secondaires ; 3.cône végétatif du bourgeon principal ; 4.feuille primordiale ; 5.ébauche d'inflorescence (Reynier, 2016).

### 1.2.3 Physiologie

#### 1.2.3.1 Cycle sexué

La vigne est une plante pérenne, ce qui signifie que son cycle sexué ne se déroule pas en une seule saison (Reynier, 2016). En outre, les plantes pérennes, comme la vigne, ont la particularité de pouvoir se reproduire de manière asexuée, notamment par bouturage, marcottage ou greffage, avant d'atteindre la maturité nécessaire pour se reproduire de manière sexuée (Reynier, 2016).

Le cycle sexué de la vigne, incluant la croissance et le développement des plantes issues de semis, comprend quatre phases :

- 1) Une phase embryonnaire initiée par la fécondation de l'ovule par les gamètes mâles provenant du pollen, et qui se poursuit jusqu'à ce que la graine atteigne sa pleine maturité (Reynier, 2016) ;
- 2) Une phase juvénile démarrant lors de la germination, se prolongeant avec la croissance et le développement de l'embryon, et prenant fin dès l'instant où la plante acquiert la capacité de répondre aux stimuli de l'initiation florale (Reynier, 2016) ;
- 3) Une phase de transition, s'étendant sur plusieurs années entre la phase juvénile et la phase adulte de la vigne, caractérisée par des changements morphologiques et physiologiques qui confèrent à la plante, à un moment donné, la capacité de répondre aux stimuli de l'initiation florale (Reynier, 2016) ;
- 4) Une phase adulte durant laquelle les conditions favorables à l'initiation florale se mettent en place, suivies de la floraison et de la fécondation, ce qui permet la production d'une récolte et de nouvelles graines (Reynier, 2016).

Comme indiqué sur la figure 1.6, pendant la phase de transition du cycle sexué, la vigne suit un cycle végétatif sans initiation florale puis, se développe annuellement selon un cycle qui est à la fois végétatif et reproducteur lorsqu'elle entre dans la phase adulte et qu'elle est ainsi capable de répondre aux stimuli de l'initiation florale (Reynier, 2016). Durant son cycle végétatif, la vigne assure la croissance et le développement des organes végétatifs (rameaux, feuilles, vrilles, racines), leur pérennité par le stockage de réserve dans les bois et les racines et la mise en dormance des bourgeons (Reynier, 2016). En parallèle, le cycle reproducteur de la vigne se caractérise par la croissance, le développement et la maturation des organes reproducteurs tels que les inflorescences, les fleurs, les baies et les pépins (Reynier, 2016).



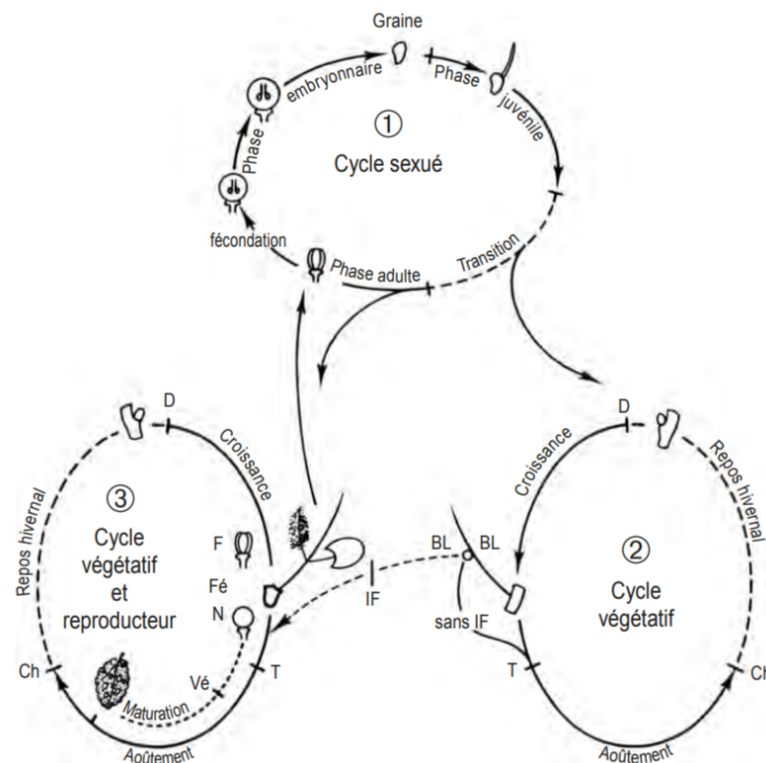


FIGURE 1.6 – Cycle biologique de la vigne (Reynier, 2016). Après fécondation, les ovules fécondés débutent le cycle sexué (1) ; pendant la phase de transition, la vigne suit un cycle végétatif sans initiation florale (2) ; lors de la phase adulte, la vigne suit un cycle qui est à la fois végétatif et reproducteur (3) ; IF : initiation florale, D : débourrement, T : arrêt de croissance, Ch : chute des feuilles, F : floraison, Fé : fécondation, N : nouaison, Vé : véraison, M : maturité (Reynier, 2016).

### 1.2.3.2 Cycle végétatif

Le cycle végétatif de la vigne commence au printemps de l'année  $N$  avec le stade du débourrement, caractérisé par un gonflement des bourgeons, un écartement des écailles protectrices et une apparition de la bourre (duvet végétal) (Reynier, 2016). S'en suit une période de croissance des différents organes végétatifs de la plante, et ce, jusqu'à ce que débute le processus d'aoûtement durant lequel les rameaux changent d'aspect, généralement vers le mois d'août (Reynier, 2016). Lors de l'aoûtement, l'épiderme des rameaux, tendre et vert, se transforme en une écorce dure et brune, aux parois cellulaires lignifiées (Reynier, 2016). La période d'aoûtement se termine avec la chute des feuilles en automne qui marque l'entrée de la vigne dans la phase de repos végétatif (Reynier, 2016). Il se déroule simultanément au cycle reproducteur comme le montre la figure 1.7.

### 1.2.3.3 Cycle reproducteur

Le cycle reproducteur de la vigne débute lors de l'année  $N-1$  avec l'initiation inflorescentielle dans les bourgeons latents (Reynier, 2016). Au printemps de l'année  $N$ , il se poursuit avec l'initiation des fleurs dans ces mêmes bourgeons latents (Reynier, 2016). Ensuite, le cycle se caractérise par les étapes successives suivantes : la floraison, qui se manifeste par l'épanouissement des fleurs ; la nouaison, durant laquelle les ovaires se transforment en fruits ; et la véraison, une phase d'évolution rapide des caractéristiques physiques et biochimiques du raisin (Reynier, 2016). Enfin, le cycle reproducteur de la vigne se termine avec la maturité des baies de raisin (Reynier, 2016). Il se déroule simultanément au cycle végétatif comme le montre la figure 1.7 ci-dessous.

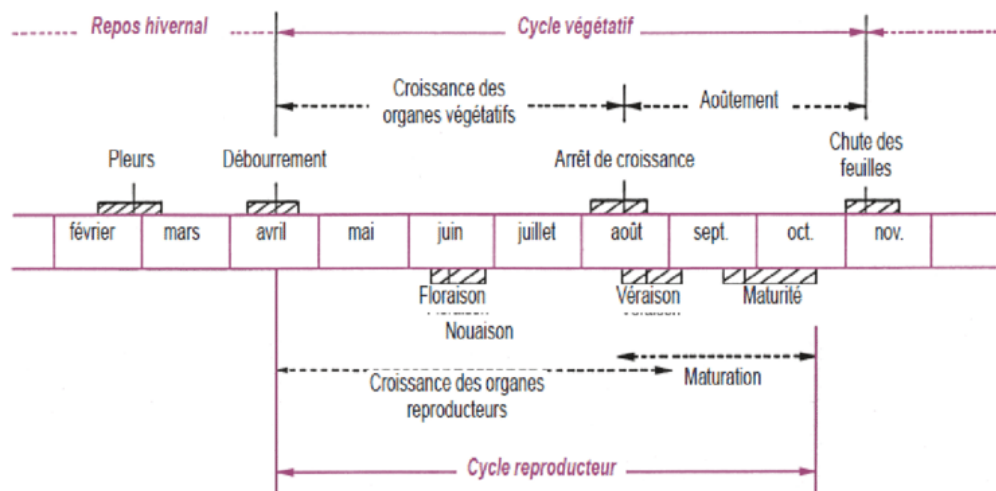


FIGURE 1.7 – Cycles végétatif et reproducteur de la vigne (Reynier, 2016).

### 1.2.4 Phénologie

D'après [Bloesch et Viret \(2008\)](#), la phénologie est la science qui étudie l'apparition d'événements annuels périodiques dans le monde vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat. Il s'agit donc d'étudier les liens entre ces événements, appelés stades phénologiques, qui représentent les différentes étapes des cycles végétatif et reproducteur de la vigne, avec les variations saisonnières de variables climatiques telles que, par exemple, la température ou l'humidité du sol ([Bloesch et Viret, 2008](#); [Reynier, 2016](#); [Pellegrino \*et al.\*, 2020](#)).

Les différents stades phénologiques de la vigne ont été répertoriés à travers diverses échelles de notation phénologique et se sont vus attribuer un code spécifique ([Bloesch et Viret, 2008](#); [Reynier, 2016](#)). Les deux échelles de notation phénologique les plus courantes sont les échelles proposées par [Baggiolini \(1952\)](#) et [Eichhorn et Lorenz \(1977\)](#). La première échelle décrit seize stades phénologiques distincts, chacun étant représenté par une lettre de A à P ([Bloesch et Viret, 2008](#); [Reynier, 2016](#)). La seconde échelle utilise un système de codage numérique allant de 01 à 47, couvrant vingt-deux stades phénologiques différents ([Bloesch et Viret, 2008](#); [Reynier, 2016](#)). Outre les échelles proposées par Baggiolini et par Eichhorn et Lorenz, une autre échelle de notation phénologique tend à être de plus en plus populaire ([Reynier, 2016](#)). Il s'agit d'une échelle universelle utilisant un code décimal pour décrire les stades phénologiques de toutes les espèces végétales appelée échelle BBCH ([Reynier, 2016](#)). Il convient de noter que la définition des différents stades phénologiques peut varier en fonction de l'échelle utilisée ([Bloesch et Viret, 2008](#)). De plus, les phénomènes végétatifs décrits ou leur période d'apparition peuvent différer d'un cépage à l'autre ([Bloesch et Viret, 2008](#)). Les trois échelles mentionnées dans ce mémoire peuvent être consultées à l'annexe B.

Dans le cadre de ce mémoire, j'ai décidé de travailler sur les quatre stades phénologiques suivants : le débourrement (voir figure 1.8), la floraison (voir figure 1.9), la véraison (voir figure 1.10) et la maturité. L'étude de la levée de la dormance a également été intégrée à ce mémoire au vu de sa grande influence sur le débourrement de la vigne.



FIGURE 1.8 – Débourrement (Destrac-Irvine *et al.*, 2017).



FIGURE 1.9 – Floraison (Destrac-Irvine *et al.*, 2017).



FIGURE 1.10 – Véraison (Destrac-Irvine *et al.*, 2017).

### 1.2.4.1 Dormance

Selon [Lang \(1987\)](#), la dormance est la suspension temporaire de la croissance visible de toute structure végétale contenant un méristème. Concernant la vigne, cette période phénologique prépare les bourgeons dormants au débourrement, c'est-à-dire à leur développement au printemps ([Pellegrino et al., 2020](#)). La dormance *sensu lato* peut être divisée en trois étapes successives :

- 1) Paradormance ou prédormance : cette phase se caractérise par le fait que les bourgeons latents nouvellement formés ne débourrent pas en raison de la dominance apicale exercée par le bourgeon terminal et le prompt-bourgeon ([Reynier, 2016](#); [Li, 2017](#)). Il s'agit d'une inhibition de croissance régulée par des facteurs physiologiques exogènes à la région dormante ([Ricard, 2014](#)).
  
- 2) Endodormance ou dormance *sensu stricto* : elle correspond à l'inhibition du développement du bourgeon latent en raison de facteurs tels que la régulation hormonale, le raccourcissement de la durée du jour ou encore la diminution de la température de l'air ([Pellegrino et al., 2020](#); [Li, 2017](#)). La levée de l'endodormance, qui indique que les bourgeons sont physiologiquement prêts à débourrer, nécessite une période de refroidissement suffisamment importante. ([Pellegrino et al., 2020](#)). Il est à noter que chaque cépage possède des besoins en froid qui diffèrent des autres variétés, mais que ces besoins en froid restent constants, que la période froide soit entrecoupée de périodes chaudes ou non ([Pellegrino et al., 2020](#)). L'endodormance peut-être divisée en trois étapes successives :
  - l'entrée en dormance qui marque la perte de la capacité à débourrer des bourgeons sous le contrôle de l'acide abscissique ([Reynier, 2016](#)) ;
  - la dormance durant laquelle les bourgeons restent à l'état de repos sans subir de profondes modifications ([Li, 2017](#)) ;
  - la levée de dormance qui correspond au retour progressif de l'appétitude au débourrement des bourgeons sous l'action des premiers froids automnaux ([Reynier, 2016](#)).
  
- 3) Écodormance ou post-dormance : cette phase marque le retour de la faculté des bourgeons à débourrer ([Reynier, 2016](#); [Li, 2017](#)). Cependant, ceux-ci restent au repos à cause de conditions climatiques peu propices ([Reynier, 2016](#)). Il est donc nécessaire, une fois l'endodormance levée, que les conditions environnementales, principalement la température de l'air et du sol ainsi que de la teneur en eau du sol, soient favorables afin que l'écodormance soit, à son tour, levée ([Pellegrino et al., 2020](#)). En d'autres termes, la vigne doit être exposée à des températures suffisamment élevées pour répondre à son besoin en chaleur et permettre ainsi la levée de l'écodormance et le débourrement ([Pellegrino et al., 2020](#)).

### 1.2.4.2 Débourrement

Avant de connaître le débourrement, stade phénologique du cycle végétatif annuel de la vigne, les bourgeons latents, qui se forment sur les sarments de la vigne lors de l'année N-1, passent par les différentes étapes de la dormance (Pouget, 1988). Durant la phase de post-dormance, ces bourgeons ne sont plus physiologiquement dormants, leur dormance n'étant plus qu'apparente (Reynier, 2016). Cependant, le débourrement ne se produit pas encore car les températures, en plein hiver, sont trop froides (Pouget, 1988). Les bourgeons connaissent par contre un processus de croissance qui se déroule dès que la température de l'air atteint et dépasse un certain seuil (Reynier, 2016). Celui-ci débute dans l'apex du bourgeon et se poursuit jusqu'au débourrement (Pouget, 1988). À cet égard, il existe, deux types de seuils :

- 1) Seuil de croissance réelle : situé entre 4 et 5°C, ce seuil correspond à la température à laquelle l'activité cellulaire reprend (Reynier, 2016). Initialement de courte durée et de faible intensité, cette activité augmente avec la hausse de la température (Reynier, 2016). Cette activité cellulaire entraîne la croissance des organes internes des bourgeons (Reynier, 2016). À mesure que ces organes grossissent, ils provoquent d'abord de manière imperceptible, puis progressivement, l'écartement des écailles et l'apparition de la bourre protectrice (Reynier, 2016). Il est important de noter que les effets journaliers de la température sont cumulatifs (Reynier, 2016).
- 2) Seuil de croissance apparente : également connu sous le nom de « zéro de végétation », ce seuil est situé entre 8 et 12°C, avec une valeur couramment fixée à 10°C (Reynier, 2016). Il correspond à la température moyenne journalière à partir de laquelle le débourrement se produit (Reynier, 2016).

La première manifestation visible du débourrement est le gonflement des bourgeons latents qui provoque l'écartement des écailles protectrices et l'apparition de la bourre (Reynier, 2016). Parmi les stades des échelles de notation phénologiques établies par Baggiolini (1952) et Eichhorn et Lorenz (1977), les stades « bourgeon dans le coton » (stade B ou 03) et « pointe verte » (stade C ou 05) sont ceux qui semblent être les plus représentatifs du débourrement, avec généralement une préférence pour le premier (voir figure 1.11 ci-dessous) (Reynier, 2016). Tous les bourgeons n'ayant pas un débourrement simultané, la date de débourrement est fixée au jour où 50% des bourgeons sont au stade B de l'échelle de Baggiolini (1952) (ou au stade 03 de l'échelle de Eichhorn et Lorenz (1977)) (Reynier, 2016). Il est également important de souligner qu'il peut y avoir un écart de près de trois semaines entre le débourrement des cépages précoces et celui des cépages les plus tardifs (Reynier, 2016).

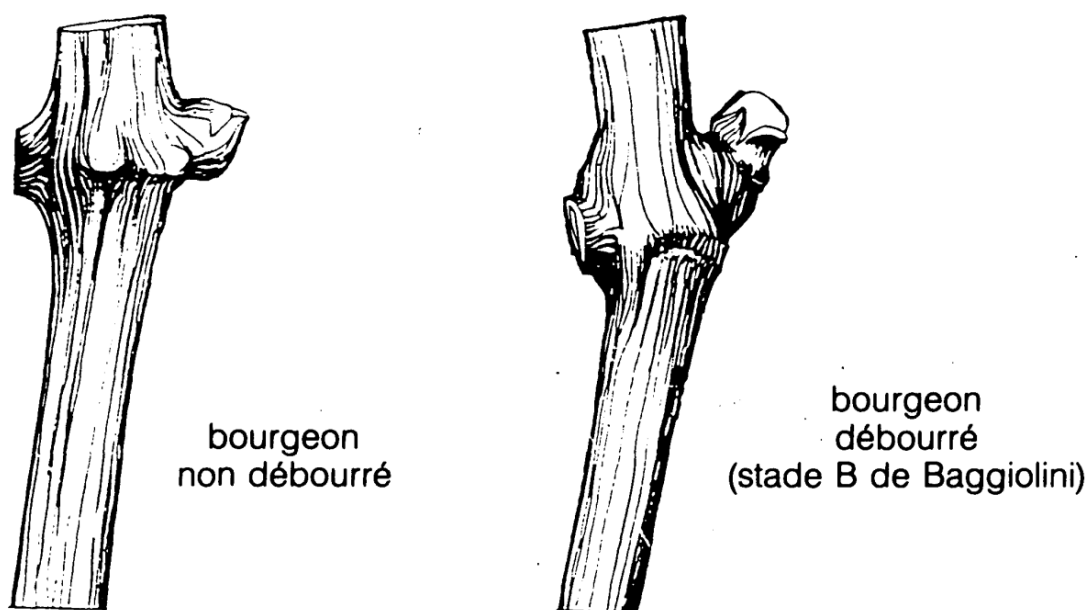


FIGURE 1.11 – Stade de débourrement des bourgeons de la vigne (Pouget, 1988).

#### 1.2.4.3 Floraison

Le cycle reproducteur de la vigne s'effectue sur deux années successives et est interrompu pendant l'hiver (Lebon, 2005). En effet, il débute lors de l'année N-1 et se poursuit au printemps de l'année N (Reynier, 2016). Il est ainsi possible de distinguer deux périodes séparées par une phase de dormance (Lebon, 2005).

Lors de l'année N-1, l'initiation inflorescentielle a lieu (Lebon, 2005; Reynier, 2016). Il s'agit de la formation et du développement des primordia foliaires et inflorescentiels, futures feuilles et inflorescences (Lebon, 2005). Ce processus s'interrompt lors l'entrée en dormance des bourgeons latents (Reynier, 2016). Pendant cette phase de dormance, les bourgeons latents contiennent donc des inflorescences et des feuilles immatures (Lebon, 2005).

Pendant l'année N, quelques jours avant le débourrement, l'initiation des fleurs commence dans les bourgeons latents et se poursuit jusqu'à la floraison (Reynier, 2016). L'initiation des fleurs correspond à la différenciation des pièces florales telles que les pétales, les sépales, l'androcée et le gynécée (Reynier, 2016). En parallèle, l'initiation inflorescentielle reprend également quelques jours avant le débourrement, formant des ramifications d'ordre 2 et 3 sur la rafle (Reynier, 2016). Ensuite, entre le débourrement et la floraison, la phase visible du cycle reproducteur de la vigne débute : les inflorescences croissent et se développent (Lebon, 2005; Reynier, 2016). Le premier stade repère de cette phase visible est le stade F de l'échelle de Baggioolini (1952), environ trois à quatre semaines après le débourrement, lorsque les inflorescences deviennent

visibles (Lebon, 2005; Reynier, 2016). Par la suite, les inflorescences se séparent grâce à l'allongement des entre-nœuds, bien que les fleurs restent agglomérées, ce qui correspond au stade G de l'échelle de Baggiolini (1952) (Lebon, 2005; Reynier, 2016). Enfin, environ deux mois après le débourrement, les boutons floraux se séparent et les pédicelles des fleurs s'allongent, atteignant ainsi le stade H de l'échelle de Baggiolini (1952) (Lebon, 2005; Reynier, 2016).

En mai ou juin, la floraison des vignes se manifeste par l'anthèse, le moment où les fleurs s'épanouissent pleinement, à une date qui varie en fonction du cépage, des conditions climatiques de l'année ou encore de la vigueur et de l'âge des souches (Reynier, 2016). Lors de l'épanouissement, les capuchons floraux des fleurs se détachent du réceptacle floral sous l'effet de la poussée des filaments staminaux, puis tombent, exposant ainsi l'ovaire et permettant l'étalement des étamines autour de celui-ci (Lebon, 2005). La déhiscence des capuchons floraux et leur expulsion sont favorisées par l'ensoleillement et la chaleur (minimum 15°C) (Reynier, 2016). À l'inverse, le manque de chaleur mais aussi la pluie et le manque de vigueur des étamines au moment de la floraison peuvent entraver cette expulsion (Reynier, 2016). La floraison peut plus ou moins s'étaler dans le temps selon les conditions climatiques de l'année, de sorte que toutes les fleurs d'une grappe, voire d'une parcelle entière, n'atteignent pas l'anthèse simultanément (Reynier, 2016). Le stade I de l'échelle de Baggiolini (1952) correspond à la floraison dont la date est fixée au jour où 50% des fleurs sont ouvertes (Reynier, 2016).

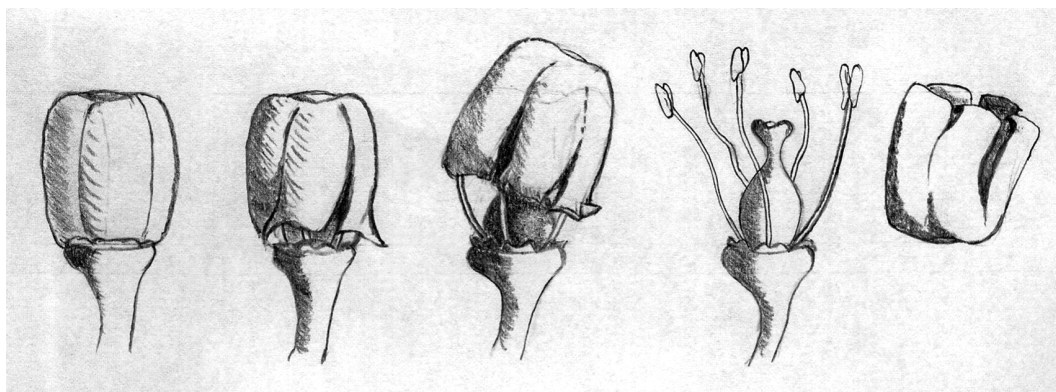


FIGURE 1.12 – Étapes successives lors de la chute du capuchon (Vasconcelos *et al.*, 2009).



### 1.2.4.4 Véraison et maturité

Après la floraison, l'étape de la nouaison débute. Cette phase marque le début de la formation du fruit, où l'ovaire de la fleur se transforme en « baie » suite à la fécondation. S'ensuit le développement des baies, qui se divise généralement en trois périodes distinctes :

- 1) Une période herbacée qui se déroule en parallèle à la croissance des rameaux et des rafles et durant laquelle, les baies, encore vertes et dures, grossissent et agissent comme des organes chlorophylliens en croissance (Reynier, 2016) ;
- 2) Une période de maturation qui démarre à la véraison et se termine à la maturité, marquée par des modifications physiques et biochimiques du raisin (Reynier, 2016) ;
- 3) Une période de surmaturation qui débute après la maturité lorsque les raisins ne sont pas récoltés, caractérisée par une perte d'eau et une modification de la composition chimique des raisins (Reynier, 2016) ;

Durant la période de maturation, le raisin connaît un changement de couleur, un ramollissement, une augmentation de taille, une réduction de son acidité, ainsi qu'une hausse de ses teneurs en sucres, composés phénoliques et composés aromatiques (Reynier, 2016). Ces évolutions reflètent des transformations tant physiques que biochimiques du raisin (Reynier, 2016). La concentration en sucre détermine la concentration en alcool dans le vin final (Parker *et al.*, 2020).

La maturation débute avec la véraison, phase de transition se caractérisant par une accumulation rapide et significative de sucres dans les baies de raisin, ainsi que par un changement de couleur de ces mêmes baies de raisin (Reynier, 2016). Cette brusque et importante accumulation de sucres est due à un changement de sens des migrations dans le cep de vigne : d'une part, les produits de la photosynthèse cessent temporairement d'alimenter les parties vivaces comme le tronc et le système racinaire, pour se diriger exclusivement vers les grappes ; d'autre part, les réserves en sucres accumulées dans ces mêmes parties vivaces sont redistribuées vers les grappes (Reynier, 2016). Après la véraison, la concentration en sucres du raisin continue d'augmenter, entraînant une accumulation de glucose et de fructose dans les baies. Ce phénomène conduit à une diminution du rapport glucose/fructose entre la véraison et la maturité (Reynier, 2016). Les vigneron·ne·s visent des concentrations spécifiques de sucre dans les baies de raisin pour produire différents styles de vin. Par exemple, une concentration de 170 g/L est utilisée pour les vins mousseux, tandis que 190 g/L est choisie pour les vins blancs secs et 200 g/L pour les vins rouges secs (Zavlyanova *et al.*, 2023). Pour chaque cépage, ces concentrations spécifiques sont atteintes à des dates différentes (Zavlyanova *et al.*, 2023).

Au cours de la maturation, la concentration en composés phénoliques des

raisins évolue également (Reynier, 2016). Pendant la véraison, les baies, initialement vertes, perdent leur chlorophylle et prennent une couleur rouge ou jaune, selon que les cépages soient noirs ou blancs (Reynier, 2016). Cette coloration, causée par les anthocyanes (principaux constituants des pigments rouges) et les flavones (principaux constituants des pigments jaunes), concerne principalement la pellicule, tandis que la pulpe reste verte puis devient hyaline. Cependant, pour certains cépages dits teinturiers, la pulpe accumule des anthocyanes (Reynier, 2016). Parallèlement, les tanins (principaux constituants de la couleur, de la structure et de l'astringence des vins) subissent des changements à la fois quantitatifs et qualitatifs dans les pellicules et les pépins (Reynier, 2016).

Dans le cadre de ce mémoire, j'ai choisi de travailler sur les concentrations en sucre suivantes : 170 g/L et 190 g/L pour le chardonnay, ainsi que 170 g/L, 190 g/L et 200 g/L pour le pinot Noir.

## 1.3 Conséquences déjà observées de la hausse des températures

La section suivante offre un aperçu des changements déjà observés en France, en Allemagne ou encore au Luxembourg, tant dans la phénologie de la vigne que dans les indices bioclimatiques, et ce, dans un contexte de changements climatiques marqué par une augmentation des températures. Cette revue de la littérature est grandement inspirée de celle réalisée par [Droulia et Charalampopoulos \(2022\)](#) mais ne se concentre que sur une série de zones viticoles proches de la Belgique, comme l'Alsace, la Champagne, la Bourgogne, la vallée de la Loire, la vallée de la Moselle au Luxembourg, ou certaines régions viticoles allemandes. Cette revue de la littérature ne prétend pas être exhaustive.

### 1.3.1 Indices bioclimatiques

Une étude menée par [Jones \*et al.\* \(2005\)](#) a mis en évidence des tendances à l'augmentation de l'indice héliothermique de Huglin à Colmar et Reims en France, ainsi qu'à Geisenheim en Allemagne. À Colmar, l'analyse des données de 1972 à 2004 révèle une augmentation de 413 unités de cet indice au cours de cette période. Des tendances positives ont également été observées à Reims, entre 1970 et 2004, avec une augmentation de 205 unités, et à Geisenheim, de 1951 à 2003, où l'indice a augmenté de 212 unités.

[Duchêne et Schneider \(2005\)](#) ont également analysé l'évolution de l'indice héliothermique de Huglin à Colmar, mettant en évidence une tendance positive pour la période allant de 1972 à 2003. La tendance identifiée est d'environ +14,3 degrés-jours par an en incluant l'année 2003, et d'environ +11,6 degrés-jours par an en l'excluant (voir figure 1.13 ci-dessous).

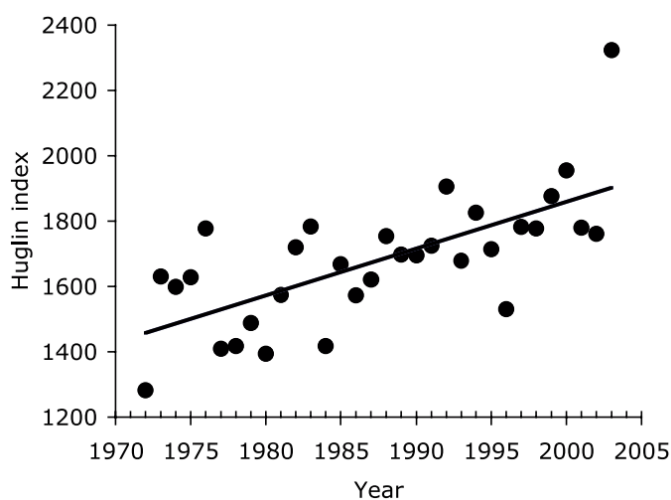


FIGURE 1.13 – Indice héliothermique de Huglin à Colmar (France) entre 1972 et 2003 ([Duchêne et Schneider, 2005](#)).

Dans la vallée de la Loire, [Neethling \*et al.\* \(2012\)](#) ont démontré que l'indice héliothermique de Huglin a considérablement augmenté de 1960 à 2010 dans six localités étudiées. Ces augmentations significatives de l'indice bioclimatique indiquent que les six localités sont passées d'un climat frais, qui caractérisait autrefois la vallée de la Loire, à un climat tempéré, caractéristique de la région viticole de Bordeaux. Les tendances observées oscillent entre +5,63 unités par an à Nantes et +7,96 unités par an à Saumur (voir figure 1.14 ci-dessous).

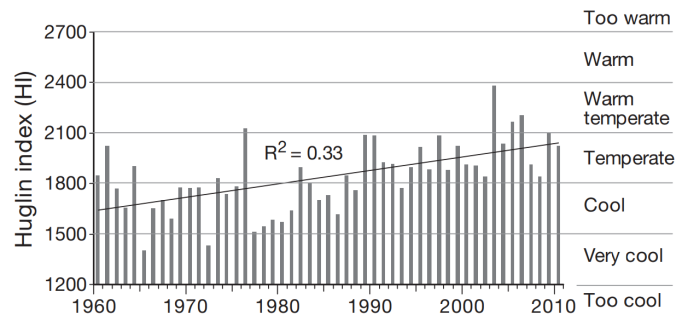


FIGURE 1.14 – Indice héliothermique de Huglin à Saumur (France) entre 1960 et 2010 ([Neethling \*et al.\*, 2012](#)).

De plus, cette étude s'est aussi intéressée à l'indice de fraîcheur des nuits dans les mêmes six localités. Les résultats montrent une augmentation significative de cet indice à Angers et à Bourges entre 1960 et 2010. Sur 50 ans, l'indice a augmenté de 0,9°C à Angers et de 1,1°C à Bourges. Cela indique que, pour les deux localités, l'indice est passé de nuits très fraîches (< 12°C) à nuits fraîches (12 à 14°C).

Enfin, à Hainfeld en Allemagne, [Koch et Oehl \(2018\)](#) ont également observé une tendance positive pour l'indice héliothermique de Huglin sur une période de 40 ans, de 1975 à 2015. La pente de cette tendance est de 13,638 (voir figure 1.15 ci-dessous).

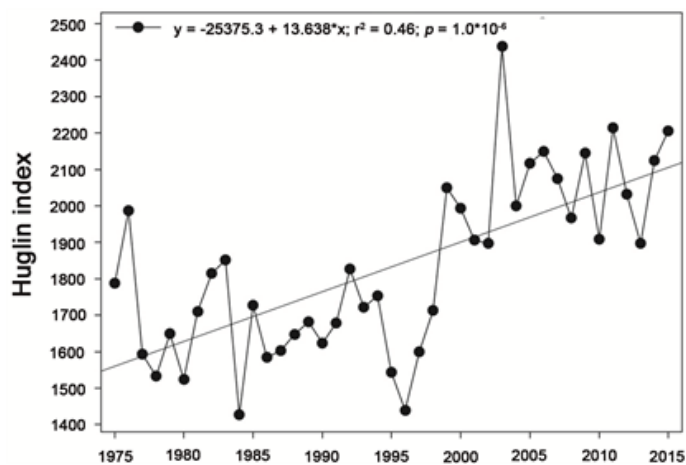


FIGURE 1.15 – Indice héliothermique de Huglin à Hainfeld (Allemagne) entre 1975 et 2015 ([Koch et Oehl, 2018](#)).

### 1.3.2 Stades phénologiques

Premièrement, une étude menée par [Jones \*et al.\* \(2005\)](#) a montré que le réchauffement climatique a entraîné un avancement des événements phénologiques dans la majorité des sites étudiés au cours de la seconde moitié du siècle dernier. Ce phénomène a particulièrement affecté la floraison, la véraison et la récolte (associée à la maturité dans ce mémoire), notamment à Reims pour le pinot noir, en Alsace pour le riesling et en Bourgogne pour le pinot noir. En revanche, pour le débourrement, des tendances significatives n'ont été observées que pour le riesling en Alsace et le pinot noir en Bourgogne. En Allemagne, à Geisenheim, seule une tendance significative concernant la récolte du riesling a été identifiée.

Plus précisément, les tendances observées pour le débourrement montrent un avancement de 14 jours pour la période 1972-2004 en Alsace et de 11 jours pour la période 1952-2004 en Bourgogne. En ce qui concerne la floraison, les tendances révèlent un avancement de 15 jours pour la période 1972-2004 en Alsace, de 14 jours pour la période 1975-2004 à Reims et de 11 jours pour la période 1952-2004 en Bourgogne. Pour la véraison, les tendances indiquent un avancement de 22 jours pour la période 1972-2004 en Alsace, de 22 jours pour la période 1975-2004 à Reims, et de 10 jours pour la période 1952-2004 en Bourgogne. Enfin, pour la récolte (associée à la maturité dans ce mémoire), les tendances montrent un avancement de 23 jours pour la période 1972-2004 en Alsace, de 18 jours pour la période 1975-2004 à Reims, de 16 jours pour la période 1952-2004 en Bourgogne et de 21 jours pour la période 1955-2004 à Geisenheim.

Selon [Droulia et Charalampopoulos \(2022\)](#), l'étude de [Jones \*et al.\* \(2005\)](#) est corroborée par celle de [Duchêne et Schneider \(2005\)](#) qui ont également observé une avancée des événements phénologiques pour le riesling à Bergheim, en Alsace, attribué à une hausse des températures. Les chercheurs ont identifié une avancée de 4 jours par décennie pour le débourrement et la floraison, ainsi qu'une avancée de 1,7 jour par décennie pour la véraison, entre le début des années 1960 et le début des années 2000. De plus, une avancée de deux semaines pour la récolte (associée à la maturité dans ce mémoire) a été observé pour la période 1972-2002.

Ensuite, une étude menée par [Koch et Oehl \(2018\)](#) à Hainfeld, en Allemagne, montre que les événements phénologiques de plusieurs cépages (pinot gris, pinot noir, silvaner, riesling, et müller-thurgau) se produisent plus tôt dans l'année qu'auparavant (voir figure 1.16). Les tendances observées montrent que les dates de débourrement, de floraison et de véraison ont respectivement avancé de 11 à 15 jours, de 18 à 22 jours et de 16 à 22 jours entre 1975-2015.

Par ailleurs, les tendances observées à Hainfeld en ce qui concerne la date des vendanges (associée à la maturité dans ce mémoire) indiquent des avancées de 25 à 40 jours en fonction du cépage (voir figure 1.17).

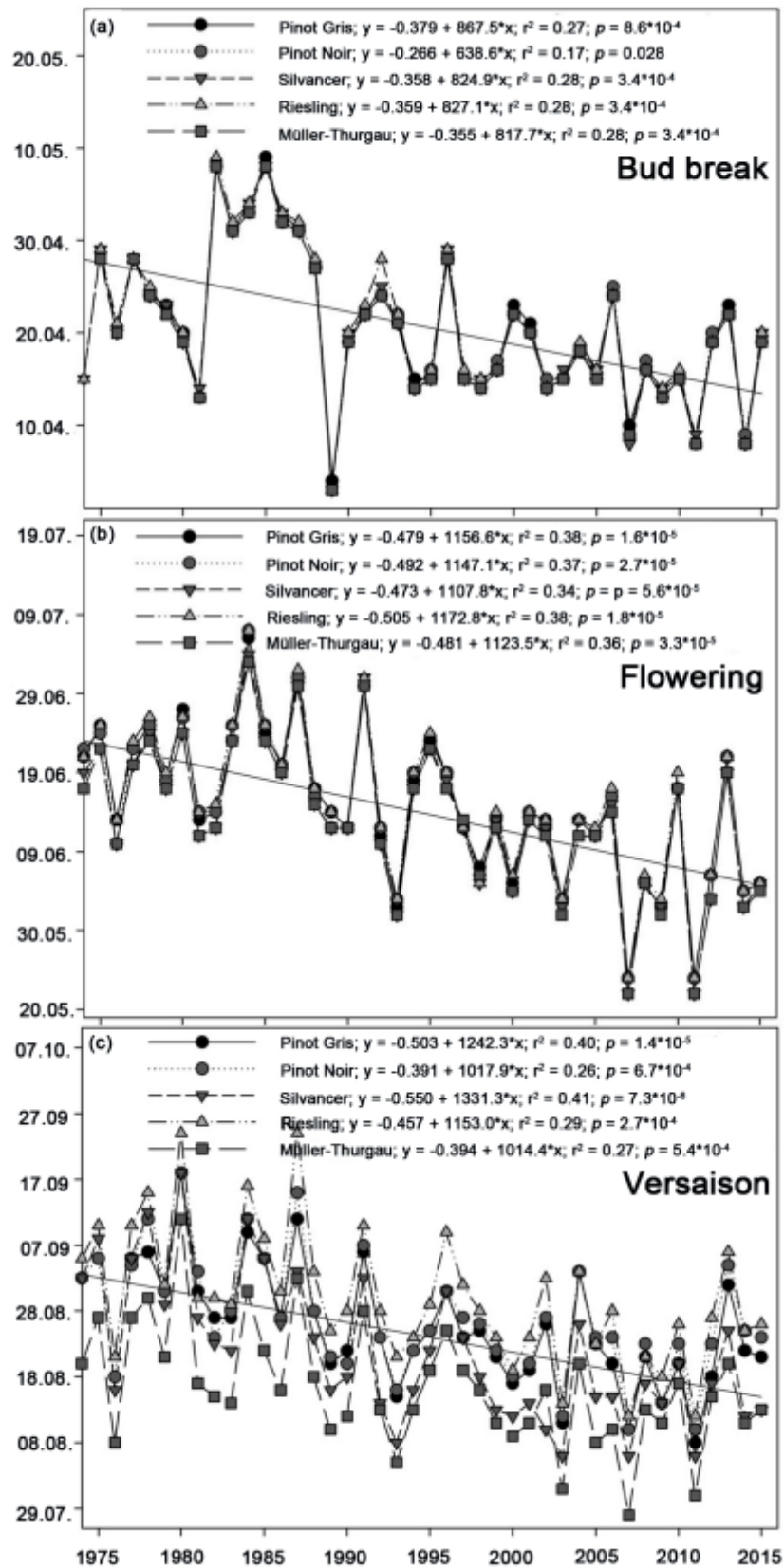


FIGURE 1.16 – Dates annuelles du débourrement, de la floraison et de la véraison pour cinq cépages différents à Hainfeld (Allemagne) entre 1975 et 2015 (Koch et Oehl, 2018).

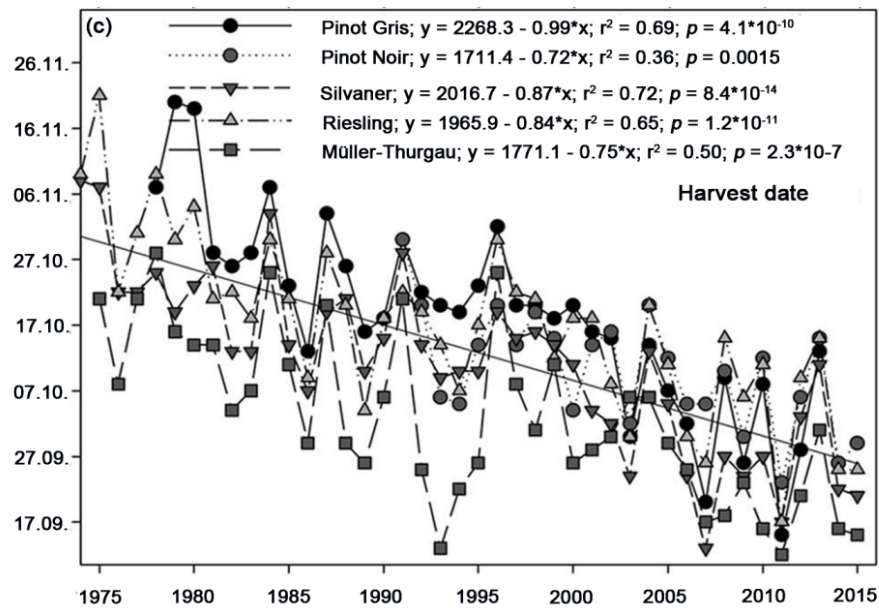


FIGURE 1.17 – Dates annuelles des vendanges pour cinq cépages différents à Hainfeld (Allemagne) entre 1975 et 2015 (Koch et Oehl, 2018).

Puis, une étude menée par [Urhausen \*et al.\* \(2011\)](#) au Luxembourg, dans la vallée de la Moselle, conclut également que les événements phénologiques de plusieurs cépages (auxerrois, elbling, pinot blanc, pinot gris, riesling, rivaner et traminer) se produisent plus tôt dans l’année qu’auparavant. Les tendances observées montrent que les dates de débourrement et de floraison ont avancé d’environ 2 jours par décennie entre 1966 et 2005.

Enfin, une autre étude réalisée en Allemagne, cette fois par [Bock \*et al.\* \(2011\)](#), a également montré des résultats similaires. Cette étude s’est appuyée sur deux séries de données provenant de deux vignobles situés autour de la ville de Wurtzbourg, en Bavière (voir figure 1.18). Pour le premier vignoble, où sont cultivés les cépages müller-thurgau, riesling et silvaner, les tendances observées indiquent qu’entre 1968 et 2010, la floraison a avancé de 3 à 4 jours par décennie, la véraison a avancé de 4 à 6 jours par décennie et la récolte (associée à la maturité dans ce dans mémoire) a avancé de 4 à 5 jours par décennie. Dans le second vignoble, la floraison du silvaner a avancé de 4 jours par décennie entre 1970 et 2010, et la récolte a avancé de 2 jours par décennie entre 1950 et 2010 pour des cépages non spécifiés. Aucun résultat significatif n’a été trouvé concernant le débourrement dans les deux vignobles, et aucune tendance n’est disponible pour la véraison du deuxième vignoble.

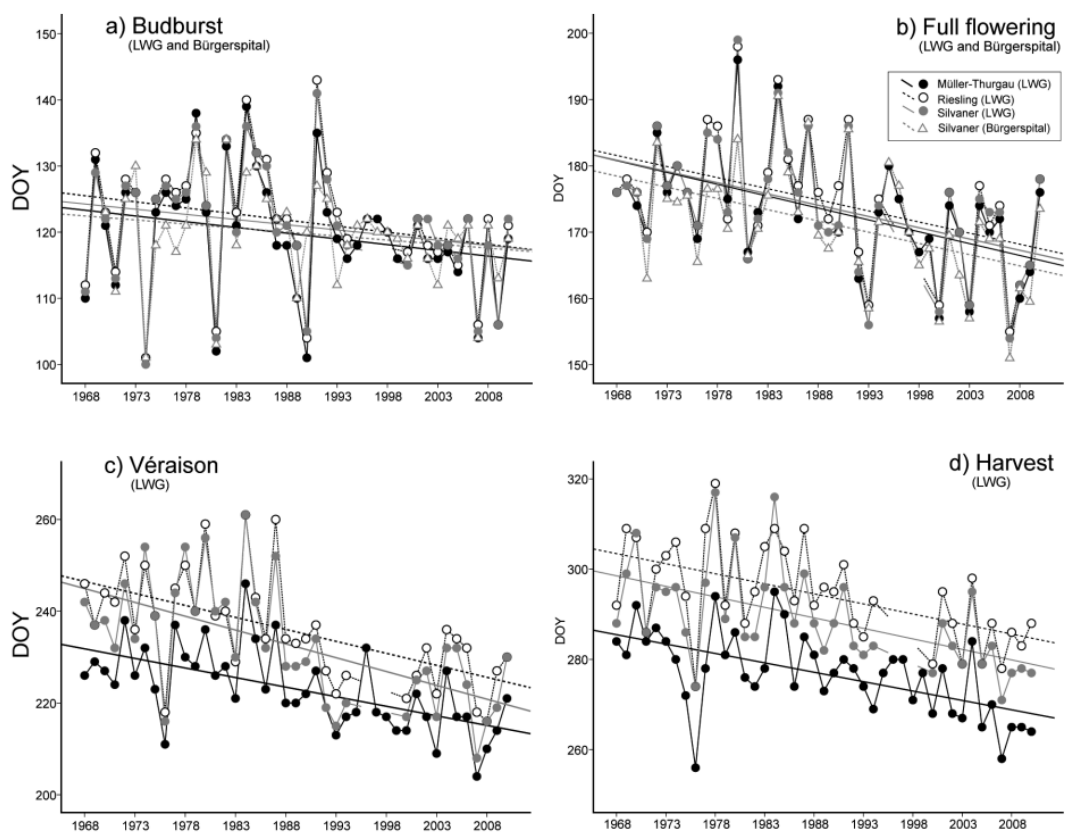


FIGURE 1.18 – Séries chronologiques des principaux événements phénologiques des cépages müller-thurgau, riesling et silvaner cultivés dans le vignoble LWG ainsi que du cépage silvaner cultivé dans le vignoble Bürgerspital (Wurtzbourg, Allemagne) (Bock *et al.*, 2011).



## 1.4 Objectifs

Comme nous avons pu le voir, l'augmentation des températures causée par les changements climatiques entraîne un avancement des stades phénologiques de la vigne, ce qui peut avoir de nombreuses répercussions sur la viticulture. Par exemple, un débourrement plus précoce expose la vigne à un risque prolongé de gel printanier. De même, un avancement de la véraison soumet les grappes à des températures plus élevées pendant la maturation, ce qui influence fortement la composition du raisin en métabolites primaires (Ollat et Touzard, 2024). Et pour produire des raisins de qualité destinés à la production de vin, il est plus qu'important de connaître l'occurrence et la date des différents stades phénologiques de la vigne (Jones *et al.*, 2005).

Ce mémoire vise tout d'abord à souligner l'importance des indices bioclimatiques ainsi que des données phénologiques comme indicateurs de l'évolution climatique passée. Il a également pour objectif d'évaluer l'influence des changements climatiques sur la viticulture en Belgique au cours des dernières décennies. Cela permettra de déterminer si certaines régions du royaume deviennent de plus en plus propices à la culture de la vigne et si certains cépages réussissent à s'adapter à un climat de plus en plus chaud. Ces résultats fourniront aux acteurs du secteur viticole belge, notamment en Wallonie, une meilleure compréhension du contexte climato-viticole dans lequel ils évoluent. Puisque ce travail n'a jamais été réalisé en Belgique, il pourra les aider à sélectionner des cépages plus adaptés au climat belge et à ses futures évolutions, ainsi qu'à ajuster leurs pratiques pour optimiser leurs récoltes.

Pour atteindre cet objectif, nous utiliserons une série de modèles issus de la littérature scientifique permettant de simuler des indices bioclimatiques tels que l'indice héliothermique de Huglin et l'indice de fraîcheur des nuits, ainsi que les quatre principaux stades phénologiques de la vigne : le débourrement, la floraison, la véraison et la maturité. Ces modèles seront alimentés par les sorties du Modèle Atmosphérique Régional (MAR). Sur base des résultats obtenus, des régressions linéaires seront réalisées afin de déceler des tendances pouvant indiquer une évolution du contexte climato-viticole en Belgique au cours des dernières décennies. Différentes cartes seront également produites.

De plus, étant donné que certaines régions du pays ne sont pas propices à la culture de la vigne en raison d'un climat trop froid, seuls les résultats obtenus pour les régions pratiquant déjà la viticulture seront pris en compte. Pour cela, un masque raster sera préalablement élaboré afin de ne sélectionner que les pixels correspondant aux zones viticoles de Belgique.

# Chapitre 2

## Matériels et méthodes

### 2.1 Modèle climatique régional

Dans le cadre de ce mémoire, le modèle climatique régional utilisé est le « Modèle Atmosphérique Régional » (MAR). Ce choix est justifié par le fait que, selon [Doutreloup \*et al.\* \(2022\)](#), bien que MAR présente un biais conduisant à une sous-estimation de l'indice héliothermique de Huglin pour le domaine belge, il se révèle performant dans la simulation des dates des différents stades phénologiques.

Développé initialement pour les régions polaires de l'Antarctique et du Groenland, MAR est un modèle atmosphérique tridimensionnel couplé à un schéma de transfert unidimensionnel entre la surface, la végétation et l'atmosphère ([Doutreloup \*et al.\*, 2022](#); [Kittel, 2021](#)). Il a depuis été adapté aux climats tempérés et tropicaux ([Kittel, 2021](#)).

À ses débuts, MAR ne portait que sur l'atmosphère et ses interactions avec la surface ([Kittel, 2021](#)). Aujourd'hui, il est couplé à des modèles océaniques et de calotte glaciaire, ce qui lui permet de simuler les interactions entre l'atmosphère, l'océan et la dynamique glaciaire ([Kittel, 2021](#)). MAR est largement reconnu comme une référence pour la simulation du climat et du bilan de masse en surface des calottes glaciaires ([Kittel, 2021](#)). De plus, il participe à plusieurs projets de comparaison de modèles climatiques ([Kittel, 2021](#)).

Dans le cadre spécifique de ce mémoire sur la Belgique, nous travaillons avec la version 3.14 du modèle et avec une résolution spatiale de 5 kilomètres sur le domaine belge, soit un maillage horizontal de 120 x 90 points de grille ([Doutreloup \*et al.\*, 2022](#)). Les conditions aux limites du modèle sont déterminées à partir des réanalyses ERA5, qui fournissent des champs de forçage incluant la température de l'air, la pression atmosphérique, le vent, l'humidité spécifique et la température de surface de la mer ([Doutreloup \*et al.\*, 2022](#)). Ces données sont mises à jour toutes les 6 heures, avec une résolution horizontale de 0,25° (environ 31 km) ([Doutreloup \*et al.\*, 2022](#)).

Les sorties de MAR pour la période 1950-2023 étant des données horaires, nous avons utilisé le logiciel CDO pour les convertir en données journalières.

## 2.2 Belgique viticole

Étant donné que la vigne n'est pas cultivée dans toutes les régions de Belgique en raison de conditions climatiques peu favorables, il n'est pas pertinent d'analyser l'indice héliothermique de Huglin, l'indice de fraîcheur des nuits, ou encore les dates des différents stades phénologiques de la vigne entre 1950 et aujourd'hui pour l'ensemble du territoire. Pour cette raison, nous avons restreint nos calculs et traitements statistiques aux cellules de la grille du modèle MAR qui contiennent au moins une parcelle viticole, en utilisant un masque raster. Nous avons désigné cet ensemble de pixels comme étant la « Belgique viticole ».

Dans un premier temps, les parcellaires agricoles wallon et flamand de l'année 2022 ont été fusionnés à l'aide du logiciel SIG libre multiplate-forme QGIS. Ces parcellaires, représentés sous forme de polygones, localisent l'emprise des parcelles agricoles exploitées et indiquent la culture principale pratiquée sur chacune d'elles. Après la fusion, une requête attributaire a été effectuée afin de ne conserver que les parcelles viticoles. Ensuite, toujours avec QGIS, un masque a été créé à partir de cette couche vectorielle regroupant les parcelles viticoles wallonnes et flamandes de 2022, comme illustré par la figure 2.1 ci-dessous. Un masque est une représentation rasterisée de données vectorielles (Hales *et al.*, 2021). Les valeurs dans un masque sont binaires (1 ou 0), indiquant dans ce cas si la cellule contient au moins une parcelle viticole ou non. La dernière étape dans QGIS a été de convertir la couche raster binaire du format TIF au format NetCDF.

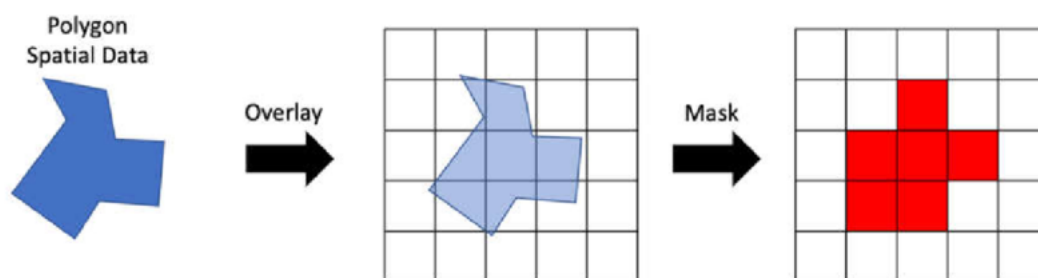


FIGURE 2.1 – Création d'un masque raster à partir de données vectorielles (Hales *et al.*, 2021).

Une fois le masque créé, celui-ci a été interpolé sur la grille du modèle MAR afin de garantir une résolution spatiale identique à celle du modèle atmosphérique régional, soit une résolution de 5 kilomètres pour la Belgique (Doutreloup *et al.*, 2022). Pour ce faire, la méthode d'interpolation spatiale par pondération inverse de la distance a été utilisée. Cette méthode repose sur la première loi de la géographie de Waldo Tobler, qui stipule que « Tout est lié à tout le reste, mais les choses plus proches ont plus d'influence que les choses distantes » (Douba *et al.*, 2019). L'objectif est d'interpoler la valeur  $u$  au centre de la cellule  $x$  à partir des valeurs  $u_i$  au centre des  $n$  cellules voisines  $x_i$  (Liang

*et al.*, 2018). Dans le cadre de ce mémoire, il a été décidé de travailler avec les 4 cellules voisines les plus proches. La distance  $d(x, x_i)$  est la distance entre le centre de la cellule  $x$  et le centre de la cellule  $x_i$  (Liang *et al.*, 2018). Plus cette distance est grande, plus le poids  $w_i(x)$  est faible. Le paramètre de puissance  $p$ , qui est un nombre réel positif, contrôle le poids attribué à chaque cellule (Liang *et al.*, 2018). Dans le cadre de ce mémoire, il a été décidé de travailler avec un paramètre  $p$  égal à 2.

$$u(x) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n w_i(x)u_i}{\sum_{i=1}^n w_i(x)} & \text{si } d(x, x_i) \neq 0 \text{ pour tous les } i \\ u_i & \text{si } d(x, x_i) = 0 \text{ pour certains } i \end{cases} \quad (2.1)$$

Où

$$w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (2.2)$$

Étant donné que l'interpolation du masque sur la grille du modèle MAR fournit des données pour la majorité des cellules dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1 au lieu d'être simplement égales à 0 ou 1, il a été décidé d'attribuer une valeur de 0 aux pixels dont la valeur interpolée est strictement inférieure à 0,5, et une valeur de 1 aux pixels dont la valeur interpolée est supérieure ou égale à 0,5. La figure 2.2 ci-dessous est le masque raster interpolé sur la grille du modèle MAR.

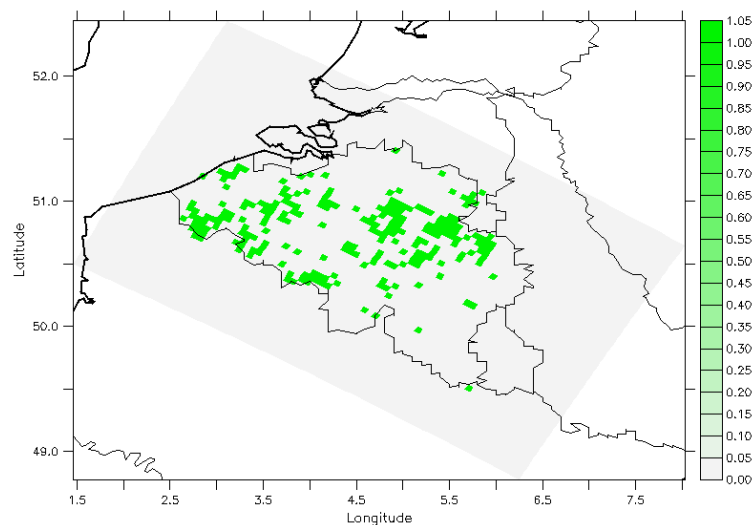


FIGURE 2.2 – Masque raster correspondant à la Belgique viticole

Une fois le masque raster interpolé sur la grille du modèle MAR, celui-ci a été appliqué aux tableaux correspondant à l'indice héliothermique de Huglin, à l'indice de fraîcheur des nuits et aux dates des différents stades phénologiques de la vigne comme sur la figure 2.3 ci-dessous. Cela a permis de restreindre les calculs et les traitements statistiques aux seules cellules de la grille du modèle MAR contenant au moins une parcelle viticole.

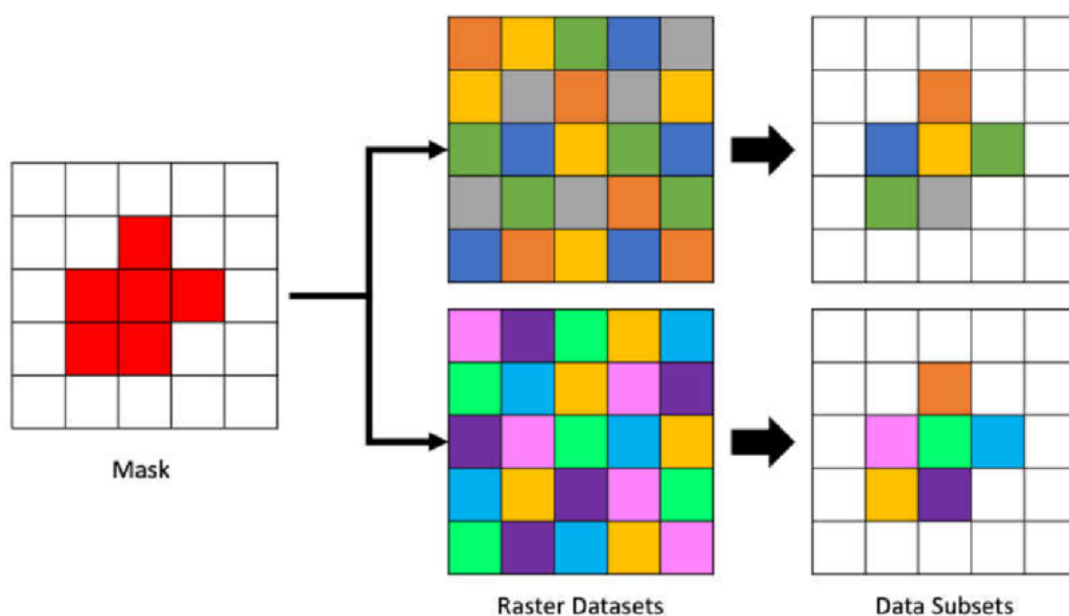


FIGURE 2.3 – Application d’un masque à plusieurs tableaux (Hales *et al.*, 2021).

Enfin, les résultats ont été moyennés sur l’ensemble des pixels correspondant à la Belgique viticole, afin d’obtenir une seule valeur annuelle pour la période allant de 1950 à 2023, en vue du calcul des tendances, qui sera détaillé plus tard dans ce mémoire. Néanmoins, une version non moyennée des données a été conservée pour l’élaboration des cartes qui seront également présentées ultérieurement.

## 2.3 Indices bioclimatiques

### 2.3.1 Indice héliothermique de Huglin

L'indice héliothermique de Huglin (IH) (Huglin, 1978) est un indice bioclimatique fortement corrélé au développement de la vigne et aux caractéristiques des raisins (Le Roux *et al.*, 2017). En conséquence, il est largement utilisé pour identifier les climats propices à la viticulture (Le Roux *et al.*, 2017). Applicable à l'échelle mondiale, cet indice bioclimatique utilise les températures journalières sur une période qui correspond le plus étroitement possible au cycle moyen de la vigne (Tonietto et Carbonneau, 2004). À cette fin, il additionne les moyennes journalières des températures actives ( $> 10^{\circ}\text{C}$ ) moyennes et maximales entre le 1<sup>er</sup> avril et le 30 septembre dans l'hémisphère nord (du 1<sup>er</sup> octobre au 31 mars dans l'hémisphère sud) (Huglin, 1978). De plus, cet indice bioclimatique prend en considération la durée du jour (Tonietto et Carbonneau, 2004), et ce, afin d'intégrer le fait que plus les journées sont longues, plus l'activité photosynthétique est potentiellement importante (Gorisse, 2017). En effet, au-delà de  $40^{\circ}$  de latitude, la somme de température est corrigée par un coefficient de « longueur des jours »  $k$  (Huglin, 1978) dont la valeur varie entre 1,02 à  $40^{\circ}$  de latitude et 1,06 à  $50^{\circ}$  de latitude (Huglin, 1978). Dans les régions situées au-delà de  $50^{\circ}$  de latitude (comme en Belgique), ce paramètre  $k$  est défini par la formule proposée par Hall et Jones (2010).

$$IH = \sum_{01/04}^{30/09} \left[ \frac{T_{m_j} - 10 + T_{x_j} - 10}{2} \right] k \quad (2.3)$$

Où  $T_{m_j}$  est la température moyenne journalière et  $T_{x_j}$  la température maximale journalière.

Classe de climat viticole	Intervalle de classe
Très chaud	$3000 < IH$
Chaud	$2400 < IH \leq 3000$
Tempéré chaud	$2100 < IH \leq 2400$
Tempéré	$1800 < IH \leq 2100$
Frais	$1500 < IH \leq 1800$
Très frais	$IH \leq 1500$

TABLEAU 2.1 – Indice héliothermique de Huglin (Tonietto et Carbonneau, 2004).

### 2.3.2 Indice de fraîcheur des nuits

L'indice de fraîcheur des nuits (IF) (Tonietto et Carbonneau, 2004) est un indice bioclimatique permettant de caractériser une région viticole sur base des températures nocturnes lors de la période de maturation de la vigne. Les températures nocturnes possèdent une forte influence sur les métabolites secondaires, notamment les polyphénols et les arômes (Tonietto et Carbonneau, 2004). Dans l'hémisphère nord, la valeur (en °C) de cet indice bioclimatique correspond à la moyenne des températures minimales journalières du mois de septembre (du mois de mars dans l'hémisphère sud) (Tonietto et Carbonneau, 2004).

$$IF = \frac{\sum_{01/09}^{30/09} T_{n_j}}{30} \quad (2.4)$$

Où  $T_{n_j}$  est la température minimale journalière.

Classe de climat viticole	Intervalle de classe (°C)
Nuits chaudes	$18 < IF$
Nuits tempérées	$14 < IF \leq 18$
Nuits fraîches	$12 < IF \leq 14$
Nuits très fraîches	$IF \leq 12$

TABLEAU 2.2 – Indice de fraîcheur des nuits (Tonietto et Carbonneau, 2004).

## 2.4 Modèles phénologiques

### 2.4.1 Modélisation du débourrement

Une chaîne de modélisation considérée comme pertinente par [Doutreloup et al. \(2022\)](#) a été retenue pour simuler la date du débourrement de la vigne. Celle-ci combine le modèle Smoothed-Utah ([Arlo Richardson et al., 1974](#); [Bonhomme et al., 2010](#)), qui permet de déterminer la date de levée de la dormance ([Doutreloup et al., 2022](#); [Morales-Castilla et al., 2020](#)), et le modèle de Wang et Engel ([Wang et Engel, 1998](#)), qui simule la phase de post-dormance jusqu’au débourrement ([Doutreloup et al., 2022](#); [Morales-Castilla et al., 2020](#)). Cette chaîne de modélisation est donc désignée par l’acronyme SUWE (pour Smoothed-Utah, Wang et Engel) ([Zito, 2021](#)). Du fait de leur nature curvilinéaire, les modèles Smoothed-Utah et de Wang et Engel prennent en considération le ralentissement du développement de la vigne en réponse aux températures élevées pendant l’hiver ([Morales-Castilla et al., 2020](#)), contrairement aux modèles linéaires ([García de Cortázar-Atauri et al., 2010](#)).

Le modèle Smoothed-Utah est utilisé pour déterminer la date de levée de la dormance de la vigne ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). À partir de la date d’entrée en dormance, fixée au 1<sup>er</sup> août, le modèle cumule des unités de refroidissement, calculées sur base des températures moyennes journalières qui lui sont fournies en entrée, et ce, jusqu’à ce que le seuil nécessaire pour mettre fin à la dormance soit atteint ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). La valeur de ce seuil de cumul de froid  $C^*$  varie en fonction du cépage ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). Puisque la vigne subit un ralentissement de son développement lorsqu’elle est exposée à des températures élevées en hiver, l’accumulation positive d’unités de refroidissement ne peut se produire que dans une certaine plage de températures donnée ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). Cela signifie qu’au-delà d’une certaine température, l’accumulation d’unités de refroidissement devient négative ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). Ce seuil de température est identique pour l’ensemble des cépages ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). Les différents paramètres du modèle Smoothed-Utah sont les suivants ([Morales-Castilla et al., 2020](#)) :

- la diminution de l’efficacité du froid pour l’endodormance  $T_{m1}$  ;
- la température moyenne quotidienne optimale  $T_{opt}$  ;
- la température avec la moitié de l’efficacité de la température moyenne quotidienne optimale pour induire l’endodormance  $T_{n2}$  ;
- l’impact négatif des températures élevées  $min$ .



$$f(T_{m_j}) = \begin{cases} \frac{1}{1+e^{-4\frac{T_{m_j}-T_{m1}}{T_{opt}-T_{m1}}}} & \text{si } T_{m_j} < T_{m1} \\ 1 + \frac{-0.5(T_{m_j}-T_{opt})^2}{(T_{m1}-T_{opt})^2} & \text{si } T_{m1} \leq T_{m_j} < T_{opt} \\ 1 - \left( (1 - \min) \frac{(T_{m_j}-T_{opt})^2}{2(T_{n2}-T_{opt})^2} \right) & \text{si } T_{opt} \leq T_{m_j} < T_{n2} \\ \min + \left( \frac{1-\min}{1+e^{-4\frac{T_{n2}-T_{m_j}}{T_{n2}-T_{opt}}}} \right) & \text{si } T_{m_j} \geq T_{n2} \end{cases} \quad (2.5)$$

Où  $T_{m_j}$  est la température moyenne journalière,  $T_{m1}$  est la diminution de l'efficacité du froid pour l'endodormance,  $T_{opt}$  est la température moyenne quotidienne optimale,  $T_{n2}$  est la température avec la moitié de l'efficacité de la température moyenne quotidienne optimale pour induire l'endodormance et  $\min$  est l'impact négatif des températures élevées.

Adapté à la vigne par [Morales-Castilla et al. \(2020\)](#), le modèle de Wang et Engel est utilisé pour déterminer la date de débourrement de la vigne ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). À partir du jour de levée de la dormance, estimée dans ce cas-ci par le modèle Smoothed-Utah, le modèle cumule des unités de forçage, calculées sur base des températures moyennes journalières qui lui sont fournies en entrée, et ce, jusqu'à ce que le seuil nécessaire au débourrement de la vigne soit atteint ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). La valeur de ce seuil d'actions cumulées de température  $F^*$  varie en fonction du cépage ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). Le modèle de Wang et Engel comporte également trois autres paramètres : la température minimale, la température optimale et la température maximale ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). Les températures minimale et maximale ont respectivement été fixées à 0°C et 40°C sur base des seuils physiologiques bien établis dans la littérature ([Morales-Castilla et al., 2020](#)). Au-dessus de 40 °C, une réduction drastique de l'activité photosynthétique, et donc du développement phénologique de la vigne, est souvent observée ([Morales-Castilla et al., 2020](#)).

$$f(T_{m_j}) = \begin{cases} \frac{2(T_{m_j}-T_{n_j})^\alpha(T_{opt}-T_{n_j})^\alpha-(T_{m_j}-T_{n_j})^{2\alpha}}{(T_{opt}-T_{n_j})^{2\alpha}} & \text{si } T_{n_j} < T_{m_j} < T_{x_j} \\ 0 & \text{si } T_{m_j} \leq T_{n_j} \\ 0 & \text{si } T_{m_j} \geq T_{x_j} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\alpha = \frac{\ln(2)}{\ln\left(\frac{T_{x_j} - T_{n_j}}{T_{opt} - T_{n_j}}\right)} \quad (2.7)$$

Où  $T_{m_j}$  est la température moyenne journalière,  $T_{n_j}$  est la température minimale journalière,  $T_{x_j}$  est la température maximale journalière et  $T_{opt}$  est la température optimale.

### 2.4.2 Modélisation de la floraison et de la véraison

Le modèle « Grapevine Flowering Véraison » (GFV), développé par [Parker \*et al.\* \(2011\)](#) et reconnu comme pertinent par [Doutreloup \*et al.\* \(2022\)](#), a été sélectionné pour simuler les dates de floraison et de véraison de la vigne. Contrairement aux modèles Smoothed-Utah et de Wang et Engel, le modèle GFV se distingue par son approche linéaire, reposant sur l'accumulation de degrés-jours ([Zavlyanova \*et al.\*, 2023](#)). En effet, à partir du 60<sup>e</sup> jour de l'année, il accumule des degrés-jours, et ce, jusqu'à ce que les seuils nécessaires à la floraison et à la véraison  $F^*$ , dont les valeurs varient en fonction des cépages, soient atteints ([Parker \*et al.\*, 2011](#)). Les degrés-jours sont calculés en soustrayant une température de base, fixée à 0°C, à la température moyenne journalière ([Parker \*et al.\*, 2011](#)). Ces choix de paramètres, une température de base de 0°C et une date de début de cumul fixée au 60<sup>e</sup> jour de l'année, distinguent le modèle GFV du modèle « Spring Warming » (SW), également connu sous le nom de modèle « Growing Degrees Days » (GDD) ([Parker \*et al.\*, 2011](#)). En effet, ce dernier utilise une température de base de 10°C et un début de cumul au 1<sup>er</sup> jour de l'année ([Parker \*et al.\*, 2011](#)). Dans le cas du modèle GFV, ce sont plus précisément les dates de mi-floraison et de mi-véraison qui sont simulées ([Parker \*et al.\*, 2011](#)). Le stade de mi-floraison correspond à celui où 50% des fleurs ont atteint l'anthèse, tandis que le stade de mi-véraison marque le moment où 50% des baies ont commencé à ramollir ou à passer de vert à translucide pour les variétés blanches, ou ont changé de couleur pour les variétés rouges ([Parker \*et al.\*, 2011](#)).

$$f(T_{m_j}) = \begin{cases} 0 & \text{si } T_{m_j} \leq T_b \\ T_{m_j} - T_b & \text{si } T_{m_j} > T_b \end{cases} \quad (2.8)$$

Où  $T_{m_j}$  est la température moyenne journalière et  $T_b$  est la température de base.

### 2.4.3 Modélisation de la maturité

Le modèle « Grapevine Sugar Ripeness » (GSR), développé par [Parker \*et al.\* \(2020\)](#) et reconnu comme pertinent par [Doutreloup \*et al.\* \(2022\)](#), a été retenu pour prédire la date de maturité  $t_{maturite}$  de la vigne. Pendant la maturation, les raisins s'enrichissent en sucre tandis que leur acidité diminue ([Doutreloup \*et al.\*, 2022](#)). La décision de la date de récolte dépend du type de vin désiré : pour les vins effervescents, la cueillette intervient autour de 170 g/L de sucre, tandis que pour les vins tranquilles, on préfère des raisins plus mûrs, avec des concentrations généralement comprises entre 200 et 240 g/L ([Doutreloup \*et al.\*, 2022](#)). Le modèle GSR, tout comme le modèle GFV, est un modèle linéaire de degrés-jours ([Doutreloup \*et al.\*, 2022](#)). Il accumule des degrés-jours, et ce, jusqu'à ce que le seuil nécessaire à la maturité  $F^*$ , dont la valeur varie en fonction du cépage et de la concentration en sucre désirée, soit atteint ([Parker \*et al.\*, 2020](#)). Ce modèle se distingue du « Growing Degrees Days » (GDD) par ses paramètres : une température de base  $T_b$  de 0°C et une date de début de cumul  $t_0$  fixée au 91ème jour de l'année ([Parker \*et al.\*, 2020](#)).

$$f(T_{m_j}) = \begin{cases} 0 & \text{si } T_{m_j} \leq T_b \\ T_{m_j} - T_b & \text{si } T_{m_j} > T_b \end{cases} \quad (2.9)$$

Où  $T_{m_j}$  est la température moyenne journalière et  $T_b$  est la température de base.

### 2.4.4 Résumé

Modèle		Stade phénologique simulé	Principe
SUWE	Smoothed-Utah	Levée de la dormance	Cumul d'unité de froid positif et négatif du début de la dormance jusqu'à la levée de celle-ci
	Wang et Engel	Débourrement	Cumul d'unité de chaleur de la levée de la dormance jusqu'au débourrement
GFV Grapevine Flowering Veraison		Floraison et véraison	Cumul de températures du 60 <sup>e</sup> jour de l'année à la floraison puis la véraison
GSR Grapevine Sugar Ripeness		Maturité	Cumul de températures du 91 <sup>e</sup> jour de l'année à la maturité

TABLEAU 2.3 – Résumé des différents modèles phénologiques utilisés

## 2.5 Ruptures et tendances

Dans certains cas, une série temporelle peut présenter des ruptures dans sa fonction de tendance (Bai, 1997a). Il devient alors essentiel d'identifier les  $m$  points de rupture qui divisent la série en  $m+1$  segments distincts, chacun caractérisé par des coefficients de régression constants. Bai (1994) a posé les fondements de cette méthodologie qui a ensuite été étendue aux ruptures multiples par Bai (1997a,b) et Bai et Perron (1998).

Dans le cadre de ce mémoire, l'estimation simultanée des ruptures est réalisée sur R à l'aide de l'algorithme de Bai et Perron (2003) implémenté dans la fonction *breakpoints*. Cette fonction permet de déterminer le nombre optimal de ruptures en minimisant la somme des carrés des résidus. Les intervalles de confiance à 95% de chaque point de rupture sont ensuite calculés avec la fonction *confint* qui se base sur les travaux de Bai (1997b).

Une fois les points de rupture identifiés, chaque segment de la série est soumis à une régression linéaire distincte sur R, grâce à la fonction *breakpoints*. Le coefficient directeur de chaque droite de régression, c'est-à-dire la pente, est ensuite utilisé pour quantifier et interpréter les tendances à long terme des variables étudiées.

Afin de garantir la validité ainsi que la fiabilité des conclusions tirées d'une régression linéaire, plusieurs hypothèses doivent être vérifiées (Pandis, 2016) :

1. Indépendance des résidus : Cette hypothèse est vérifiée à l'aide du test de Durbin-Watson. Une p-valeur inférieure à 0,05 suggère que l'indépendance des résidus est violée.
2. Normalité des résidus : La normalité des résidus est évaluée par le test de Shapiro-Wilk. Si la p-valeur est inférieure à 0,05, l'hypothèse de normalité est rejetée.
3. Homoscédasticité des résidus : Pour vérifier cette hypothèse, le test de Breusch-Pagan est souvent utilisé. Une p-valeur inférieure à 0,05 indique une violation de l'homoscédasticité des résidus.

Ces hypothèses sont évaluées après l'ajustement du modèle. Si toutes ces conditions sont satisfaites, les résultats de la régression peuvent être considérés comme valides, et par conséquent, interprétés avec confiance.

Ensuite, il est crucial de tester la significativité des coefficients de régression avec un test de Student. Dans le cadre de ce mémoire, l'accent est particulièrement mis sur la pente ( $\beta_1$ ), car lorsque celle-ci est significative dans un modèle de régression, cela indique qu'il y a une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Pour ce faire, nous testons l'hypothèse nulle  $H_0 : \beta_1 = 0$  contre l'hypothèse alternative  $H_1 : \beta_1 \neq 0$ . La décision de rejeter ou non l'hypothèse nulle est basée sur la p-valeur calculée lors du test. L'hypothèse nulle  $H_0$  est rejetée si la p-valeur est inférieure ou égale au niveau de significativité  $\alpha$ , conventionnellement fixé à 0,05.



# Chapitre 3

## Résultats

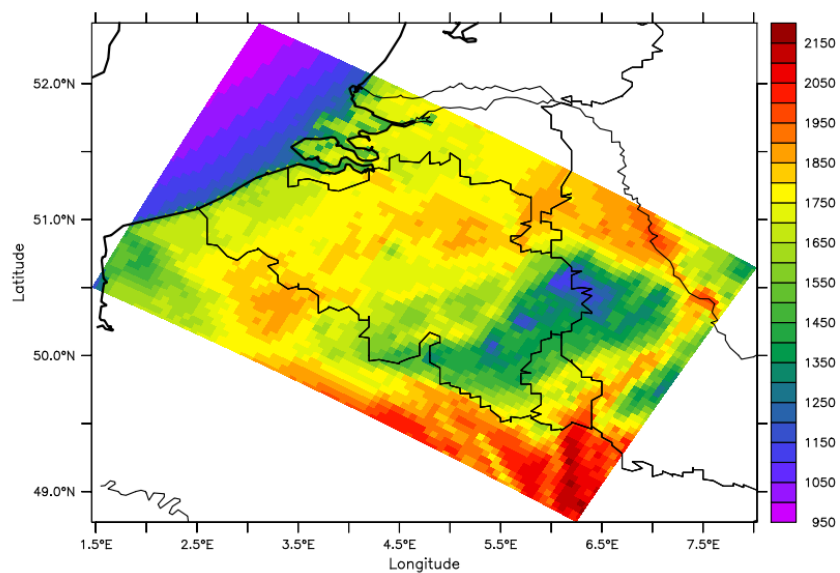
### 3.1 Situation en 2023 et évolution depuis les années 1950

En examinant la figure 3.1 qui représente respectivement l'indice de Huglin et l'indice de fraîcheur des nuits pour l'année 2023, nous constatons que la région la plus froide coïncide avec la zone la plus élevée en altitude en Belgique, à savoir l'Ardenne. À l'opposé, les régions les plus chaudes se situent dans le sud du Hainaut, le long de la frontière française, ainsi qu'en Hesbaye flamande et au sud de la Campine, ce qui en fait les zones les plus favorables à la viticulture en 2023, selon ces deux indices bioclimatiques.

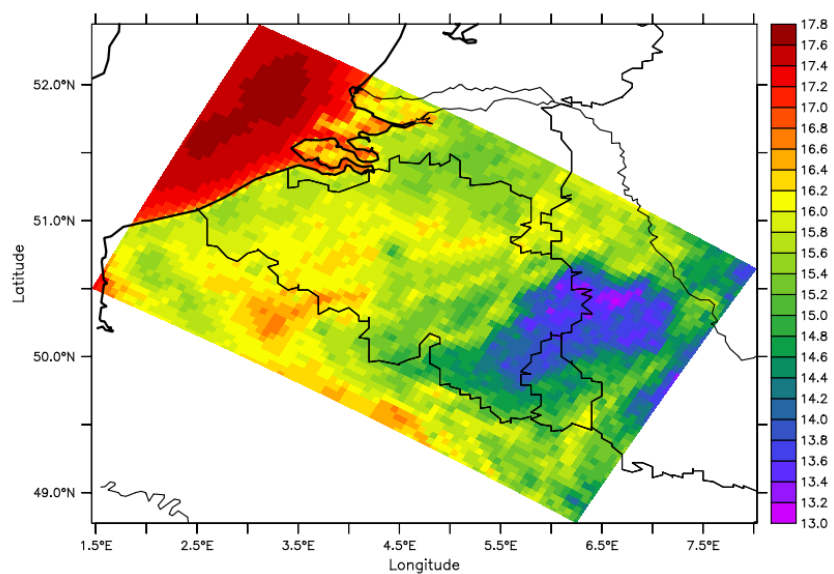
Des conclusions similaires peuvent être tirées des figures 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7. Ces figures illustrent clairement le retard des différents stades phénologiques au niveau des reliefs ardennais par rapport aux autres régions de Belgique.

En comparant la période actuelle aux années 1950, en soustrayant la moyenne des années 1950-1959 à celle des années 2014-2023, nous observons que le sud du Hainaut et la Hesbaye sont les régions qui ont connu le plus fort réchauffement, selon l'indice de fraîcheur des nuits (voir figure 3.8). Lorsque cette même méthode est appliquée au débourrement, il apparaît que l'altitude joue un rôle important : plus le relief est élevé, moins la date de ce stade phénologique s'est rapprochée du premier janvier (voir 3.9). Pour la floraison, l'Ardenne se distingue comme la région où l'avancée est la plus marquée (voir figure 3.10). Le constat est le même pour la véraison que pour la floraison. En effet, la figure 3.11 montre une plus grande avancée de ce stade phénologique sur le relief ardennais. Les pixels rouges signalent les régions où la véraison ne se produisait jamais auparavant et où elle se manifeste désormais. Enfin, en ce qui concerne la maturité (voir figures 3.12, 3.13 et 3.14), le même constat s'applique aux différentes concentrations en sucre : les régions en altitude connaissent une avancée de la maturité plus importante. Comme pour la véraison, les pixels rouges indiquent les zones où la maturité ne se produisait pas auparavant et où elle pourrait désormais se produire.



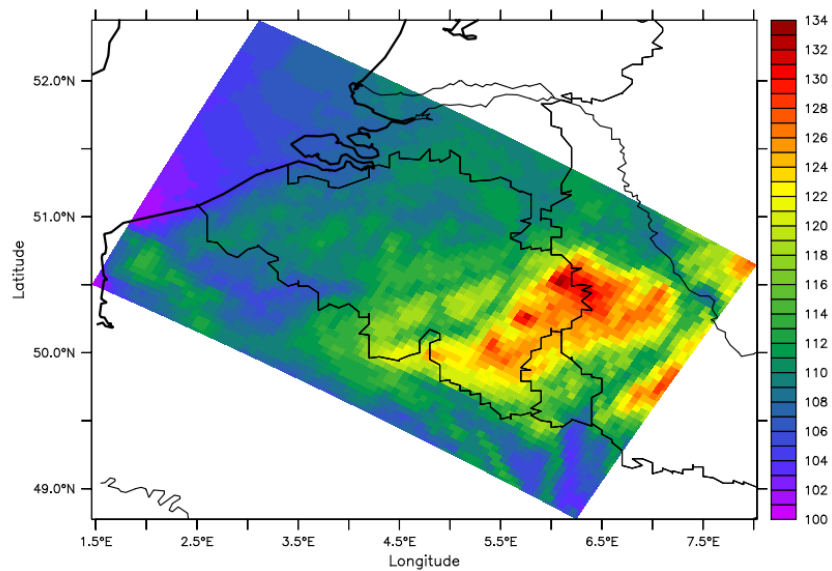


(a)

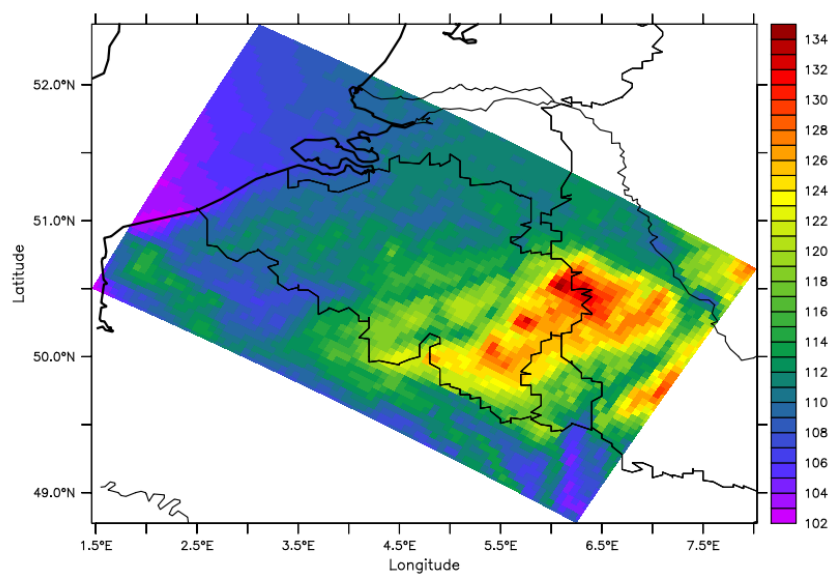


(b)

FIGURE 3.1 – Les indices (a) héliothermique de Huglin et (b) de fraîcheur des nuits en 2023.

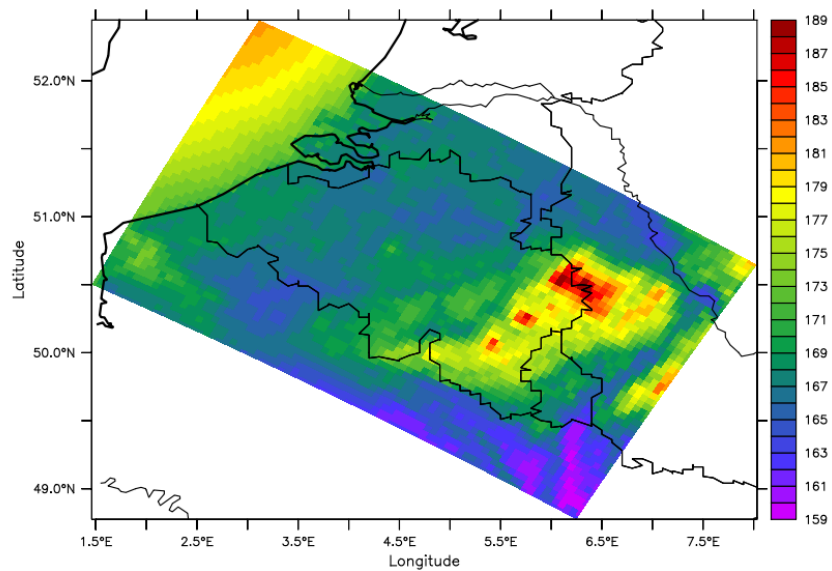


(a)

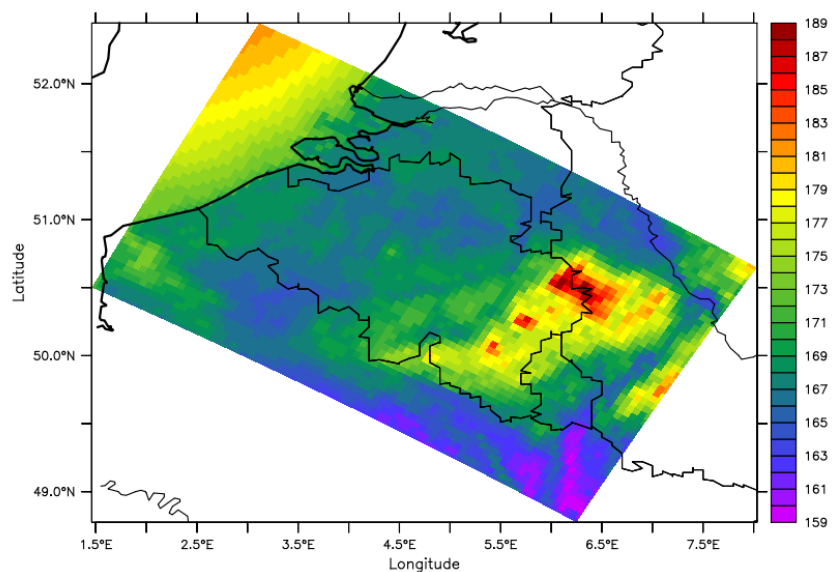


(b)

FIGURE 3.2 – Jour de débourrement du (a) chardonnay et du (b) pinot noir en 2023.

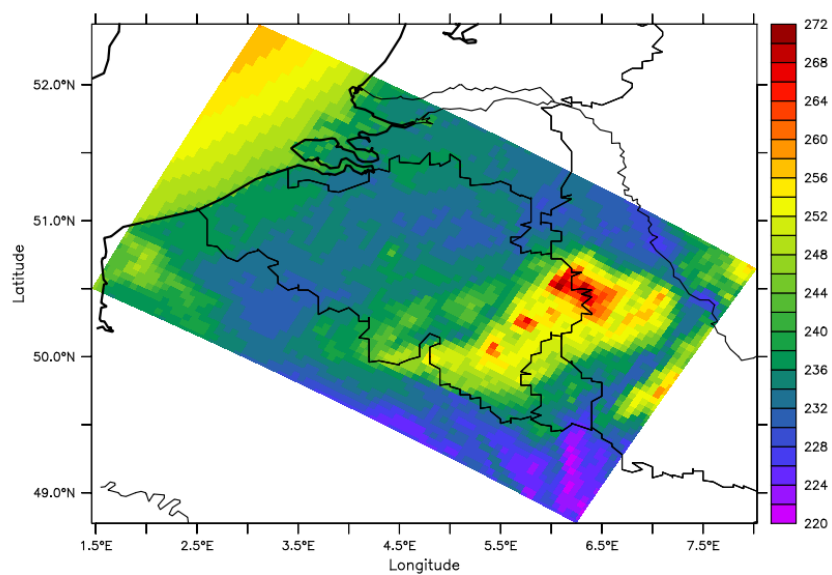


(a)

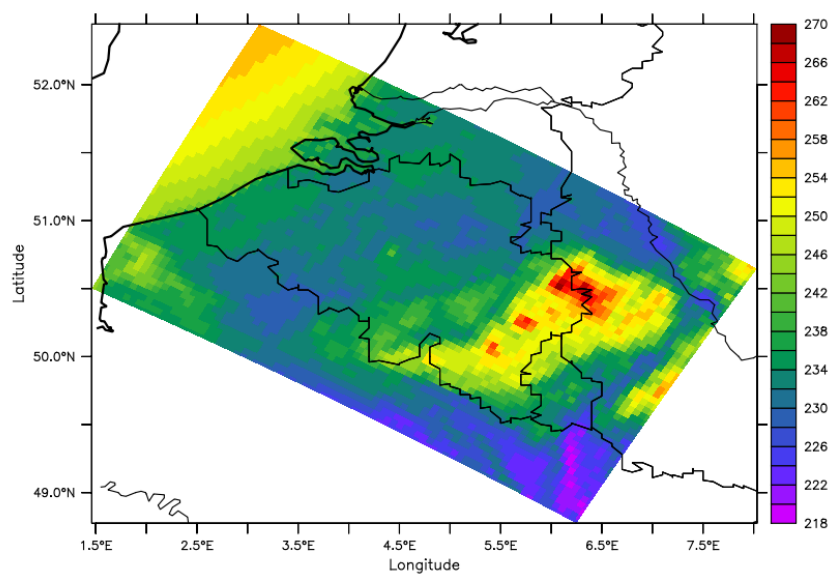


(b)

FIGURE 3.3 – Jour de floraison du (a) chardonnay et du (b) pinot noir en 2023.

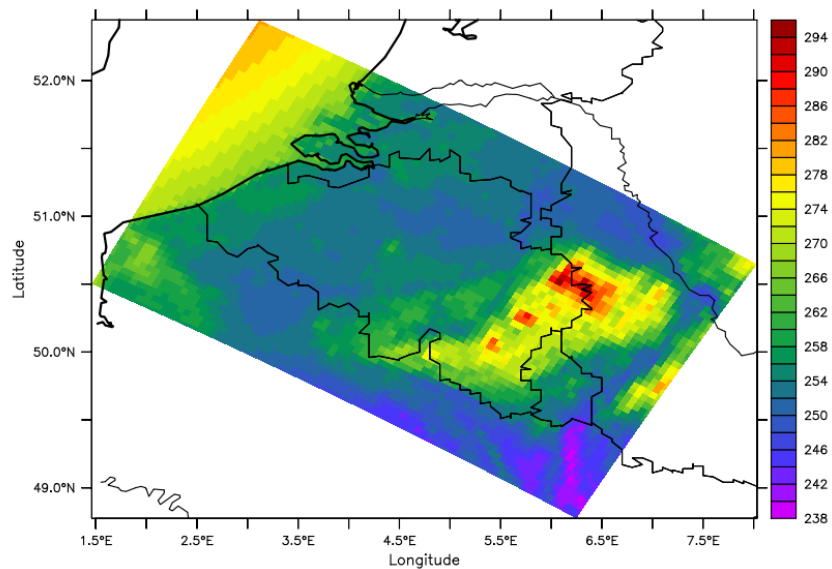


(a)

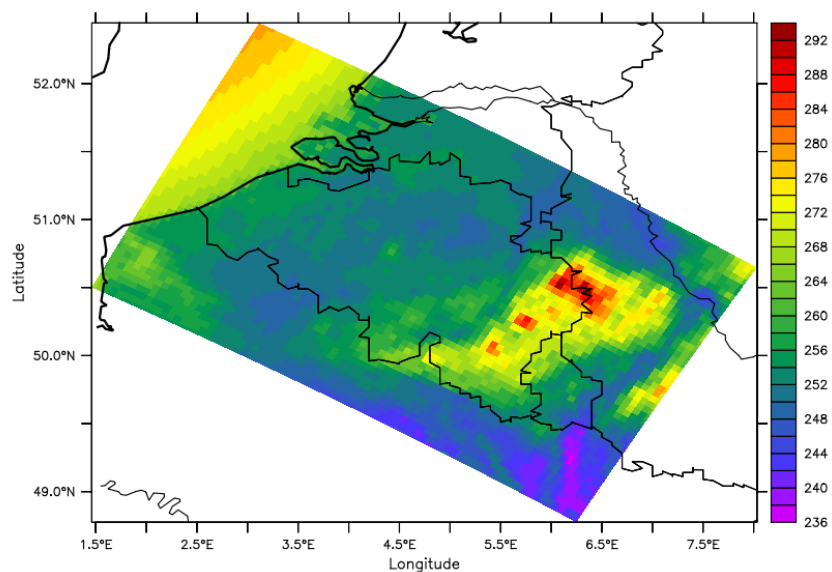


(b)

FIGURE 3.4 – Jour de véraison du (a) chardonnay et du (b) pinot noir en 2023.

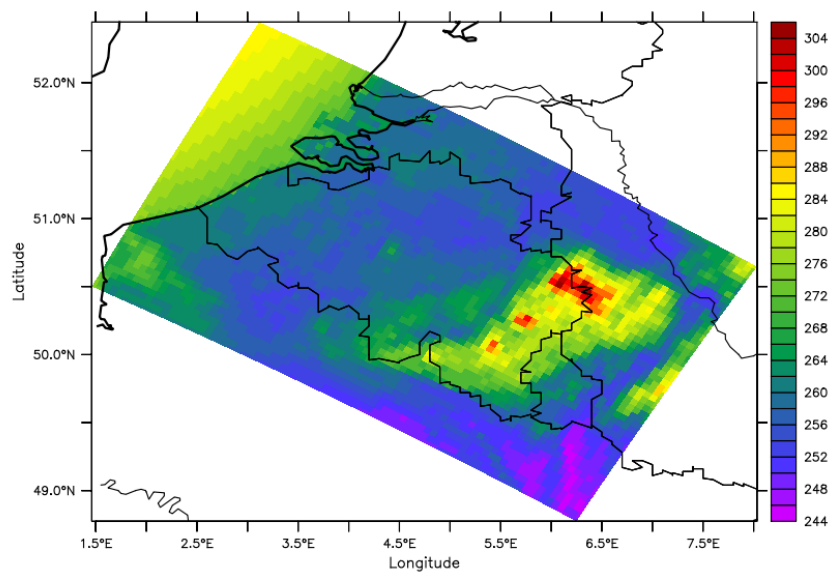


(a)

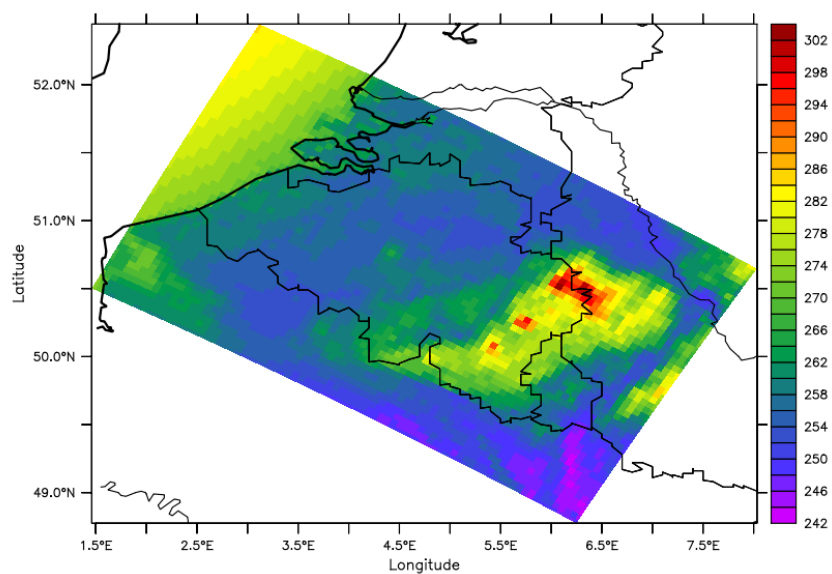


(b)

FIGURE 3.5 – Jour de maturité (170 g/L) du (a) chardonnay et du (b) pinot noir en 2023.



(a)



(b)

FIGURE 3.6 – Jour de maturité (190 g/L) du (a) chardonnay et du (b) pinot noir en 2023.

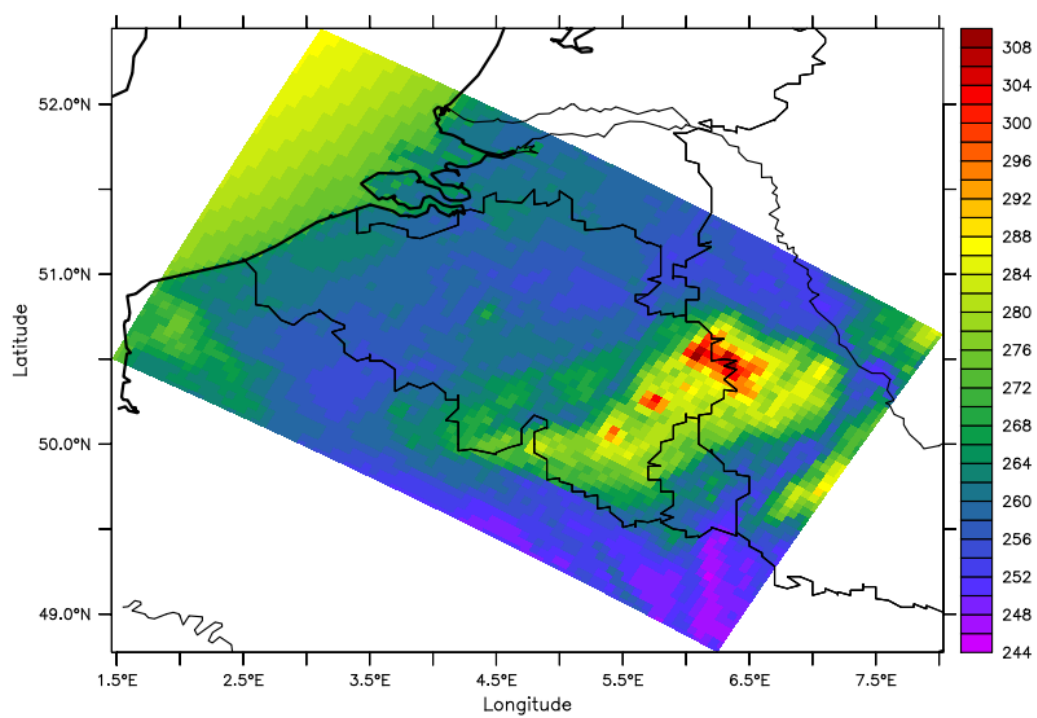
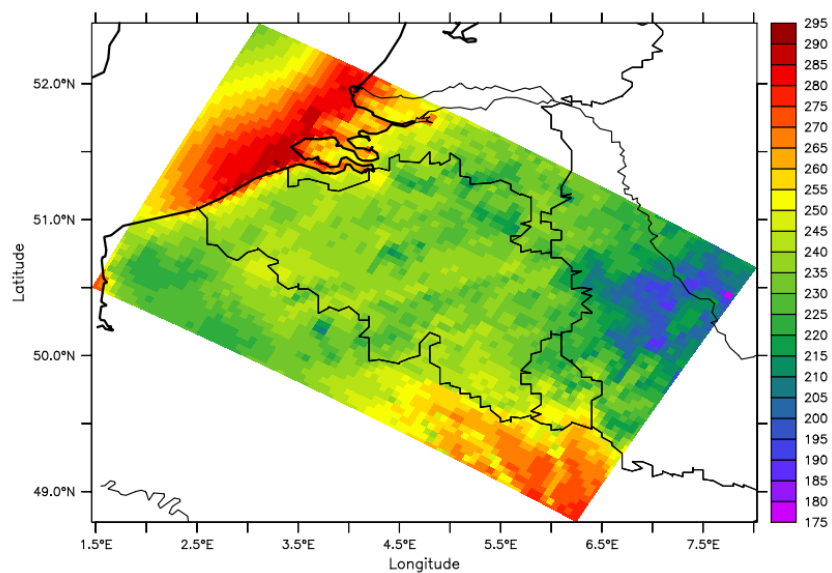
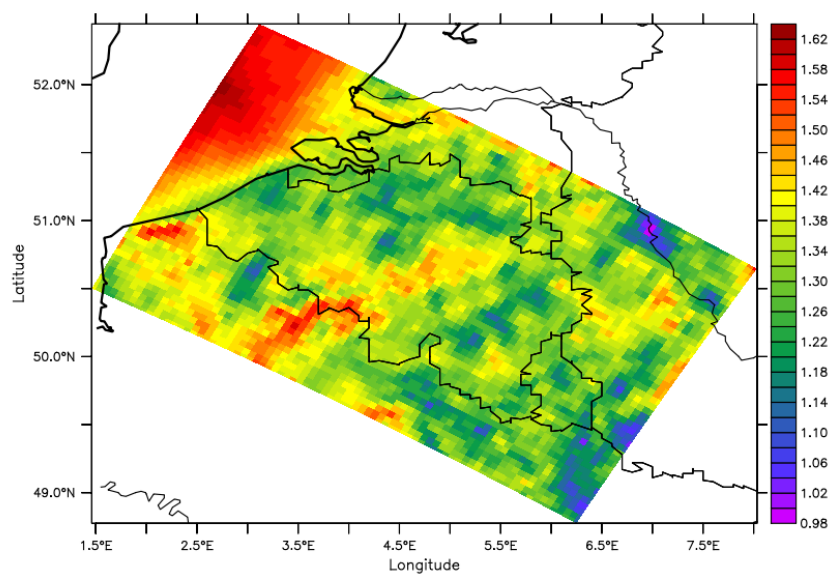


FIGURE 3.7 – Jour de maturité (200 g/L) du pinot noir en 2023.



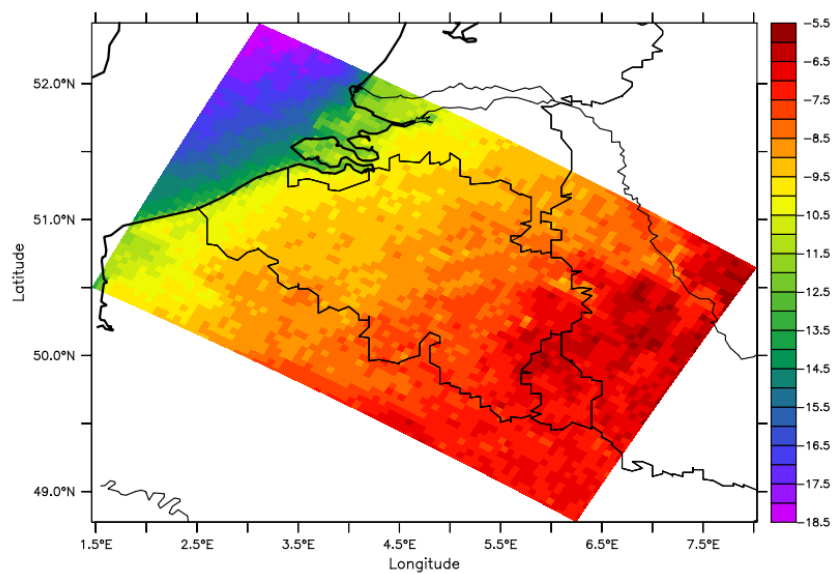
(a)



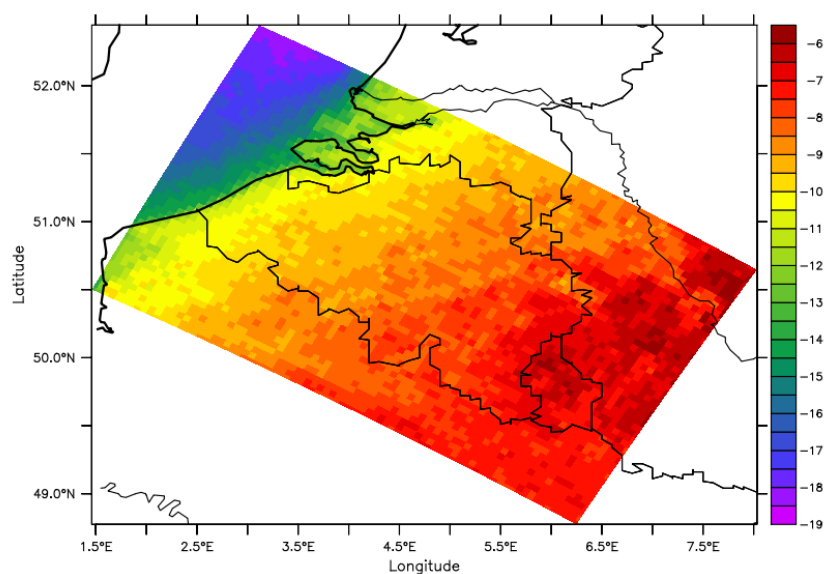
(b)

FIGURE 3.8 – Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour (a) l'indice héliothermique de Huglin et (b) l'indice de fraîcheur des nuits.



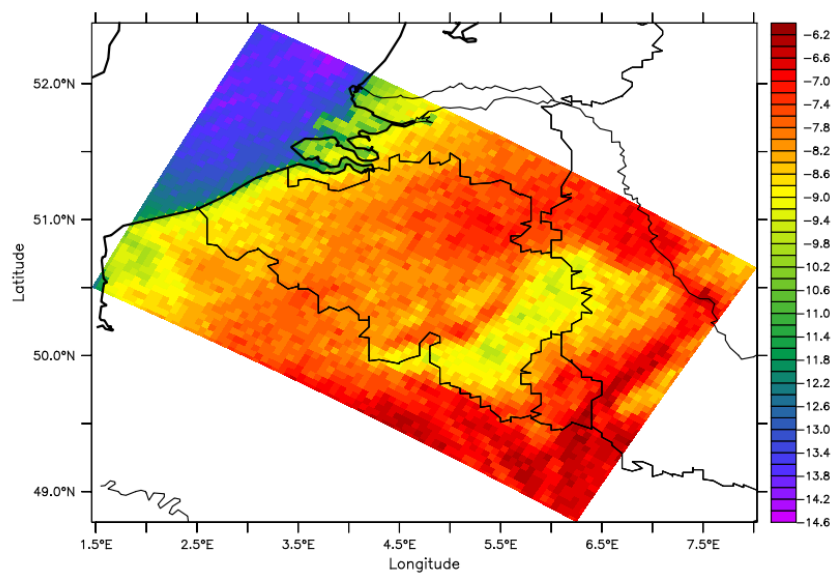


(a)

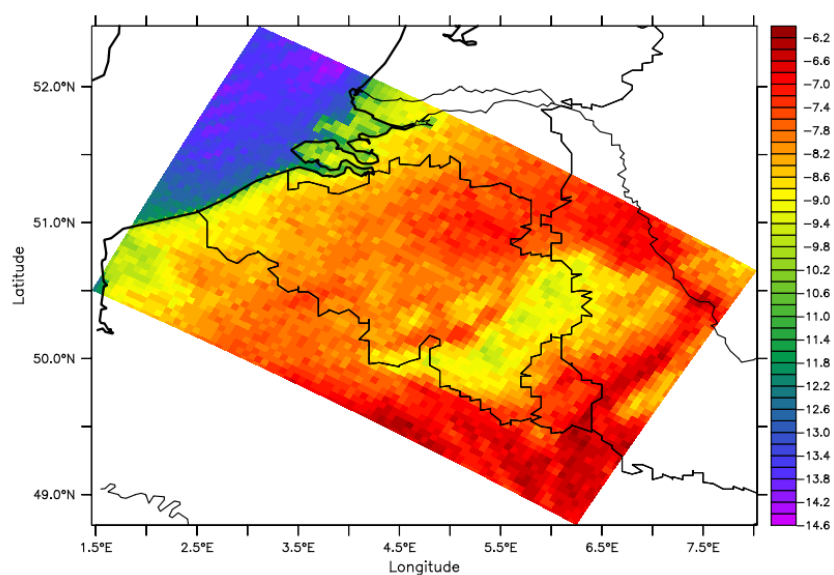


(b)

FIGURE 3.9 – Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de débourrement du (a) chardonnay et du (b) pinot noir.

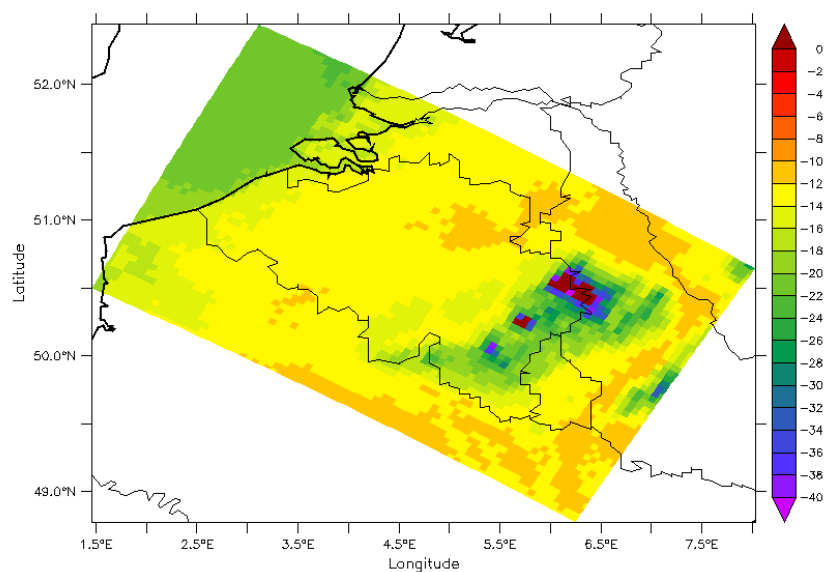


(a)

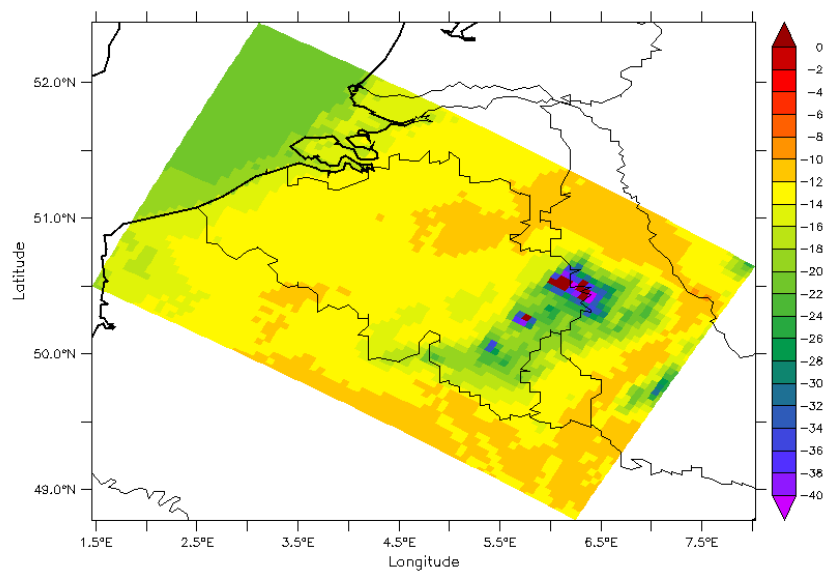


(b)

FIGURE 3.10 – Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de floraison du (a) chardonnay et du (b) pinot noir.

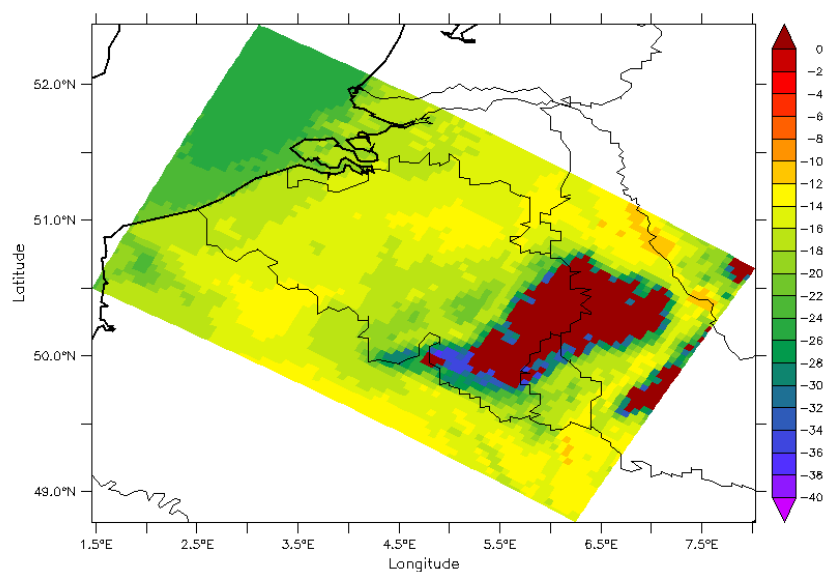


(a)

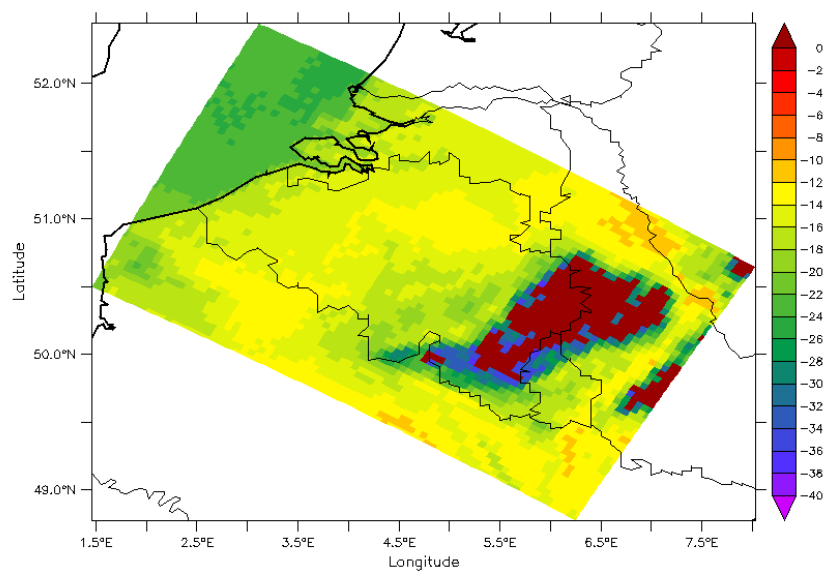


(b)

FIGURE 3.11 – Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de véraison du (a) chardonnay et du (b) pinot noir. Les pixels rouges foncés (valeur supérieure à 0) indiquent les régions où la véraison ne se produisait jamais auparavant et où elle peut désormais se manifester.

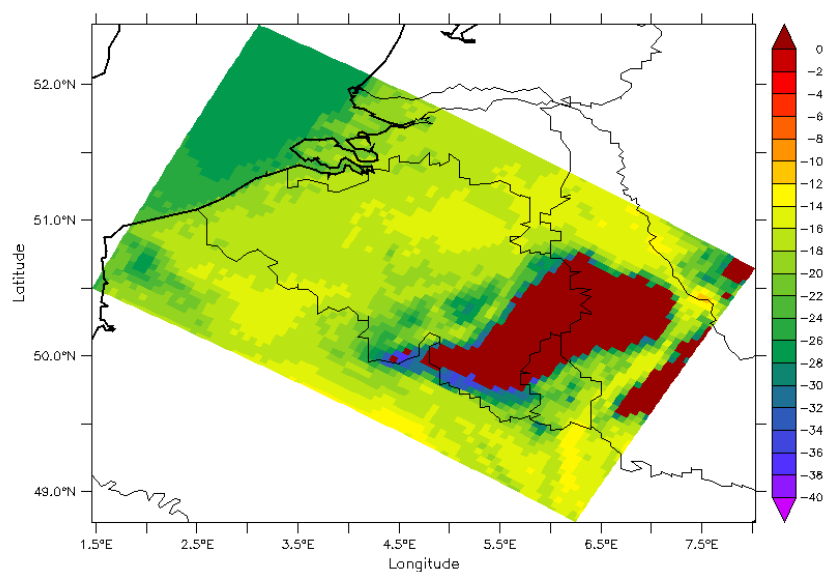


(a)

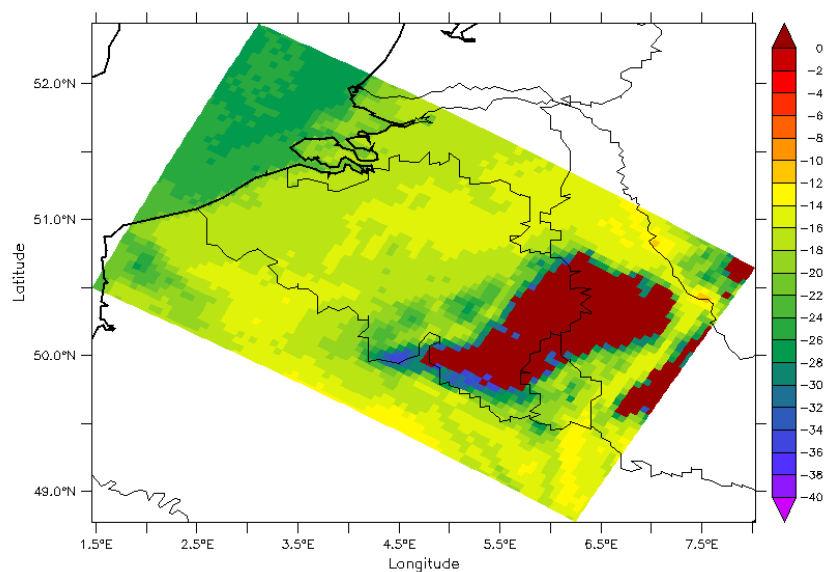


(b)

FIGURE 3.12 – Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de maturité (170 g/L) du (a) chardonnay et du (b) pinot noir. Les pixels rouges foncés (valeur supérieure à 0) indiquent les régions où la maturité ne se produisait jamais auparavant et où elle peut désormais se manifester.



(a)



(b)

FIGURE 3.13 – Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de maturité (190 g/L) du (a) chardonnay et du (b) pinot noir. Les pixels rouges foncés (valeur supérieure à 0) indiquent les régions où la maturité ne se produisait jamais auparavant et où elle peut désormais se manifester.

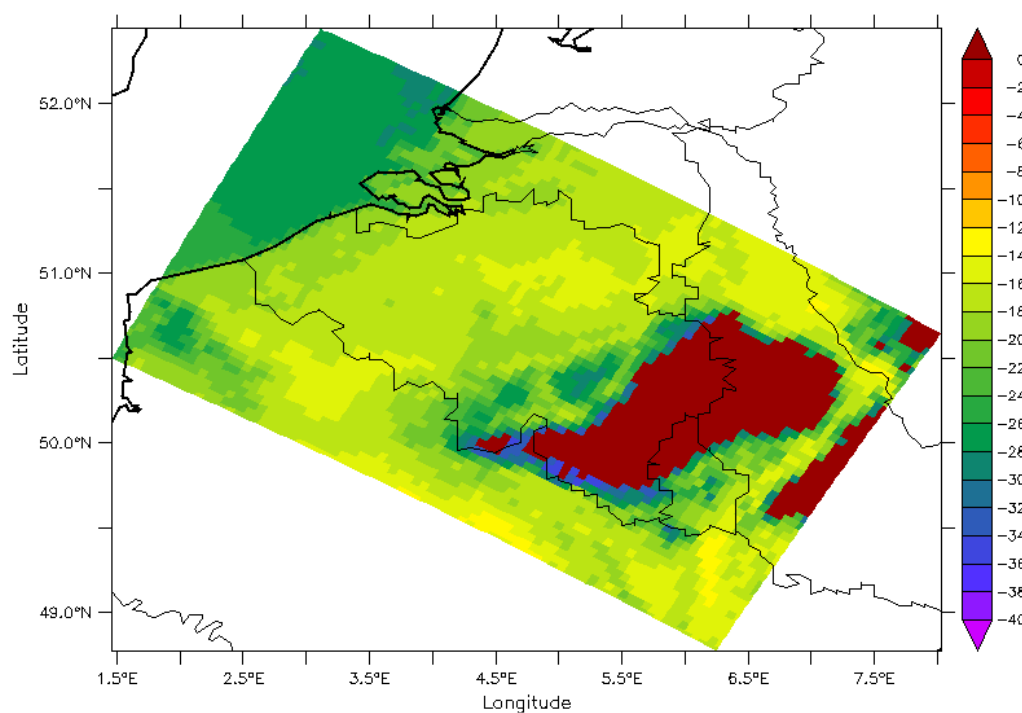


FIGURE 3.14 – Différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de maturité (200 g/L) du pinot noir. Les pixels rouges foncés (valeur supérieure à 0) indiquent les régions où la maturité ne se produisait jamais auparavant et où elle peut désormais se manifester.

## 3.2 Indices bioclimatiques

### 3.2.1 Indice héliothermique de Huglin

La fonction *breakpoints* a détecté un point de rupture dans la série temporelle qui concerne l'indice héliothermique de Huglin pour la Belgique viticole. Elle considère donc une partition optimale en deux segments. Le point de rupture a été détecté à la 27<sup>ème</sup> observation de la série temporelle. Les données couvrant les années de 1950 à 2023, le point de rupture à l'observation 27 correspond à l'année 1976.

La fonction *confint* indique que les observations 25 et 30 marquent les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. Cela signifie qu'avec une probabilité de 95 %, le vrai point de rupture de la série temporelle pourrait se situer n'importe où entre l'observation 25 et l'observation 30. L'estimation la plus probable du point de rupture à l'observation 27 par la fonction *breakpoints* semble donc être correcte.

La fonction *breakpoints* ayant détecté un point de rupture dans la série temporelle, une régression linéaire est réalisée pour chacun des deux segments de la série temporelle. Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus pour chacune des deux régressions linéaires. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour les deux régressions, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats des deux régressions linéaires sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La première régression linéaire présente une pente de -5,05. Cependant, avec une p-valeur de 0,239 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, n'est pas rejetée. Cela indique que la pente de la régression n'est pas statistiquement significative, et qu'il n'est donc pas possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante.

La deuxième régression linéaire est caractérisée par une pente de 10.79. Contrairement à la pente de la première régression, celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $4,45 \times 10^{-9}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Depuis le milieu des années 1970, nous observons ainsi une augmentation d'environ une centaine d'unités par décennie, comme illustré sur la figure 3.15.

En résumé, entre 1950 et 1976, l'indice héliothermique de Huglin n'a pas significativement évolué, mais entre 1976 et 2023, il a évolué à la hausse avec une augmentation d'environ une centaine d'unités.

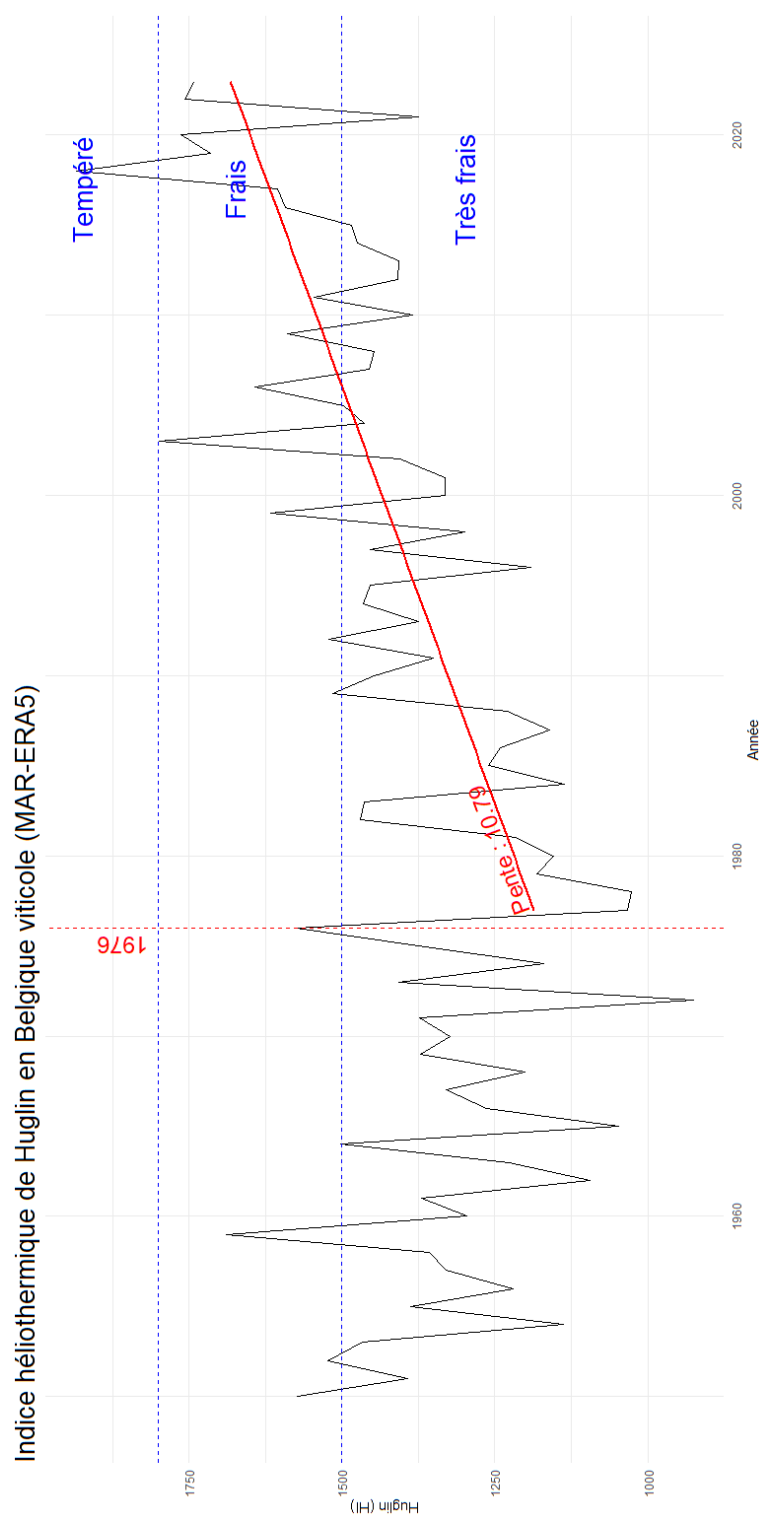


FIGURE 3.15 – Indice héliothermique de Huglin pour la Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. La droite de régression est représentée en rouge (pente = 10,79 ; p-valeur =  $4,45 \times 10^{-9}$ ) et l'année du point de rupture est indiquée par la droite verticale en pointillés rouges.



### 3.2.2 Indice de fraîcheur des nuits

La fonction *breakpoints* n'a détecté aucun point de rupture dans la série temporelle qui concerne l'indice de fraîcheur des nuits pour la Belgique viticole. Elle considère donc la série temporelle couvrant la période 1950-2023 comme un segment homogène. Une régression linéaire est donc réalisée pour l'ensemble de ce segment.

Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus de cette régression linéaire. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour la régression, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats de la régression linéaire sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La régression linéaire est caractérisée par une pente de 0,02. Celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $9,05 \times 10^{-3}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante.

En résumé, depuis le début des années 1950, nous observons une augmentation d'environ  $0,2^{\circ}\text{C}$  par décennie de l'indice de fraîcheur des nuits en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.16. Nous constatons également qu'en 1950, les nuits étaient classées comme « très fraîches » selon l'indice de fraîcheur des nuits, tandis qu'aujourd'hui, elles sont considérées comme « fraîches ».

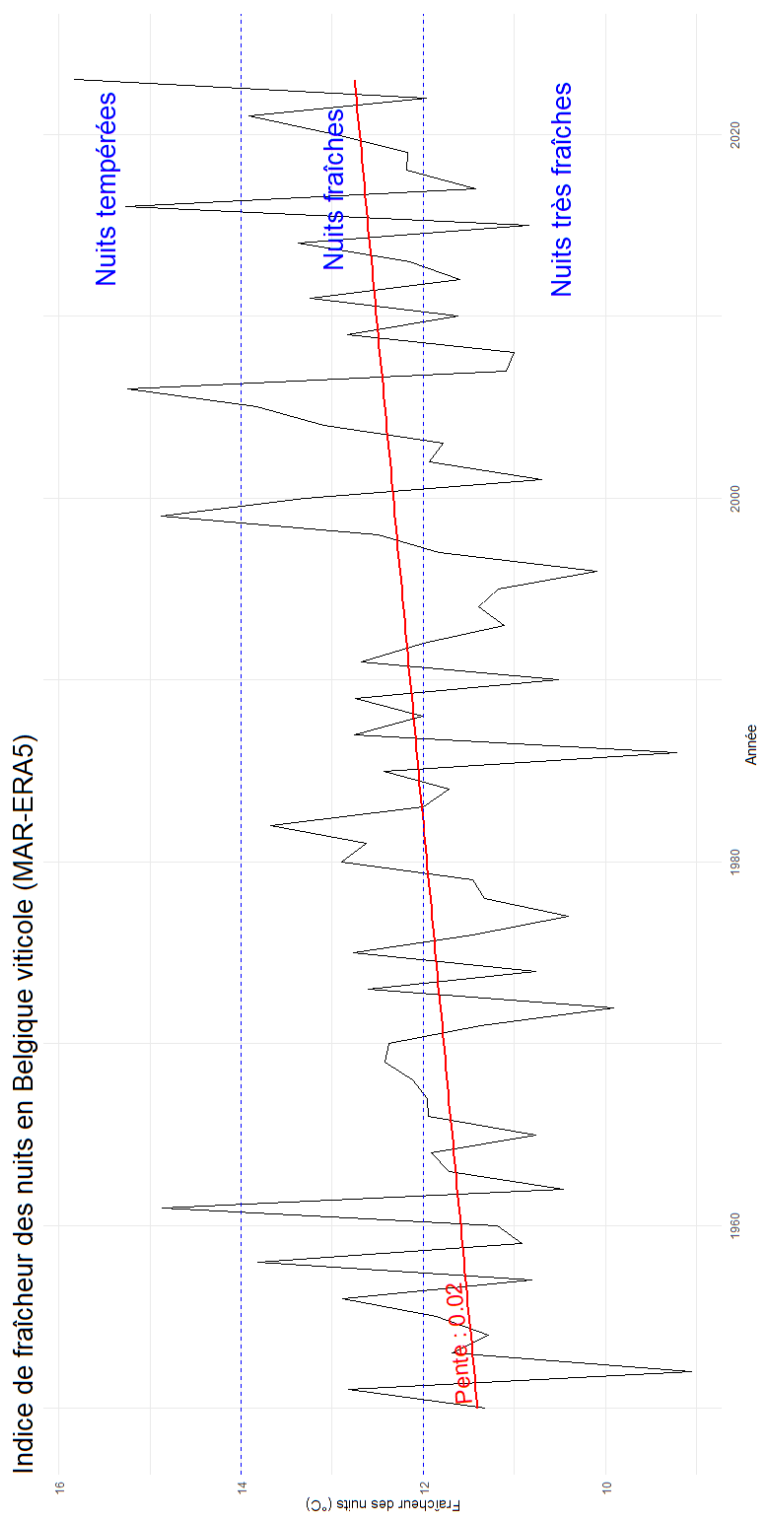


FIGURE 3.16 – Indice de fraîcheur des nuits pour la Belgique viticole entre 1950 et 2023. La droite de régression est représentée en rouge (pente = 0,02 ; p-valeur =  $9,05 \times 10^{-3}$ ).

## 3.3 Stades phénologiques

### 3.3.1 Débourrement

#### 3.3.1.1 Chardonnay

La fonction *breakpoints* n'a détecté aucun point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de débourrement du chardonnay en Belgique viticole. Elle considère donc la série temporelle couvrant la période 1950-2023 comme un segment homogène. Une régression linéaire est donc réalisée sur l'ensemble de ce segment.

Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus de cette régression linéaire. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour la régression, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats de la régression linéaire sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La régression linéaire est caractérisée par une pente de -0,14. Celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $9,69 \times 10^{-4}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante.

En résumé, depuis le début des années 1950, nous observons un avancement d'environ 1,5 jour par décennie du jour de débourrement du chardonnay en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.17.

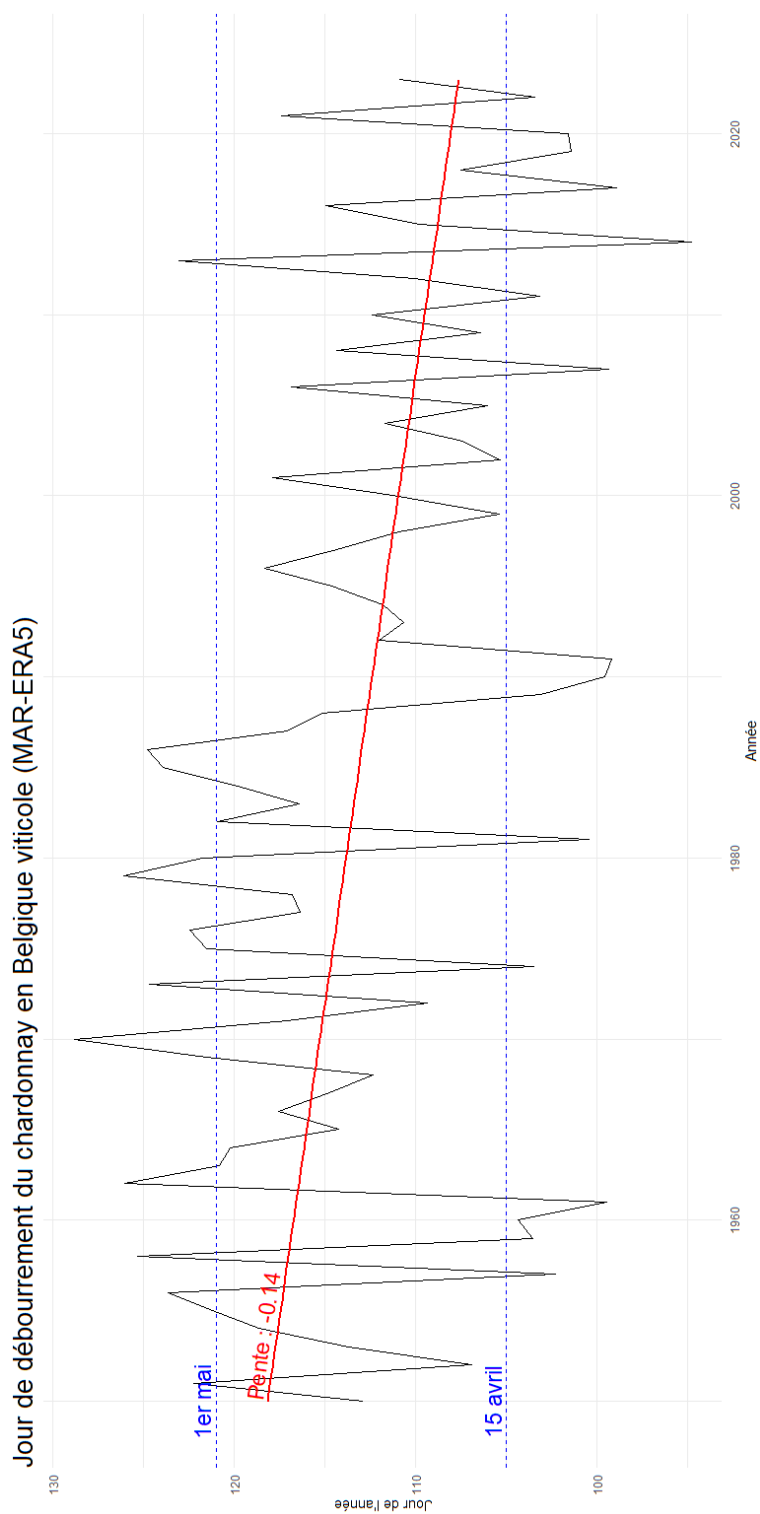


FIGURE 3.17 – Jour de débourrement du chardonnay en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. La droite de régression est représentée en rouge (pente =  $-0,14$ ;  $p$ -valeur =  $9,69 \times 10^{-4}$ ).

### 3.3.1.2 Pinot noir

La fonction *breakpoints* n'a détecté aucun point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de débourrement du pinot noir en Belgique viticole. Elle considère donc la série temporelle couvrant la période 1950-2023 comme un segment homogène. Une régression linéaire est donc réalisée sur l'ensemble de ce segment.

Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus de cette régression linéaire. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson et de Breusch-Pagan ont fourni des p-valeurs supérieures à 0,05, ce qui indique que les hypothèses nulles de ces tests ne sont pas rejetées. En revanche, le test de Shapiro-Wilk a produit une p-valeur de 0,045, ce qui suggère que l'hypothèse de normalité est rejetée. Étant donné qu'un des critères de validité n'est pas satisfait, les résultats de cette régression linéaire doivent être interprétés avec prudence. Il est essentiel de prendre en compte cette limitation lors de l'analyse des résultats de la régression.

La régression linéaire est caractérisée par une pente de -0,15. Celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $8,5 \times 10^{-4}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante.

En résumé, depuis le début des années 1950, nous observons un avancement d'environ 1,5 jour par décennie du jour de débourrement du pinot noir en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.18.

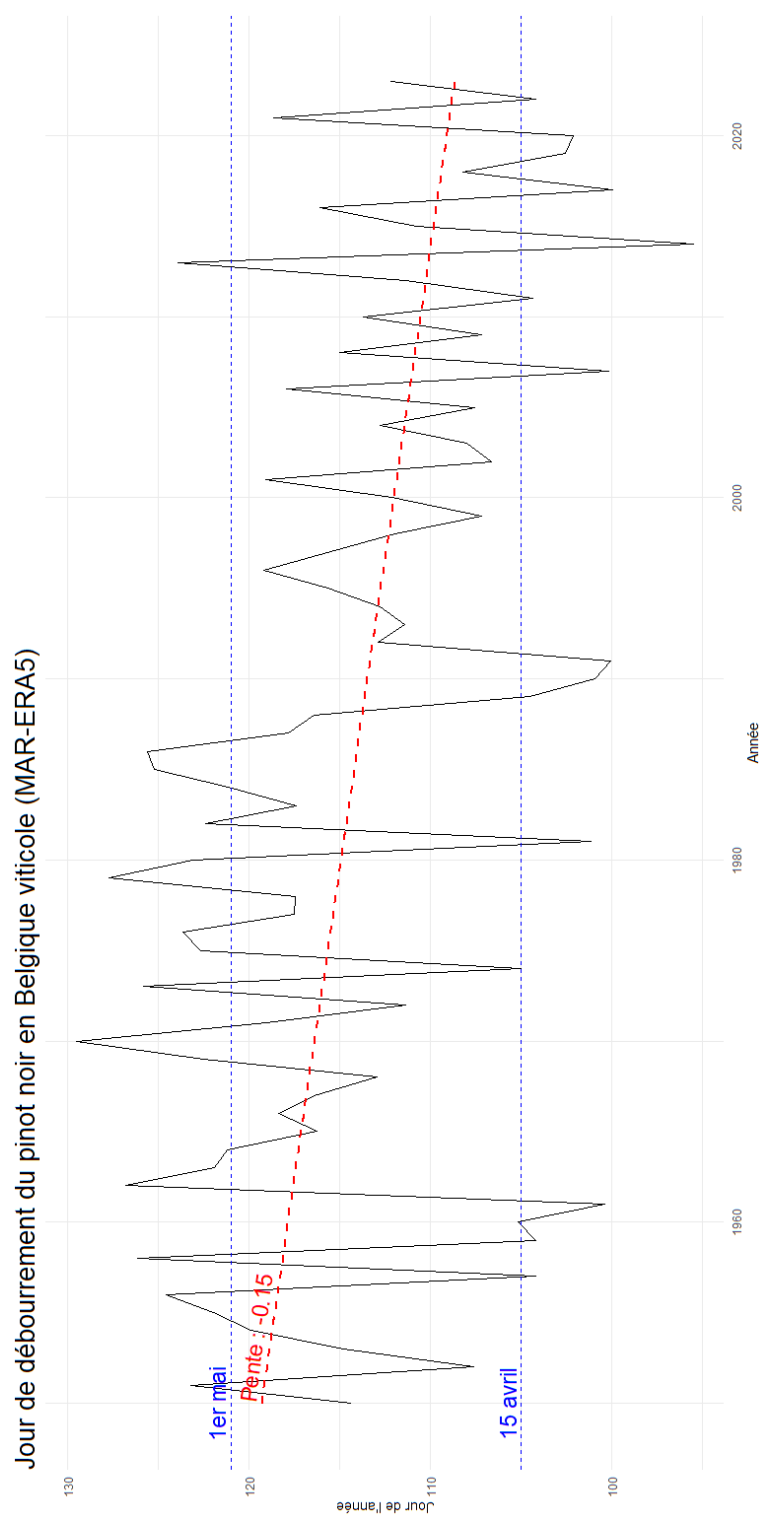


FIGURE 3.18 – Jour de débournement du pinot noir en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. La droite de régression est représentée en rouge (pente =  $-0,15$  ; p-valeur =  $8,5 \times 10^{-4}$ ). Elle est également représentée en pointillés car l'hypothèse de normalité des résidus est rejetée (Test de Shapiro-Wilk : p-valeur =  $0,045$ ).

### 3.3.2 Floraison

#### 3.3.2.1 Chardonnay

La fonction *breakpoints* a détecté un point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de floraison du chardonnay en Belgique viticole. Elle considère donc une partition optimale en deux segments. Le point de rupture a été détecté à la 38ème observation de la série temporelle. Les données couvrant les années de 1950 à 2023, le point de rupture à l'observation 38 correspond à l'année 1987.

La fonction *confint* indique que les observations 36 et 55 marquent les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. Cela signifie qu'avec une probabilité de 95 %, le vrai point de rupture de la série temporelle pourrait se situer n'importe où entre l'observation 36 et l'observation 55. L'estimation la plus probable du point de rupture à l'observation 38 par la fonction *breakpoints* semble donc être correcte.

La fonction *breakpoints* ayant détecté un point de rupture dans la série temporelle, une régression linéaire est réalisée pour chacun des deux segments de la série temporelle. Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus pour chacune des deux régressions linéaires. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour les deux régressions, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats des deux régressions linéaires sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La première régression linéaire est caractérisée par une pente de 0,2. Celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $1,95 \times 10^{-2}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Entre le début des années 1950 et la fin des années 1980, nous observons ainsi un recul d'environ 2 jours par décennie du jour de floraison du chardonnay en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.19.

La deuxième régression linéaire présente une pente de -0,16. Cependant, avec une p-valeur de 0,1103 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, n'est pas rejetée. Cela indique que la pente de la régression n'est pas statistiquement significative, et qu'il n'est donc pas possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante.

En résumé, entre 1950 et 1987, le jour de floraison du chardonnay a reculé d'environ 7 à 8 jours. Cependant, entre 1987 et 2023, aucune évolution significative de cette date n'a pu être constatée.

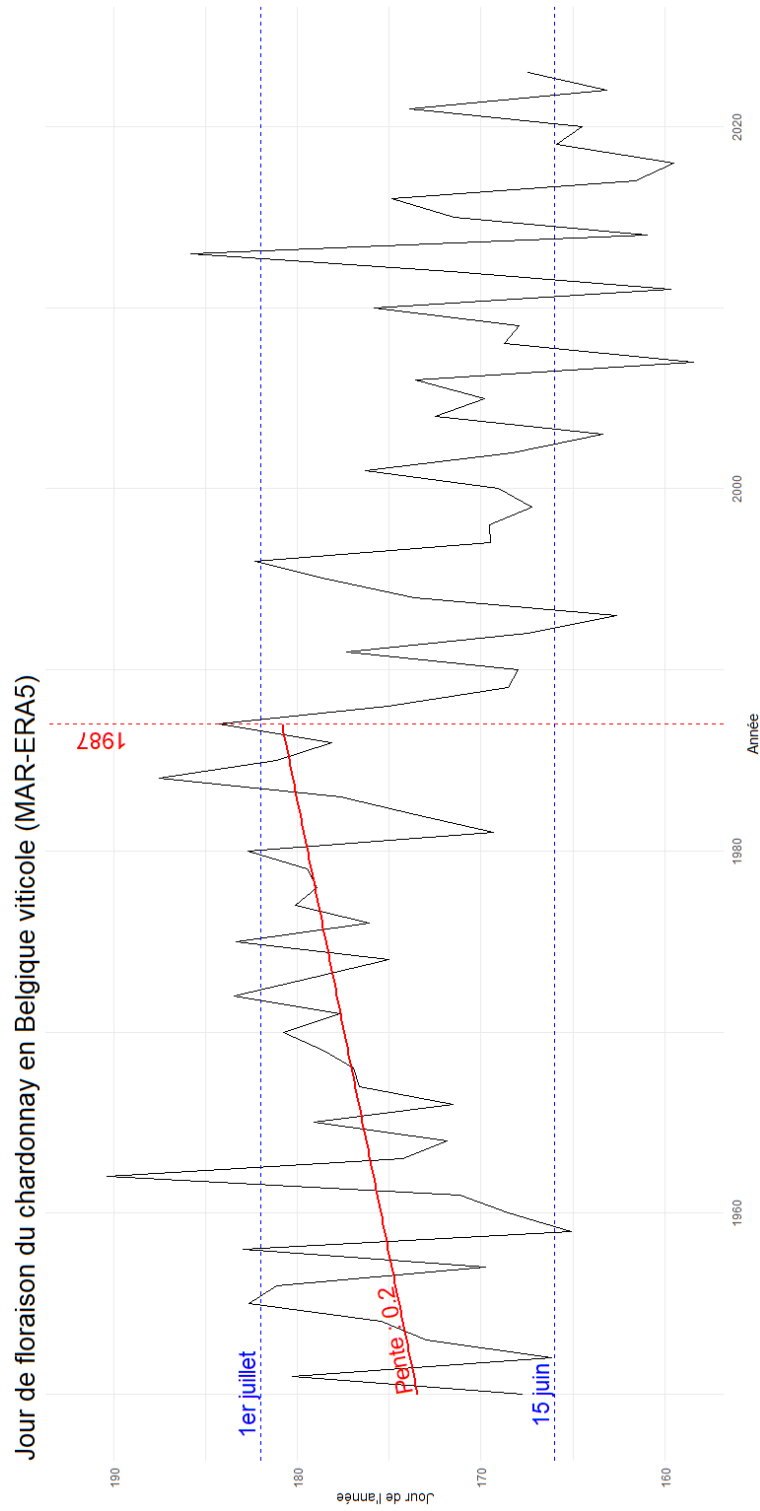


FIGURE 3.19 – Jour de floraison du chardonnay en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. La droite de régression est représentée en rouge (pente  $1 = 0,2$ ; p-valeur  $1 = 1,95 \times 10^{-2}$ ) et l'année du point de rupture est indiquée par la droite verticale en pointillés rouges.



### 3.3.2.2 Pinot noir

La fonction *breakpoints* a détecté un point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de floraison du pinot noir en Belgique viticole. Elle considère donc une partition optimale en deux segments. Le point de rupture a été détecté à la 38ème observation de la série temporelle. Les données couvrant les années de 1950 à 2023, le point de rupture à l'observation 38 correspond à l'année 1987.

La fonction *confint* indique que les observations 36 et 55 marquent les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. Cela signifie qu'avec une probabilité de 95 %, le vrai point de rupture de la série temporelle pourrait se situer n'importe où entre l'observation 36 et l'observation 55. L'estimation la plus probable du point de rupture à l'observation 38 par la fonction *breakpoints* semble donc être correcte.

La fonction *breakpoints* ayant détecté un point de rupture dans la série temporelle, une régression linéaire est réalisée pour chacun des deux segments de la série temporelle. Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus pour chacune des deux régressions linéaires. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour les deux régressions, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats des deux régressions linéaires sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La première régression linéaire est caractérisée par une pente de 0,2. Celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $1,94 \times 10^{-2}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Entre le début des années 1950 et la fin des années 1980, nous observons ainsi un recul d'environ 2 jours par décennie du jour de floraison du pinot noir en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.20.

La deuxième régression linéaire présente une pente de -0,16. Cependant, avec une p-valeur de 0,1098 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, n'est pas rejetée. Cela indique que la pente de la régression n'est pas statistiquement significative, et qu'il n'est donc pas possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante.

En résumé, entre 1950 et 1987, le jour de floraison du pinot noir a reculé d'environ 7 à 8 jours. Cependant, entre 1987 et 2023, aucune évolution significative de cette date n'a pu être constatée.

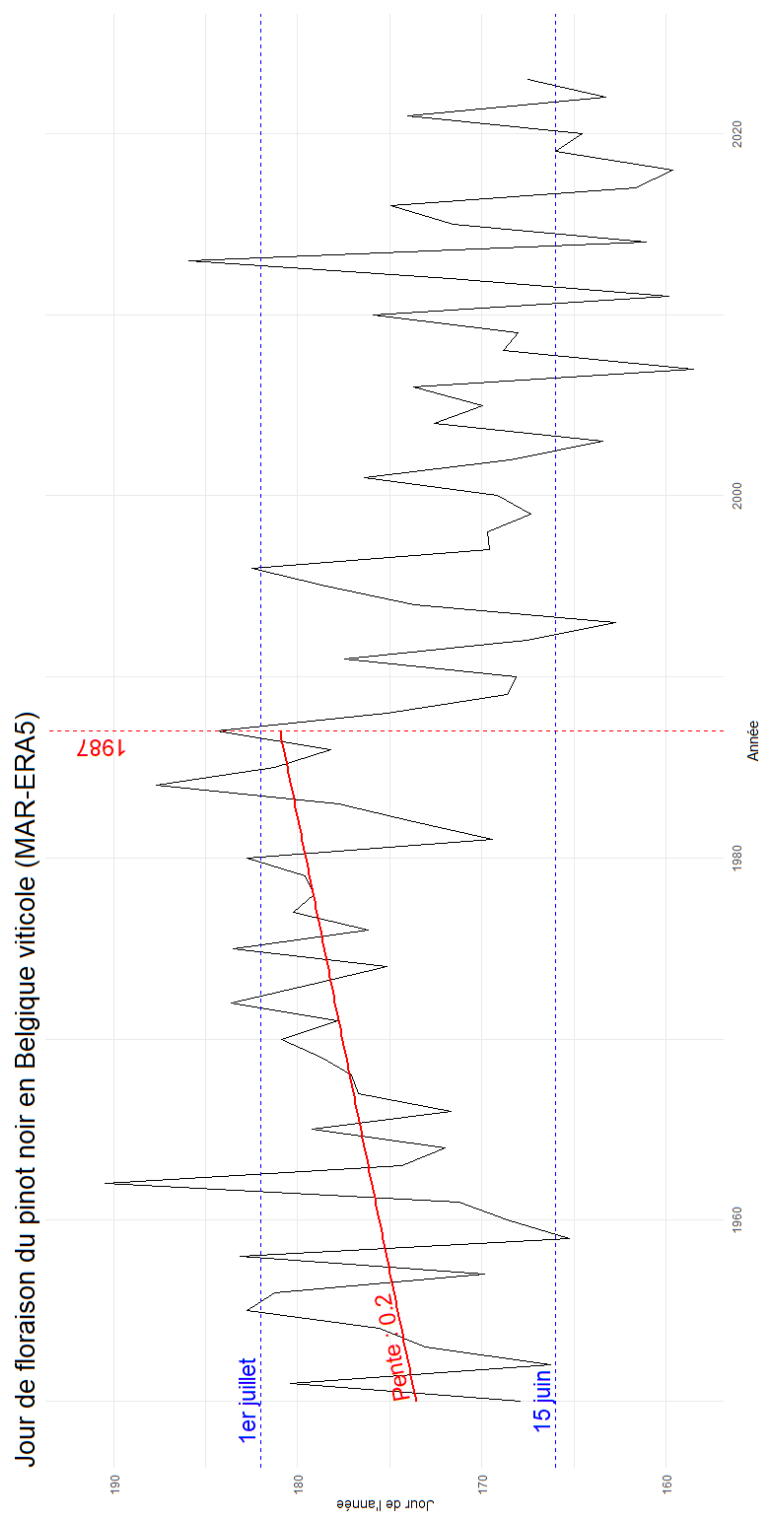


FIGURE 3.20 – Jour de floraison du pinot noir en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. La droite de régression est représentée en rouge (pente = 0,2; p-valeur =  $1,94 \times 10^{-2}$ ) et l'année du point de rupture est indiquée par la droite verticale en pointillés rouges.

### 3.3.3 Véraison

#### 3.3.3.1 Chardonnay

La fonction *breakpoints* a détecté un point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de véraison du chardonnay en Belgique viticole. Elle considère donc une partition optimale en deux segments. Le point de rupture a été détecté à la 39ème observation de la série temporelle. Les données couvrant les années de 1950 à 2023, le point de rupture à l'observation 39 correspond à l'année 1988.

La fonction *confint* indique que les observations 38 et 53 marquent les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. Cela signifie qu'avec une probabilité de 95 %, le vrai point de rupture de la série temporelle pourrait se situer n'importe où entre l'observation 38 et l'observation 53. L'estimation la plus probable du point de rupture à l'observation 39 par la fonction *breakpoints* semble donc être correcte.

La fonction *breakpoints* ayant détecté un point de rupture dans la série temporelle, une régression linéaire est réalisée pour chacun des deux segments de la série temporelle. Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus pour chacune des deux régressions linéaires. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour les deux régressions, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats des deux régressions linéaires sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La première régression linéaire est caractérisée par une pente de 0,28. Celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de 0,0261 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Entre le début des années 1950 et la fin des années 1980, nous observons ainsi un recul d'environ 3 jours par décennie du jour de véraison du chardonnay en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.21.

La deuxième régression linéaire présente une pente de -0,26. Elle est également statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de 0,0445 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Depuis la fin des années 1980, nous observons ainsi une avancée d'environ 2 à 3 jours par décennie du jour de véraison du chardonnay en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.21.

En résumé, entre 1950 et 1988, le jour de véraison du chardonnay a reculé d'un peu plus de 10 jours alors qu'entre 1988 et 2023, il a avancé d'environ 9 jours.

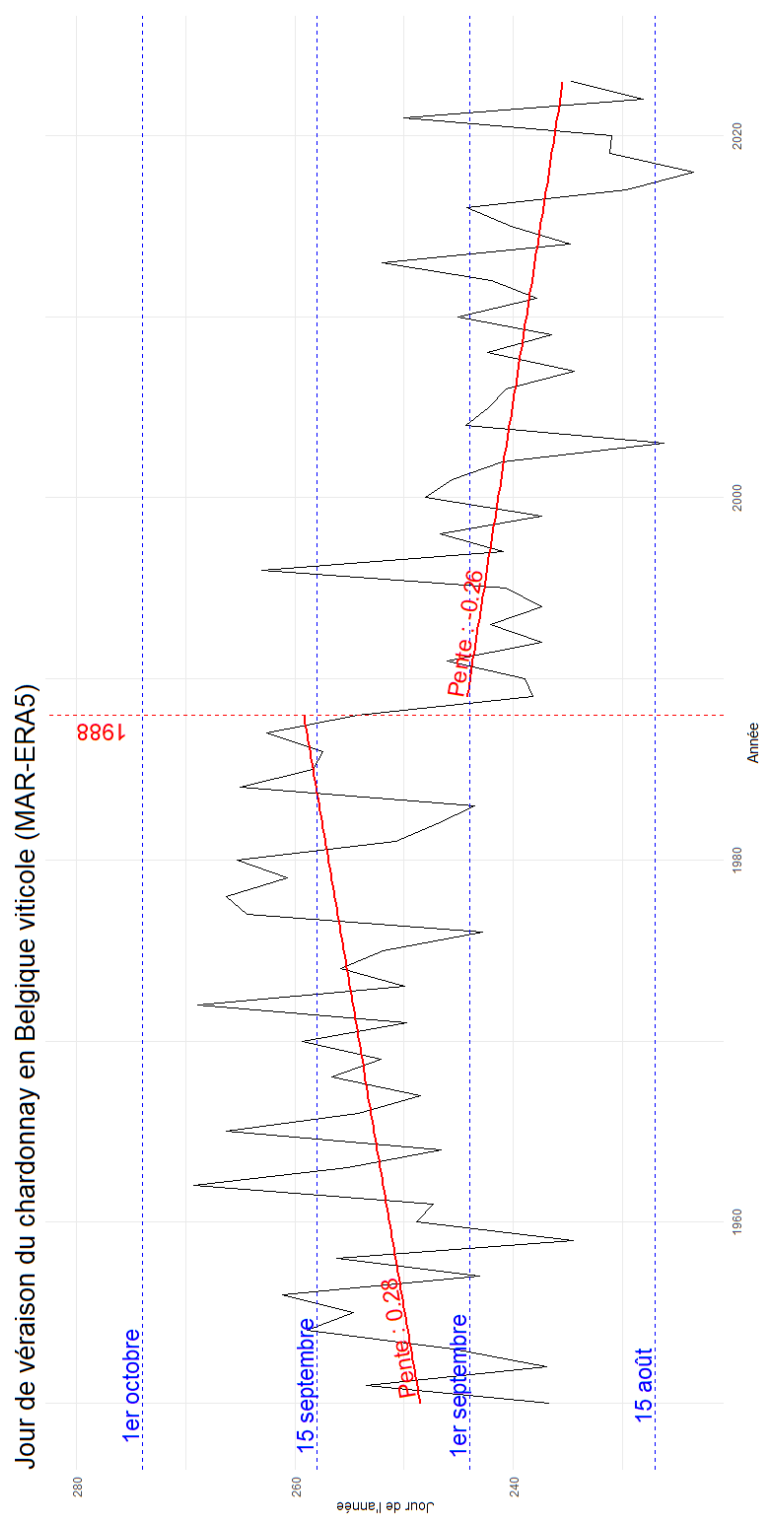


FIGURE 3.21 – Jour de véraison du chardonnay en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. Les droites de régression sont représentées en rouge (pente 1 = 0,28 ; p-valeur 1 = 0,0261 ; pente 2 = -0,26 ; p-valeur 2 = 0,0445) et l'année du point de rupture est indiquée par la droite verticale en pointillés rouges.

### 3.3.3.2 Pinot noir

La fonction *breakpoints* a détecté un point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de véraison du pinot noir en Belgique viticole. Elle considère donc une partition optimale en deux segments. Le point de rupture a été détecté à la 39ème observation de la série temporelle. Les données couvrant les années de 1950 à 2023, le point de rupture à l'observation 39 correspond à l'année 1988.

La fonction *confint* indique que les observations 38 et 53 marquent les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. Cela signifie qu'avec une probabilité de 95 %, le vrai point de rupture de la série temporelle pourrait se situer n'importe où entre l'observation 38 et l'observation 53. L'estimation la plus probable du point de rupture à l'observation 39 par la fonction *breakpoints* semble donc être correcte.

La fonction *breakpoints* ayant détecté un point de rupture dans la série temporelle, une régression linéaire est réalisée pour chacun des deux segments de la série temporelle. Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus pour chacune des deux régressions linéaires. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour les deux régressions, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats des deux régressions linéaires sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La première régression linéaire est caractérisée par une pente de 0,27. Celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de 0,0265 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Entre le début des années 1950 et la fin des années 1980, nous observons ainsi un recul d'environ 2 à 3 jours par décennie du jour de véraison du pinot noir en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.22.

La deuxième régression linéaire présente une pente de -0,25. Elle est également statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de 0,04848 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Depuis la fin des années 1980, nous observons ainsi une avancée d'environ 2 à 3 jours par décennie du jour de véraison du pinot noir en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.22.

En résumé, entre 1950 et 1988, le jour de véraison du pinot noir a reculé d'un peu plus de 10 jours alors qu'entre 1988 et 2023, il a avancé d'environ 9 jours.

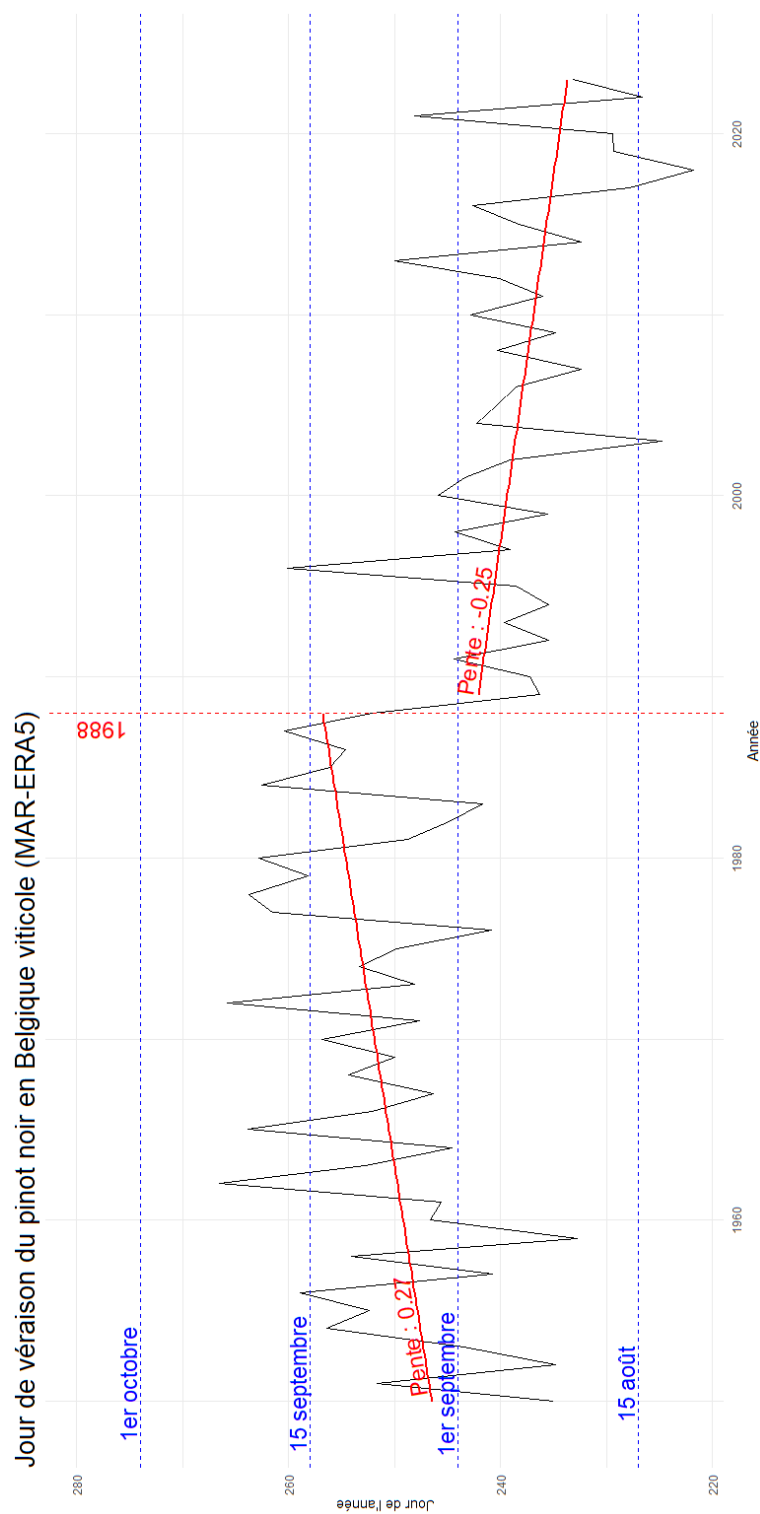


FIGURE 3.22 – Jour de véraison du pinot noir en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. Les droites de régression sont représentées en rouge (pente 1 = 0,27 ; p-valeur 1 = 0,0265 ; pente 2 = -0,25 ; p-valeur 2 = 0,04848) et l'année du point de rupture est indiquée par la droite verticale en pointillés rouges.

### 3.3.4 Maturité

#### 3.3.4.1 Chardonnay 170 g/L

La fonction *breakpoints* a détecté un point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de maturité du chardonnay (170 g/L) en Belgique viticole. Elle considère donc une partition optimale en deux segments. Le point de rupture a été détecté à la 39<sup>ème</sup> observation de la série temporelle. Les données couvrant les années de 1950 à 2023, le point de rupture à l'observation 39 correspond à l'année 1988.

La fonction *confint* indique que les observations 38 et 48 marquent les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. Cela signifie qu'avec une probabilité de 95 %, le vrai point de rupture de la série temporelle pourrait se situer n'importe où entre l'observation 38 et l'observation 48. L'estimation la plus probable du point de rupture à l'observation 39 par la fonction *breakpoints* semble donc être correcte.

La fonction *breakpoints* ayant détecté un point de rupture dans la série temporelle, une régression linéaire est réalisée pour chacun des deux segments de la série temporelle. Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus pour chacune des deux régressions linéaires. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour les deux régressions, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats des deux régressions linéaires sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La première régression linéaire est caractérisée par une pente de 0,26. Celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de 0,0226 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Entre le début des années 1950 et la fin des années 1980, nous observons ainsi un recul d'environ 2 jours par décennie du jour de maturité du chardonnay (170 g/L) en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.23.

La deuxième régression linéaire présente une pente de -0,43. Elle est également statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $8,81 \times 10^{-4}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Depuis la fin des années 1980, nous observons ainsi une avancée d'environ 4 jours par décennie du jour de maturité du chardonnay (170 g/L) en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.23.

En résumé, entre 1950 et 1988, le jour de maturité du chardonnay (170 g/L) a reculé d'un peu moins de 10 jours alors qu'entre 1988 et 2023, il a avancé d'environ 15 jours.

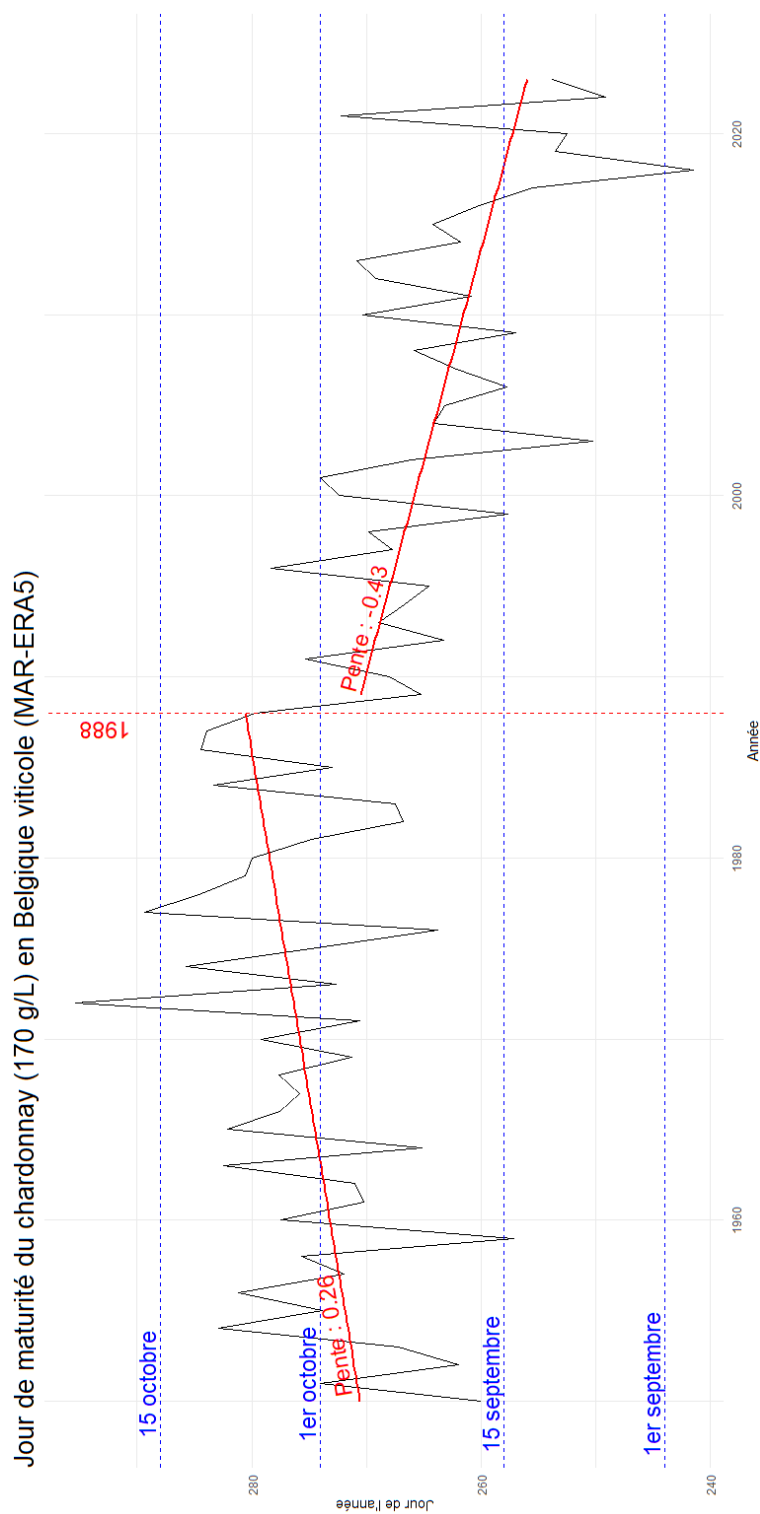


FIGURE 3.23 – Jour de maturité du chardonnay (170 g/L) en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. Les droites de régression sont représentées en rouge (pente 1 = 0,26 ; p-valeur 1 = 0,0226 ; pente 2 = -0,43 ; p-valeur 2 =  $8,81 \times 10^{-4}$ ) et l'année du point de rupture est indiquée par la droite verticale en pointillés rouges.



### 3.3.4.2 Chardonnay 190 g/L

La fonction *breakpoints* a détecté un point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de maturité du chardonnay (190 g/L) en Belgique viticole. Elle considère donc une partition optimale en deux segments. Le point de rupture a été détecté à la 27<sup>ème</sup> observation de la série temporelle. Les données couvrant les années de 1950 à 2023, le point de rupture à l'observation 27 correspond à l'année 1976.

La fonction *confint* indique que les observations 22 et 30 marquent les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. Cela signifie qu'avec une probabilité de 95 %, le vrai point de rupture de la série temporelle pourrait se situer n'importe où entre l'observation 22 et l'observation 30. L'estimation la plus probable du point de rupture à l'observation 27 par la fonction *breakpoints* semble donc être correcte.

La fonction *breakpoints* ayant détecté un point de rupture dans la série temporelle, une régression linéaire est réalisée pour chacun des deux segments de la série temporelle. Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus pour chacune des deux régressions linéaires. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour les deux régressions, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats des deux régressions linéaires sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La première régression linéaire présente une pente de 0,1. Cependant, avec une p-valeur de 0,633 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, n'est pas rejetée. Cela indique que la pente de la régression n'est pas statistiquement significative, et qu'il n'est donc pas possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante.

La deuxième régression linéaire est caractérisée par une pente de -0,51. Contrairement à la première, celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $2,72 \times 10^{-8}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Entre la fin des années 1970 et l'année 2023, nous observons ainsi une avancée d'environ 5 jours par décennie du jour de maturité (190 g/L) du chardonnay en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.24.

En résumé, entre 1950 et 1976, aucune évolution significative n'a été constatée pour le jour de maturité (190 g/L) du chardonnay, mais entre 1976 et 2023, celui-ci a avancé d'environ 23 jours.

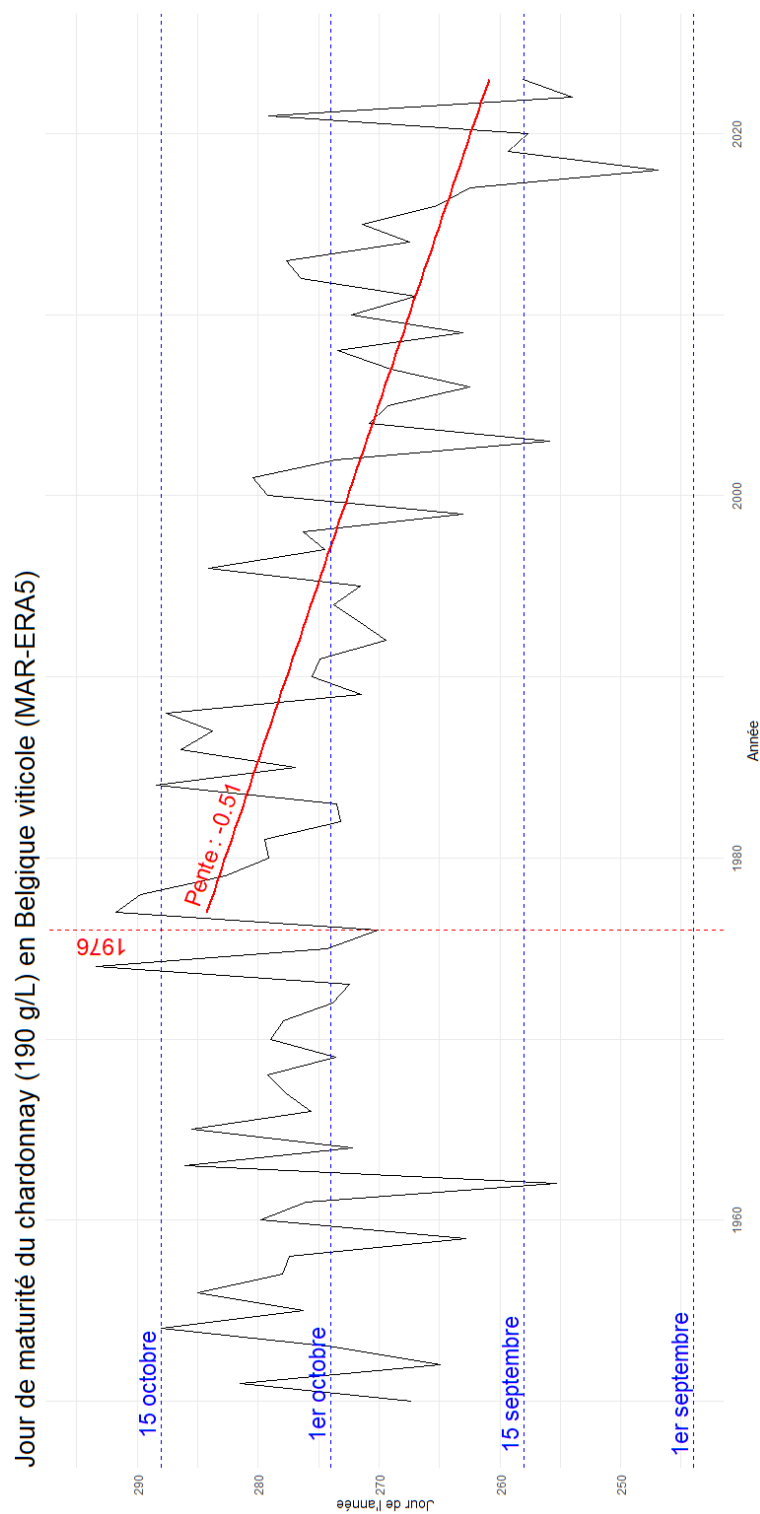


FIGURE 3.24 – Jour de maturité du chardonnay (190 g/L) en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. La droite de régression est représentée en rouge (pente = -0,51 ; p-valeur =  $2,72 \times 10^{-8}$ ) et l'année du point de rupture est indiquée par la droite verticale en pointillés rouges.

### 3.3.4.3 Pinot noir 170 g/L

La fonction *breakpoints* a détecté un point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de maturité du pinot noir (170 g/L) en Belgique viticole. Elle considère donc une partition optimale en deux segments. Le point de rupture a été détecté à la 39ème observation de la série temporelle. Les données couvrant les années de 1950 à 2023, le point de rupture à l'observation 39 correspond à l'année 1988.

La fonction *confint* indique que les observations 38 et 49 marquent les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. Cela signifie qu'avec une probabilité de 95 %, le vrai point de rupture de la série temporelle pourrait se situer n'importe où entre l'observation 38 et l'observation 49. L'estimation la plus probable du point de rupture à l'observation 39 par la fonction *breakpoints* semble donc être correcte.

La fonction *breakpoints* ayant détecté un point de rupture dans la série temporelle, une régression linéaire est réalisée pour chacun des deux segments de la série temporelle. Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus pour chacune des deux régressions linéaires. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour les deux régressions, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats des deux régressions linéaires sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La première régression linéaire est caractérisée par une pente de 0,26. Celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de 0,0236 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Entre le début des années 1950 et la fin des années 1980, nous observons ainsi un recul d'environ 2 jours par décennie du jour de maturité du pinot noir (170 g/L) en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.25.

La deuxième régression linéaire présente une pente de -0,42. Elle est également statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $9,93 \times 10^{-4}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Depuis la fin des années 1980, nous observons ainsi une avancée d'environ 4 jours par décennie du jour de maturité du pinot noir (170 g/L) en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.25.

En résumé, entre 1950 et 1988, le jour de maturité du pinot noir (170 g/L) a reculé d'environ 7 à 8 jours alors qu'entre 1988 et 2023, il a avancé d'un peu moins de 15 jours.

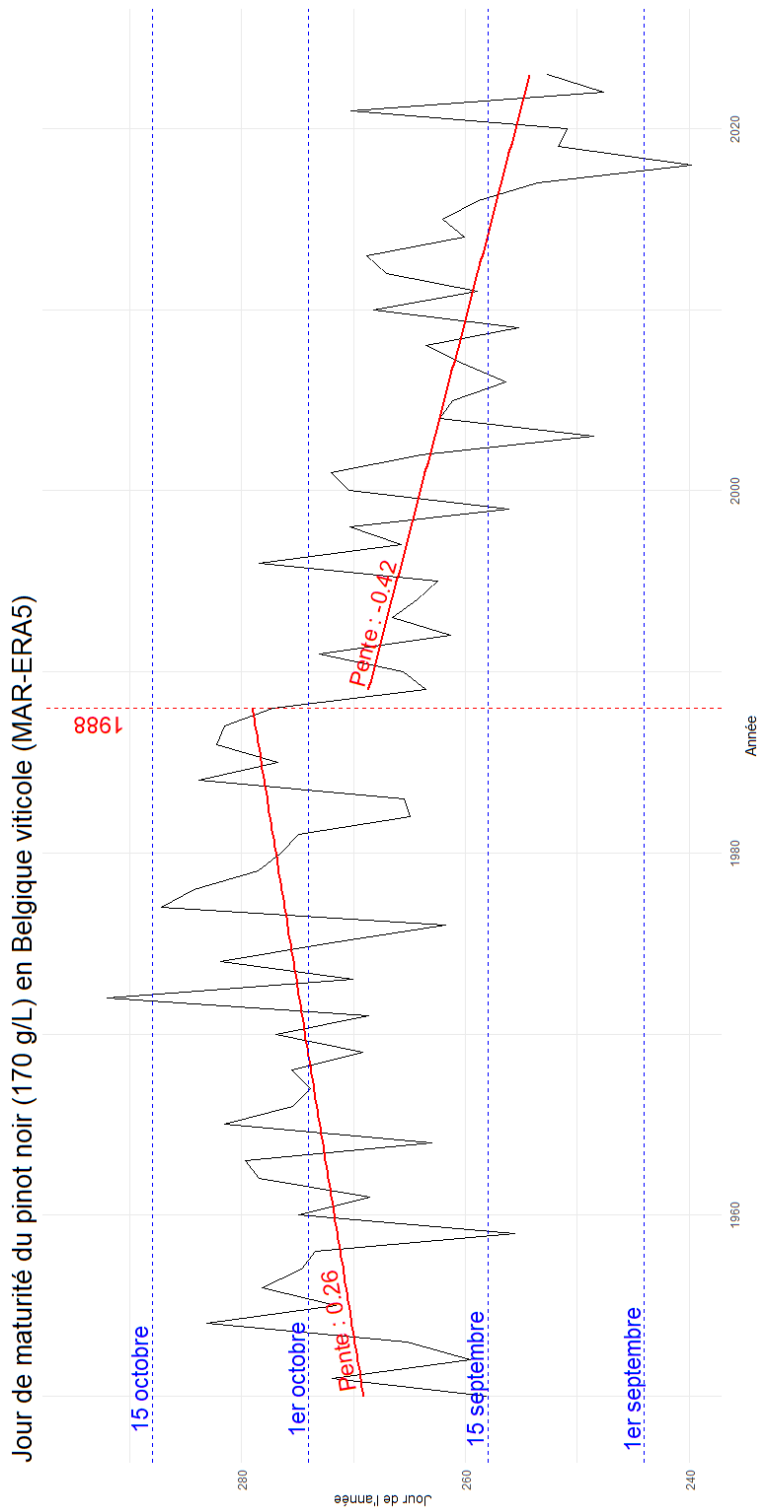


FIGURE 3.25 – Jour de maturité du pinot noir (170 g/L) en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. Les droites de régression sont représentées en rouge (pente 1 = 0,26 ; p-valeur 1 = 0,0236 ; pente 2 = -0,42 ; p-valeur 2 =  $9,93 \times 10^{-4}$ ) et l'année du point de rupture est indiquée par la droite verticale en pointillés rouges.

#### 3.3.4.4 Pinot noir 190 g/L

La fonction *breakpoints* a détecté un point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de maturité du pinot noir (190 g/L) en Belgique viticole. Elle considère donc une partition optimale en deux segments. Le point de rupture a été détecté à la 27ème observation de la série temporelle. Les données couvrant les années de 1950 à 2023, le point de rupture à l'observation 27 correspond à l'année 1976.

La fonction *confint* indique que les observations 24 et 30 marquent les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. Cela signifie qu'avec une probabilité de 95 %, le vrai point de rupture de la série temporelle pourrait se situer n'importe où entre l'observation 24 et l'observation 30. L'estimation la plus probable du point de rupture à l'observation 27 par la fonction *breakpoints* semble donc être correcte.

La fonction *breakpoints* ayant détecté un point de rupture dans la série temporelle, une régression linéaire est réalisée pour chacun des deux segments de la série temporelle. Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus pour chacune des deux régressions linéaires. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson, de Shapiro-Wilk et de Breusch-Pagan ont tous produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour les deux régressions, indiquant que les différentes hypothèses ne sont pas rejetées. Par conséquent, les résultats des deux régressions linéaires sont considérés comme valides et peuvent être interprétés avec confiance.

La première régression linéaire présente une pente de 0,18. Cependant, avec une p-valeur de 0,344 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, n'est pas rejetée. Cela indique que la pente de la régression n'est pas statistiquement significative, et qu'il n'est donc pas possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante.

La deuxième régression linéaire est caractérisée par une pente de -0,55. Contrairement à la première, celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $4,61 \times 10^{-9}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Entre la fin des années 1970 et l'année 2023, nous observons ainsi une avancée d'environ 5 à 6 jours par décennie du jour de maturité (190 g/L) du pinot noir en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.26.

En résumé, entre 1950 et 1976, aucune évolution significative n'a été constatée pour le jour de maturité (190 g/L) du pinot noir, mais entre 1976 et 2023, celui-ci a avancé d'environ 25 jours.

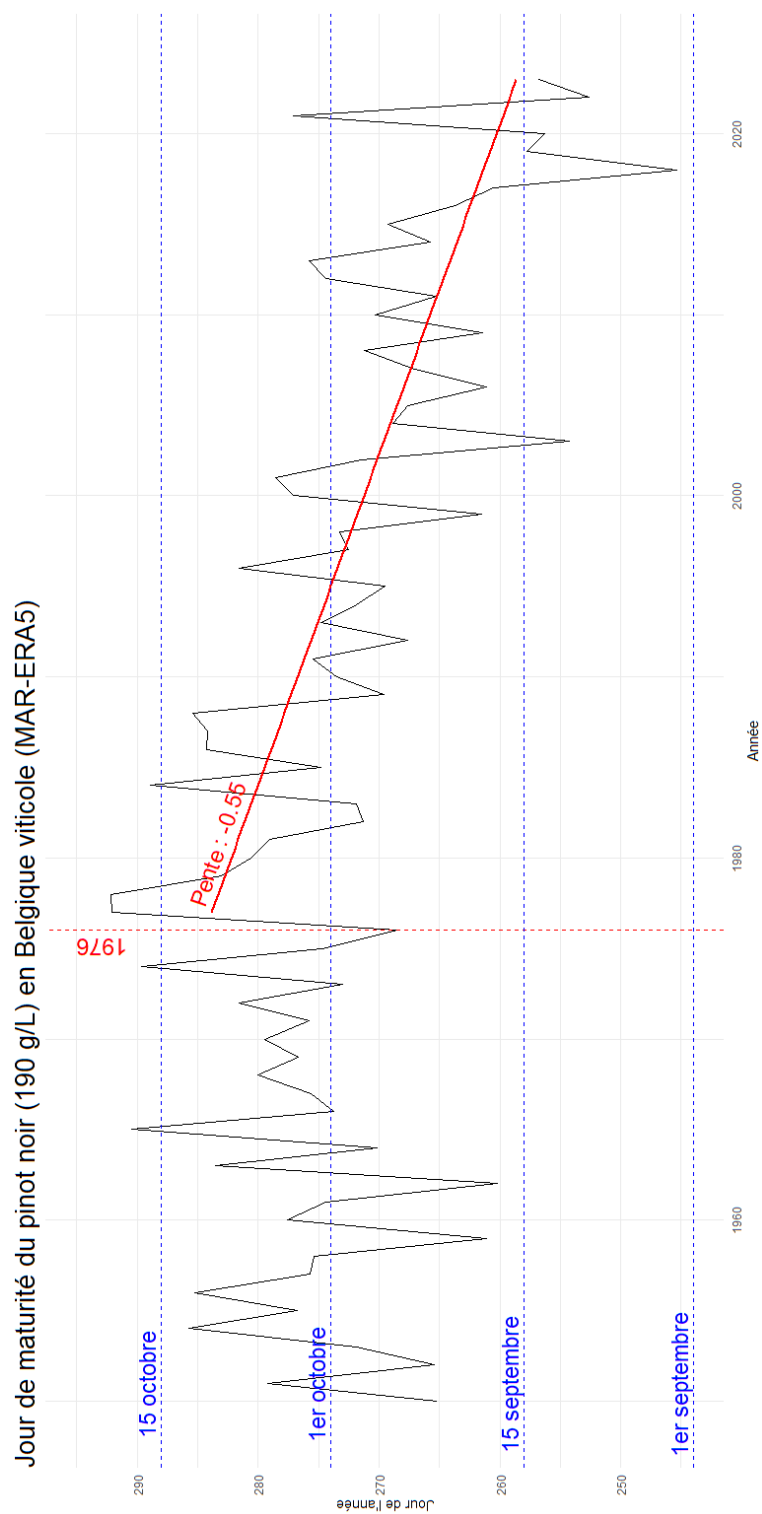


FIGURE 3.26 – Jour de maturité du pinot noir (190 g/L) en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. La droite de régression est représentée en rouge (pente = -0,55 ; p-valeur =  $4,61 \times 10^{-9}$ ) et l'année du point de rupture est indiquée par la droite verticale en pointillés rouges.

### 3.3.4.5 Pinot noir 200 g/L

La fonction *breakpoints* a détecté un point de rupture dans la série temporelle qui concerne le jour de maturité du pinot noir (200 g/L) en Belgique viticole. Elle considère donc une partition optimale en deux segments. Le point de rupture a été détecté à la 24ème observation de la série temporelle. Les données couvrant les années de 1950 à 2023, le point de rupture à l'observation 24 correspond à l'année 1973.

La fonction *confint* indique que les observations 5 et 28 marquent les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. Cela signifie qu'avec une probabilité de 95 %, le vrai point de rupture de la série temporelle pourrait se situer n'importe où entre l'observation 5 et l'observation 28. L'estimation la plus probable du point de rupture à l'observation 24 par la fonction *breakpoints* semble donc être correcte.

La fonction *breakpoints* ayant détecté un point de rupture dans la série temporelle, une régression linéaire est réalisée pour chacun des deux segments de la série temporelle. Ensuite, il est essentiel de vérifier l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus pour chacune des deux régressions linéaires. Cela garantit la validité des résultats obtenus et permet une interprétation fiable des données. Les tests de Durbin-Watson et de Breusch-Pagan ont produit des p-valeurs supérieures à 0,05 pour les deux régressions linéaires, indiquant que les hypothèses nulles de ces tests ne sont pas rejetées. Le test de Shapiro-Wilk a donné une p-valeur de 0,9424 pour la deuxième régression, ce qui confirme que l'hypothèse nulle de normalité n'est pas rejetée. En revanche, pour la première régression, le test de Shapiro-Wilk a produit une p-valeur de 0,01127, suggérant que l'hypothèse de normalité est rejetée. Étant donné qu'un des critères de validité n'est pas satisfait pour cette première régression, ses résultats doivent être interprétés avec prudence.

La première régression linéaire présente une pente de -0,05. Cependant, avec une p-valeur de 0,836 pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, n'est pas rejetée. Cela indique que la pente de la régression n'est pas statistiquement significative, et qu'il n'est donc pas possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante.

La deuxième régression linéaire est caractérisée par une pente de -0,45. Contrairement à la première, celle-ci est statistiquement significative. En effet, avec une p-valeur de  $2,47 \times 10^{-7}$  pour le test de Student, l'hypothèse nulle, selon laquelle la pente est égale à zéro, est rejetée. Il est donc possible de conclure à une tendance significative au fil du temps pour la variable dépendante. Entre le début des années 1970 et l'année 2023, nous observons ainsi une avancée d'environ 4 à 5 jours par décennie du jour de maturité (200 g/L) du pinot noir en Belgique viticole, comme illustré sur la figure 3.27.

En résumé, entre 1950 et 1973, aucune évolution significative n'a été constatée pour le jour de maturité (200 g/L) du pinot noir, mais entre 1973 et 2023, celui-ci a avancé d'environ 22 à 23 jours.

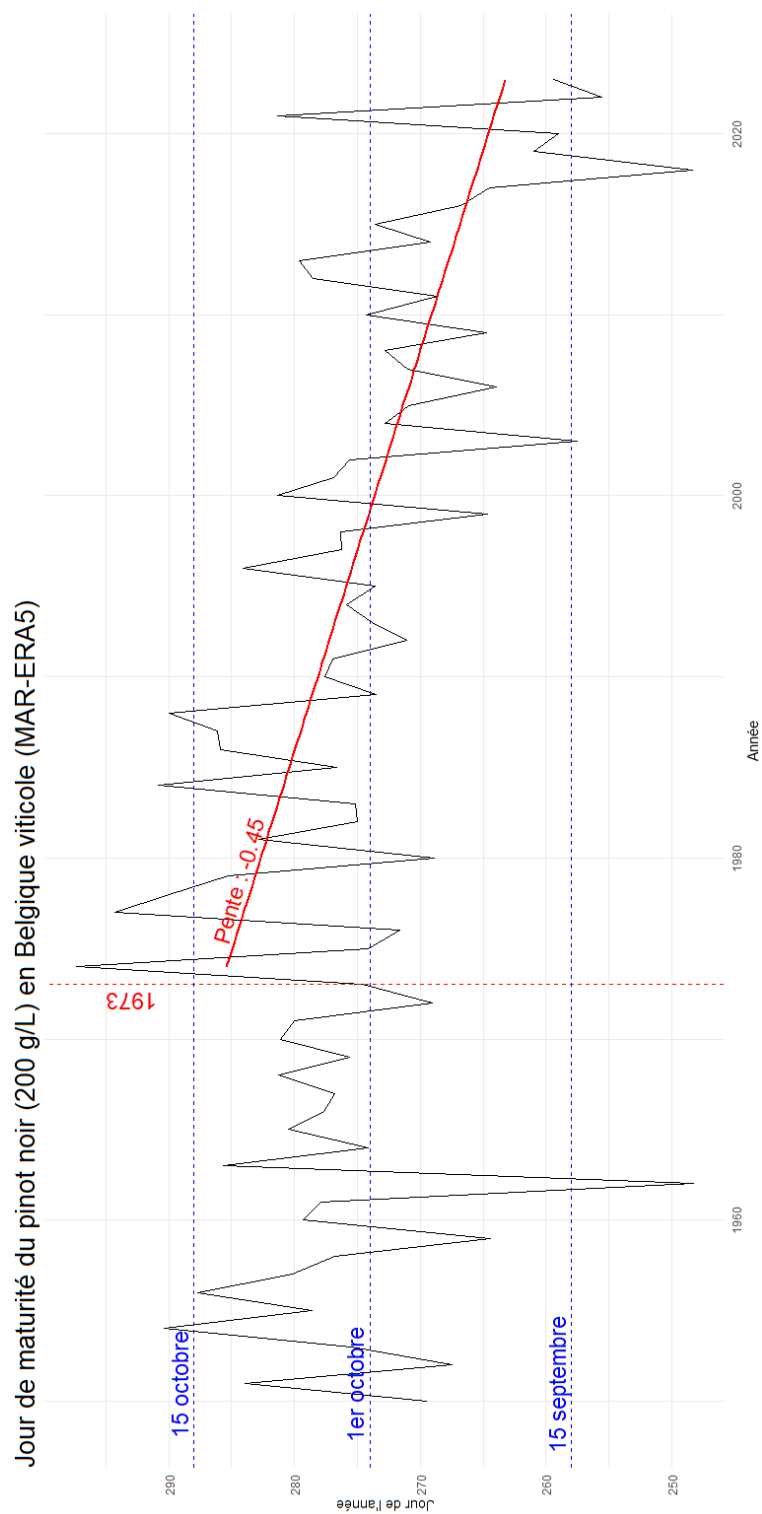


FIGURE 3.27 – Jour de maturité du pinot noir (200 g/L) en Belgique viticole entre 1950 et 2023 calculé sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5. La droite de régression est représentée en rouge (pente =  $-0,45$ ; p-valeur =  $2,47 \times 10^{-7}$ ) et l'année du point de rupture est indiquée par la droite verticale en pointillés rouges.





# Chapitre 4

## Discussion

### 4.1 Indices bioclimatiques

En 2023, l'indice héliothermique de Huglin en Belgique viticole était de 1742 unités. Notre analyse de cet indice, qui révèle une augmentation de 108 unités par décennie depuis le milieu des années 1970, indique un changement récent dans le climat de la région. À l'exception de 2021, depuis 2016, cet indice dépasse systématiquement le seuil de 1500 unités, marquant la limite entre un climat très frais et un climat frais. Ce basculement de la Belgique viticole d'un climat très frais, où seuls les cépages très précoces ou précoces comme le müllerturgau, le pinot blanc, le gamay ou le gewurztraminer peuvent atteindre la maturité (Tonietto et Carbonneau, 2004), à un climat frais permettant à une plus grande variété de cépages d'atteindre la maturité, tant blancs que rouges (riesling, pinot noir, chardonnay, merlot ou cabernet franc) (Tonietto et Carbonneau, 2004), indique que la Belgique viticole est passée d'un climat peu favorable à la culture de la vigne à un climat autrefois caractéristique de la vallée de la Loire (Neethling *et al.*, 2012).

De plus, les résultats obtenus pour l'indice héliothermique de Huglin en Belgique viticole semblent concorder avec certaines tendances observées dans d'autres régions viticoles européennes proches. En effet, avec une augmentation de +10,79 unités par an en Belgique viticole depuis le milieu des années 1970, nos résultats sont comparables à ceux trouvés par Jones *et al.* (2005) à Colmar, en France. En effet, l'analyse des données de 1972 à 2004 montre une augmentation de 413 unités de l'indice héliothermique de Huglin sur cette période, une tendance assez proche de celle observée en Belgique viticole. Cette tendance est également similaire à celle identifiée par Duchêne et Schneider (2005) pour Colmar, qui ont noté une augmentation annuelle d'environ +14,3 unités par an entre 1972 et 2003, ou de +11,6 unités par an en excluant l'année 2003. Une tendance comparable a également été observée par Koch et Oehl (2018) à Hainfeld, en Allemagne, où une augmentation de +13,638 unités par an a été mise en évidence entre 1975 et 2015. Cependant, bien que les pentes similaires suggèrent des taux de changement semblables, il est important de prendre en compte que les périodes d'analyse ne sont pas les mêmes et que

certaines sont plus courtes que d'autres avant de tirer des conclusions de ces comparaisons.

Un point de rupture a également été identifié en 1976 dans la série temporelle de l'indice héliothermique de Huglin en Belgique viticole. La présence de ce point de rupture pourrait être expliquée par un phénomène dénommé « global dimming ». Il s'agit d'une diminution de la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre (flux radiatif global) entre 1950 et 1980, probablement causée par des variations de la couverture nuageuse totale et de la quantité d'aérosols dans l'air (Wyard *et al.*, 2018). Les nuages de faible à moyenne altitude réfléchissent le rayonnement solaire vers l'espace et les aérosols, tels que les particules de sulfate, peuvent modifier directement le flux radiatif global en diffusant et/ou en absorbant le rayonnement solaire (Wyard *et al.*, 2018). De plus, ces deux causes ne sont pas complètement indépendantes car les aérosols peuvent modifier les propriétés des nuages, ce qui change leur albédo et leur durée de vie (Wyard *et al.*, 2018). Ce phénomène a ensuite été suivi par une augmentation de la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre, notamment en Europe (Wyard *et al.*, 2018). Ce « global dimming » pourrait être la cause d'une baisse puis d'une augmentation de la température de l'air, ce qui aurait impacté l'indice héliothermique de Huglin entre 1950 et 1980.

Concernant l'indice de fraîcheur des nuits pour la Belgique viticole, en 2023, celui-ci était de 15,83°C. Notre analyse révèle une augmentation de cet indice de 0,2°C par décennie depuis le début des années 1950. Bien que plusieurs années depuis 1950 aient présenté des valeurs d'indice de fraîcheur des nuits dépassant le seuil de 12°C (limite entre les nuits très fraîches et les nuits fraîches), cette tendance indique que la Belgique viticole est désormais caractérisée par un climat où les nuits sont majoritairement fraîches. Dans cette catégorie climatique, la maturation des raisins se déroule dans des conditions qui peuvent être plus ou moins fraîches selon la précocité des cépages (Tonietto et Carbonneau, 2004). Cependant, de manière générale, il n'est pas possible dépasser le seuil maximum de température nocturne favorable à la maturation, et ce, pour l'ensemble des cépages cultivés (Tonietto et Carbonneau, 2004).

Par ailleurs, les résultats obtenus pour l'indice de fraîcheur des nuits en Belgique viticole sont presque identiques aux tendances observées à Angers et à Bourges dans la vallée de la Loire entre 1960 et 2010, comme l'ont montré Neethling *et al.* (2012). En effet, les résultats montrent une augmentation de 0,2°C par décennie pour l'indice de fraîcheur des nuits dans les deux villes. Cependant, bien que les pentes similaires suggèrent des taux de changement semblables, il est important de prendre en compte que les périodes d'analyse ne sont pas les mêmes et que l'une est plus courte que l'autre.

## 4.2 Stades phénologiques

En 2023, le jour de débourrement du chardonnay en Belgique viticole a eu lieu aux environs du 20 avril (110<sup>e</sup> jour de l'année), tandis que le jour de débourrement du pinot noir s'est produit autour du 22 avril (112<sup>e</sup> jour de l'année). Notre analyse révèle une avancée de 1,4 jour par décennie depuis 1950 pour le débourrement du chardonnay, et de 1,5 jour par décennie pour le pinot noir. Ainsi, sur une période de 73 ans, cela représente une avancée d'environ 10 jours pour les deux cépages. Les tissus de la vigne ne supportant plus le gel après le débourrement (Doutreloup *et al.*, 2022), une telle avancée du jour du débourrement du chardonnay et du pinot noir en Belgique viticole entre 1950 et 2023 a augmenté le risque encouru par les vignes face au phénomène de gelées tardives.

De plus, les résultats pour le débourrement du chardonnay et du pinot noir en Belgique viticole sont globalement cohérents avec ceux observés par Jones *et al.* (2005) en Bourgogne. Ces derniers ont constaté une avancée d'environ 2 jours par décennie pour le pinot noir entre 1952 et 2004. Cette tendance correspond également plus ou moins aux travaux d'Urhausen *et al.* (2011) qui montrent une avancée d'environ 2 jours par décennie pour le débourrement entre 1966 et 2005 dans la vallée de la Moselle, au Luxembourg, pour divers cépages tels que l'auxerrois, l'elbling, le pinot blanc, le pinot gris, le riesling, le rivaner, et le traminer. Cependant, bien que les pentes similaires suggèrent des taux de changement semblables, il est important de prendre en compte que les périodes d'analyse ne sont pas identiques et que les tendances ne se réfèrent pas toujours aux mêmes cépages.

Contrairement au débourrement, aucune tendance significative n'a été observée pour le jour de floraison en Belgique viticole, tant pour le chardonnay que pour le pinot Noir, à l'exception d'un recul de 2 jours par décennie avant 1987. Ce point de rupture pourrait également être lié au « global dimming », mais il semble se produire presque 10 ans après le phénomène de diminution de la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre. L'analyse des cartes montrant la différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de floraison du chardonnay et du pinot noir révèle, quant à elle, que le relief ardennais a subi l'évolution la plus marquée. En effet, une avancée de la floraison y a été constatée, plus importante que dans le reste de la Belgique. Cela pourrait donc indiquer un réchauffement plus prononcé de l'Ardenne entre 1950 et 2023.

En 2023, le jour de véraison du chardonnay en Belgique viticole a eu lieu aux environs du 23 août (235<sup>e</sup> jour de l'année), tandis que le jour de véraison du pinot noir s'est produit autour du 21 août (233<sup>e</sup> jour de l'année). Notre analyse révèle un recul de 2,8 jours par décennie pour le chardonnay entre 1950 et 1988, suivi d'une avancée de 2,6 jours par décennie entre 1988 et 2023. Pour le pinot noir, nous avons observé un recul de 2,7 jours par décennie entre 1950 et 1988, puis une avancée de 2,5 jours par décennie entre 1988 et 2023. Ainsi, sur la période de 35 ans (1988-2023), cela représente une avancée d'environ 9

jours pour les deux cépages. Cette avancée du jour de véraison a augmenté le risque de production de vins déséquilibrés, souvent riches en alcool et manquant d'acidité, de fraîcheur et d'expression aromatique (Parker *et al.*, 2020) car elle conduit à des maturations sous des températures plus élevées (Ollat et Touzard, 2024). Les points de rupture en 1988 pour le chardonnay ainsi que pour le pinot noir pourraient également être liés au « global dimming », mais ils semblent se produire presque 10 ans après le phénomène de diminution de la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre.

Par ailleurs, les résultats les plus proches de ceux observés pour la véraison du chardonnay et du pinot noir en Belgique viticole sont ceux de Jones *et al.* (2005) qui ont mis en évidence une avancée d'environ 2 jours par décennie entre 1952 et 2004 pour le pinot noir en Bourgogne, ainsi que ceux de Duchêne et Schneider (2005), qui ont identifié une avancée de 1,7 jour par décennie entre le début des années 1960 et le début des années 2000 pour le riesling à Bergheim, en Alsace. Cependant, bien que les pentes similaires suggèrent des taux de changement semblables, il est important de prendre en compte que les périodes d'analyse ne sont pas identiques et que les tendances ne se réfèrent pas toujours aux mêmes cépages.

En outre, l'analyse des cartes montrant la différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de véraison du chardonnay et du pinot noir révèle également une avancée de la véraison plus marquée dans l'Ardenne que dans le reste de la Belgique. Ce constat renforce notre hypothèse selon laquelle l'Ardenne a connu un réchauffement plus prononcé que les autres régions belges entre 1950 et 2023.

En 2023, la maturité du chardonnay a été observée aux alentours du 11 septembre (254<sup>e</sup> jour de l'année) avec une concentration de 170 grammes de sucre par litre, et autour du 15 septembre (258<sup>e</sup> jour de l'année) avec une concentration de 190 grammes de sucre par litre. Pour le pinot noir, la maturité a eu lieu aux environs du 10 septembre (253<sup>e</sup> jour de l'année) avec une concentration de 170 grammes de sucre par litre, proche du 14 septembre (257<sup>e</sup> jour de l'année) avec 190 grammes de sucre par litre, et autour du 16 septembre (259<sup>e</sup> jour de l'année) avec 200 grammes de sucre par litre. Notre analyse révèle plusieurs tendances. En effet, entre 1950 et 1988, le jour de maturité du chardonnay pour une concentration de 170 g/L a reculé de 2,6 jours par décennie, puis, entre 1988 et 2023, celui-ci a avancé de 4,3 jours par décennie. Pour une concentration de 190 g/L, le jour de maturité du chardonnay a avancé de 5,1 jours par décennie entre 1976 et 2023. Concernant le pinot noir, le jour de maturité pour une concentration de 170 g/L a montré un recul de 2,6 jours par décennie entre 1950 et 1988, puis une avancée de 4,2 jours par décennie entre 1988 et 2023. Pour une concentration de 190 g/L, le jour de maturité a avancé de 5,5 jours par décennie entre 1976 et 2023. Enfin, pour une concentration de 200 g/L, l'avancée du jour de maturité est de 4,5 jours par décennie entre 1973 et 2023. Toutes ces avancées du jour de maturité pour différentes concentrations en sucre depuis les années 1970-1980 ont conduit à des maturations sous des températures plus élevées qu'auparavant. Cela augmente le risque de produire

des vins déséquilibrés, souvent riches en alcool et manquant d'acidité, de fraîcheur et d'expression aromatique (Parker *et al.*, 2020). Les points de rupture en 1973 et 1976 pour le chardonnay ainsi que pour le pinot noir pourraient également être liés au « global dimming », alors que les points de rupture en 1988 semblent se produire presque 10 ans après le phénomène de diminution de la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre.

De plus, les résultats pour la maturité du chardonnay et du pinot noir en Belgique viticole sont globalement cohérents avec ceux observés par Jones *et al.* (2005). En effet, les tendances qu'ils ont identifiées montrent une avancée de 7 jours par décennie de la récolte du riesling entre 1972 et 2004 en Alsace, une avancée de 6 jours par décennie de la récolte du pinot noir entre 1975 et 2004 à Reims, une avancée de 3 jours par décennie de la récolte du pinot noir entre 1952 et 2004 en Bourgogne et une avancée de 4 jours par décennie de la récolte du riesling entre 1955 et 2004 à Geisenheim en Allemagne. Une avancée de 4,6 jours par décennie pour la récolte du riesling à Bergheim en Allemagne entre 1972 et 2002 a également été observée par Duchêne et Schneider (2005). De plus, les travaux de Bock *et al.* (2011) montrent qu'à proximité de Wurtzbourg en Bavière, où sont cultivés les cépages müller-thurgau, riesling et silvaner, la récolte a avancé de 4 à 5 jours par décennie entre 1968 et 2010. Cependant, bien que les pentes similaires suggèrent des taux de changement semblables, il est important de prendre en compte que les périodes d'analyse ne sont pas identiques et que les tendances ne se réfèrent pas toujours aux mêmes cépages ainsi qu'aux mêmes concentrations en sucre.

En outre, l'analyse des cartes montrant la différence entre la moyenne de la dernière décennie (2014-2023) et la moyenne des années 1950 pour le jour de maturité du chardonnay et du pinot noir indique qu'il serait maintenant possible d'atteindre la maturité pour les différentes concentrations en sucre (170 g/L, 190 g/L et 200 g/L) en Ardenne, alors que cela n'était pas possible auparavant. Ce constat renforce notre hypothèse selon laquelle l'Ardenne a connu un réchauffement plus prononcé que les autres régions belges entre 1950 et 2023.



# Chapitre 5

## Conclusions et perspectives

L'augmentation des températures causée par les changements climatiques entraîne un avancement des stades phénologiques de la vigne, ce qui peut avoir de nombreuses répercussions sur la viticulture. Il est donc crucial de connaître l'occurrence et les dates des différents stades phénologiques pour produire des raisins de qualité destinés à la vinification. Dans cette optique, sur base des sorties du modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5, le débourrement, la floraison, la véraison et la maturité du chardonnay et du pinot noir ainsi que l'indice héliothermique de Huglin et l'indice de fraîcheur des nuits ont été modélisés pour la période 1950-2023. Les résultats de ces modélisations ont été utilisés afin de produire des cartes mais aussi des régressions linéaires qui ont permis de faire apparaître des tendances.

Les résultats de la modélisation de l'indice héliothermique de Huglin révèlent un changement notable du climat en Belgique viticole ces dernières années, cette région étant passée d'un climat très frais à un climat frais. Par ailleurs, l'indice de fraîcheur des nuits confirme également cette évolution en montrant que les nuits sont désormais majoritairement fraîches, ce qui n'était pas le cas auparavant.

En ce qui concerne les stades phénologiques, les tendances réalisées à partir des résultats de la modélisation sont pour la plupart significatives et indiquent un avancement des stades phénologiques similaire à celui observé dans d'autres régions viticoles européennes proches de la Belgique. Les cartes issues de la modélisation mettent également en évidence un réchauffement plus marqué en Ardenne par rapport aux autres régions de Belgique depuis les années 1950, soulignant ainsi l'importance des données phénologiques comme indicateurs du réchauffement climatique.

Pour approfondir et enrichir ce mémoire, il serait pertinent d'étudier d'autres cépages en plus du chardonnay et du pinot noir en Belgique. Cela impliquerait de paramétrer les modèles afin qu'ils puissent simuler les stades phénologiques de ces cépages additionnels. De plus, il serait intéressant d'étudier les évolutions futures de la vigne en reproduisant ce travail pour les décennies à venir. Une telle analyse aiderait le monde viticole belge à mieux anticiper et s'adapter aux impacts futurs des changements climatiques sur la vigne.





# Bibliographie

- ANDRÉ, G., ANDRÉ, M. et LACOMBE, T. (2017). *Vitis labrusca* L. et ses principaux hybrides en Franche-Comté, contribution à leur caractérisation. *Les Nouvelles Archives de la Flore jurassienne et du nord-est de la France*, (15):93–111. <https://hal.inrae.fr/hal-02620528>.
- ARLO RICHARDSON, E., SEELEY, S. D. et WALKER, D. R. (1974). A Model for Estimating the Completion of Rest for ‘Redhaven’ and ‘Elberta’ Peach Trees1. *HortScience*, 9(4):331–332. <https://journals.ashs.org/view/journals/hortsci/9/4/article-p331.xml>.
- BAGGIOLINI, M. (1952). Les stades repères dans le développement de la vigne et leur utilisation pratique, Station Féd. *Essais Agric., Lausanne*.
- BAI, J. (1994). LEAST SQUARES ESTIMATION OF A SHIFT IN LINEAR PROCESSES. *Journal of Time Series Analysis*, 15(5):453–472. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-9892.1994.tb00204.x>.
- BAI, J. (1997a). Estimating Multiple Breaks One at a Time. *Econometric Theory*, 13(3):315–352. <http://www.jstor.org/stable/3532737>.
- BAI, J. (1997b). Estimation Of A Change Point In Multiple Regression Models. *The Review of Economics and Statistics*, 79(4):551–563. <https://ideas.repec.org/a/tpr/restat/v79y1997i4p551-563.html>.
- BAI, J. et PERRON, P. (1998). Estimating and Testing Linear Models with Multiple Structural Changes. *Econometrica*, 66(1):47–78. <http://www.jstor.org/stable/2998540>.
- BAI, J. et PERRON, P. (2003). Computation and analysis of multiple structural change models. *Journal of Applied Econometrics*, 18(1):1–22. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jae.659>.
- BENMEHAIA, R. (2017). *APPROCHE MORPHOLOGIQUE, PHYSIOLOGIQUE ET BIOCHIMIQUE DE LA FERTILITÉ DES BOURGEONS LATENTS DE LA VIGNE (Vitis vinifera L.)*. Thèse, Université Frères Mentouri - Constantine 1, Constantine. [https://www.researchgate.net/publication/321294861\\_APPROCHE\\_MORPHOLOGIQUE\\_PHYSIOLOGIQUE\\_ET\\_BIOCHIMIQUE\\_DE\\_LA\\_FERTILITE\\_DES\\_BOURGEONS\\_LATENTS\\_DE\\_LA\\_VIGNE\\_Vitis\\_vinifera\\_L](https://www.researchgate.net/publication/321294861_APPROCHE_MORPHOLOGIQUE_PHYSIOLOGIQUE_ET_BIOCHIMIQUE_DE_LA_FERTILITE_DES_BOURGEONS_LATENTS_DE_LA_VIGNE_Vitis_vinifera_L).

- BLOESCH, B. et VIRET, O. (2008). Stades phénologiques repères de la vigne. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, 40(6):1–4. [https://api.agrometeo.ch/storage/uploads/stades\\_pheno\\_vigne.pdf](https://api.agrometeo.ch/storage/uploads/stades_pheno_vigne.pdf).
- BOCK, A., SPARKS, T., ESTRELLA, N. et MENZEL, A. (2011). Changes in the phenology and composition of wine from Franconia, Germany. *Climate Research*, 50(1):69–81. <https://doi.org/10.3354/cr01048>.
- BONHOMME, M., RAGEAU, R. et LACOINTE, A. (2010). Optimization of Endodormancy Release Models, Using Series of Endodormancy Release Data Collected in France. *Acta Horticulturae*, (872):51–60. [https://www.actahort.org/books/872/872\\_4.htm](https://www.actahort.org/books/872/872_4.htm).
- COMTE, V., SCHNEIDER, L., CALANCA, P. et REBETEZ, M. (2022). Effects of climate change on bioclimatic indices in vineyards along Lake Neuchatel, Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 147:423–436. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03836-1>.
- DESTRAC-IRVINE, A., BARBEAU, G., DE RESSÉGUIER, L., DUFOURCQ, T., DUMAS, V., GARCÍA DE CORTÁZAR-ATAURI, I., OJEDA, H., SAURIN, N., VAN LEEUWEN, C. et DUCHÊNE, E. (2017). *Phénologie de la vigne : quels stades observer et comment ?* INRA Science & Impact, Colmar. <https://www-iuem.univ-brest.fr/wapps/letg/adviclim/BDX/PDF/fiche%20Vigne%20PerphClim%20VDER.pdf>.
- DIRECTION DE L'INSPECTION ÉCONOMIQUE (2018). La viticulture belge en chiffres : récolte et agréments en 2017. Rapport technique, Service public fédéral Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie, Bruxelles. <https://economie.fgov.be/fr/publications/la-viticulture-belge-recolte>.
- DOUBA, O., BOUZGHAIA, M. et MOKHTARI, M. (2019). Comparaison entre les méthodes d'interpolation spatiale : Application aux grilles des modèles ALADIN et AROME. *JAMA*, 3:13–18. <https://onm-blog.meteo.dz/?p=424>.
- DOUTRELOUP, S., BOIS, B., POHL, B., ZITO, S. et RICHARD, Y. (2022). Climatic comparison between Belgium, Champagne, Alsace, Jura and Bourgogne for wine production using the regional model MAR. *OENO One*, 56(3):1–17. <https://oeno-one.eu/article/view/5356>.
- DROULIA, F. et CHARALAMPOPOULOS, I. (2022). A Review on the Observed Climate Change in Europe and Its Impacts on Viticulture. *Atmosphere*, 13(5). <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/5/837>.
- DUCHÊNE, E. et SCHNEIDER, C. (2005). Grapevine and climatic changes : a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, 25(1):93–99. <https://hal.science/hal-00886271>.

- EICHHORN, K. W. et LORENZ, D. H. (1977). Phänologische Entwicklungsstadien der Rebe. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 29(8):119–120. [https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar\\_derivate\\_00037935/1977-032.pdf](https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00037935/1977-032.pdf).
- García de CORTÁZAR-ATAURI, I., CHUINE, I., DONATELLI, M., PARKER, A. et VAN LEEUWEN, C. (2010). A curvilinear process-based phenological model to study impacts of climatic change on grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Proceedings of Agro*, pages 907–908. [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](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).
- GORISSE, E. (2017). *Influence de la température sur le comportement de la vigne dans le contexte du domaine Château Cheval Blanc*. Mémoire, Institut Agro Montpellier, Montpellier. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01870021>.
- HALES, R., NELSON, E., WILLIAMS, G., JONES, N., AMES, D. et JONES, J. (2021). The Grids Python Tool for Querying Spatiotemporal Multidimensional Water Data. *Water*, 13:2066. <https://doi.org/10.3390/w13152066>.
- HALL, A. et JONES, G. (2010). Spatial analysis of climate in winegrape-growing regions in Australia : Climate in winegrape growing regions in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16(3):389–404. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1755-0238.2010.00100.x>.
- HUGLIN, M. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 64:1117–1126. <https://hal.inrae.fr/hal-02732734>.
- IRM (2020). Rapport climatique 2020 : de l'information aux services climatiques. Rapport technique, Uccle. <https://www.meteo.be/uploads/media/5f7c66570cae5/fodb17-0001-raclimat2020-a4-fr-v6-web.pdf?token=/uploads/media/5f7c66570cae5/fodb17-0001-raclimat2020-a4-fr-v6-web.pdf>.
- JONES, G., DUCHÊNE, E., TOMASI, D., YUSTE, J., BRASLAVSKA, O., SCHULTZ, H., MARTINEZ, C., S., B., LANGELLIER, F., PERRUCHOT, C. et GUIMBERTEAU, G. (2005). Changes in European winegrape phenology and relationships with climate. *Proc. XIV GESCO Symposium*, 1:55–61. [https://www.researchgate.net/publication/285632906\\_Changes\\_in\\_European\\_winegrape\\_phenology\\_and\\_relationships\\_with\\_climate](https://www.researchgate.net/publication/285632906_Changes_in_European_winegrape_phenology_and_relationships_with_climate).
- KITTEL, C. (2021). *Present and future sensitivity of the Antarctic surface mass balance to oceanic and atmospheric forcings : insights with the regional climate model MAR*. Thèse, ULiège - Université de Liège, Liège. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/258491>.

- KOCH, B. et OEHL, F. (2018). Climate Change Favors Grapevine Production in Temperate Zones. *Agricultural Sciences*, 9:247–263. <https://doi.org/10.4236/as.2018.93019>.
- LANG, G. A. (1987). Dormancy : A New Universal Terminology. *HortScience*, 22(5):817–820. <https://journals.ashs.org/view/journals/hortsci/22/5/article-p817.xml>.
- LE ROUX, R., DE RESSÉGUIER, L., KATURJI, M., ZAWAR-REZA, P., STURMAN, A., VAN LEEUWEN, C. et QUÉNOL, H. (2017). Analyse multiscalaire de la variabilité spatiale et temporelle des températures à l'échelle des appellations viticoles de saint-émilion, pomerol et leurs satellites. *Climatologie*, 14:1–17. <https://climatology.edpsciences.org/10.4267/climatologie.1243>.
- LEBON, G. (2005). *Importance des glucides lors de la floraison chez la vigne (Vitis vinifera L.). Exemples de cépages présentant une sensibilité différente à la coulure*. Thèse, Université de Reims - Champagne Ardenne, Reims. <https://theses.hal.science/tel-00011670>.
- LI, A. (2017). *Mieux Contrôler les Fluctuations de Rendement grâce à une Meilleure Compréhension des Mécanismes d'Initiation et de Différenciation des Primordia Inflorescentiels du Bourgeon Latent de Vigne*. Thèse, Université de Bordeaux, Bordeaux. <https://theses.hal.science/tel-01865825>.
- LIANG, Q., NITTEL, S., WHITTIER, J. C. et de BRUIN, S. (2018). Real-time inverse distance weighting interpolation for streaming sensor data. *Transactions in GIS*, 22(5):1179–1204. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/tgis.12458>.
- LINDSEY, R. (2024). Climate Change : Atmospheric Carbon Dioxide. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>.
- MARTINS, G. (2012). *Communautés microbiennes de la baie de raisin : incidence des facteurs biotiques et abiotiques*. Thèse, Université Bordeaux 2, Bordeaux. [https://www.researchgate.net/publication/306199887\\_Communautes\\_microbiennes\\_de\\_la\\_baie\\_de\\_raisin\\_incidence\\_des\\_facteurs\\_biotiques\\_et\\_abiotiques](https://www.researchgate.net/publication/306199887_Communautes_microbiennes_de_la_baie_de_raisin_incidence_des_facteurs_biotiques_et_abiotiques).
- 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*, 117(6):2864–2869. <https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1906731117>.
- NEETHLING, E., BARBEAU, G., BONNEFOY, C. et QUÉNOL, H. (2012). Change in climate and berry composition for grapevine varieties cultivated in the

- Loire Valley. *Climate Research*, 53(2):89–101. <http://www.jstor.org/stable/24875024>.
- OLLAT, N. et TOUZARD, J.-M. (2024). *Vigne, vin et changement climatique*. Éditions Quæ, Versailles.
- PANDIS, N. (2016). Linear regression. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 149(3):431–434. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2015.11.019>.
- PARKER, A., DE CORTÁZAR-ATAURI, I., VAN LEEUWEN, C. et CHUINE, I. (2011). General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. : Grapevine flowering and veraison model. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(2):206–216. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1755-0238.2011.00140.x>.
- PARKER, A. K., GARCÍA DE CORTÁZAR-ATAURI, I., GÉNY, L., SPRING, J.-L., DESTAC, A., SCHULTZ, H., MOLITOR, D., LACOMBE, T., GRAÇA, A., MONAMY, C., STOLL, M., STORCHI, P., TROUGHT, M. C., HOFMANN, R. W. et VAN LEEUWEN, C. (2020). Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of *Vitis vinifera* L. cultivars. *Agricultural and Forest Meteorology*, 285-286:107902. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192320300046>.
- PELLEGRINO, A., ROGIERS, S. et DELOIRE, A. (2020). Grapevine Latent Bud Dormancy and Shoot Development. *IVES Technical Reviews, vine and wine*. <https://ives-technicalreviews.eu/article/view/3420>.
- POUGET, R. (1988). Le débourrement des bourgeons de la vigne : méthode de prévision et principes d'établissement d'une échelle de précocité de débourrement. *OENO One*, 22(2):105–123. <https://oeno-one.eu/article/view/1260>.
- RAISIN, V. et MÉNARD, B. (2022a). Le cépage Chardonnay. *Le Figaro Vin*. <https://avis-vin.lefigaro.fr/connaitre-deguster/tout-savoir-sur-le-vin/guide-des-cepages/chardonnay>.
- RAISIN, V. et MÉNARD, B. (2022b). Le cépage Pinot noir. *Le Figaro Vin*. <https://avis-vin.lefigaro.fr/connaitre-deguster/tout-savoir-sur-le-vin/guide-des-cepages/pinot-noir>.
- REYNIER, A. (2016). *Manuel de viticulture : Guide technique du viticulteur*. Éditions Tec & Doc, Paris, 12 édition.
- RICARD, M.-P. (2014). *Vérification de modèles phénologiques durant la dormance des bourgeons de pommier et analyse de l'expression de gènes possiblement reliés à la dormance*. Mémoire, Université du Québec à Montréal, Montréal. <https://archipel.uqam.ca/7003/1/M13555.pdf>.

- TONIETTO, J. et CARBONNEAU, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1-2):81–97. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192304000115>.
- URHAUSEN, S., BRIENEN, S., KAPALA, A. et SIMMER, C. (2011). Climatic conditions and their impact on viticulture in the Upper Mosel region. *Climatic Change*, 109:349–373. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0059-z>.
- VANEL, M. (2022). Les cépages résistants, la viticulture «verte». *Le Sillon Belge*. <https://www.sillonbelge.be/8547/article/2022-01-21/les-cepages-resistants-la-viticulture-verte>.
- VASCONCELOS, M. C., GREVEN, M., WINEFIELD, C. S., TROUGHT, M. C. et RAW, V. (2009). The Flowering Process of *Vitis vinifera* : A Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 60(4):411–434. <https://www.ajevonline.org/content/60/4/411>.
- VIALA, P., VERMOREL, V., KREYDER, A. et TRONCY, J. (1901). *Traité général de viticulture : ampélographie*. Masson et Cie, Paris.
- WANG, E. et ENGEL, T. (1998). Simulation of phenological development of wheat crops. *Agricultural Systems*, 58(1):1–24. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308521X98000286>.
- WYARD, C., DOUTRELOUP, S., BELLEFLAMME, A., WILD, M. et FETTWEIS, X. (2018). Global Radiative Flux and Cloudiness Variability for the Period 1959–2010 in Belgium : A Comparison between Reanalyses and the Regional Climate Model MAR. *Atmosphere*, 9(7). <https://www.mdpi.com/2073-4433/9/7/262>.
- ZAH-BI, I. C. (2014). *Génomique comparative entre Muscadinia rotundifolia et Vitis vinifera pour faciliter l'identification de gènes de résistance*. Thèse, Université d'Évry – Val d'Essonne, Évry-Courcouronnes. <http://www.theses.fr/2013EVRY0023/document>.
- ZAVLYANOVA, M., BONNARDOT, V., VAN LEEUWEN, C., QUÉNOL, H. et OLLAT, N. (2023). The use of GFV and GSR temperature-based models in emerging wine regions to help decision-making regarding choices in grape varieties and wine styles. Application to Brittany (France). *VITIS - Journal of Grapevine Research*, pages 10–26. <https://ojs.openagrar.de/index.php/VITIS/article/view/16514>.
- ZITO, S. (2021). *Evolution du risque phytosanitaire au vignoble dans le nord-est de la France en lien avec le changement climatique : observations et modélisation : Cas de l'oïdium de la vigne*. Thèse, Université Bourgogne Franche-Comté, Dijon. <https://theses.hal.science/tel-03585501>.

## Annexe A

### Liste des cépages plantés en Belgique en 2017



ANNEXE A. LISTE DES CÉPAGES PLANTÉS EN BELGIQUE EN 2017

Cépage	Superficie (ha)	Cépage	Superficie (ha)
Chardonnay	121,36	Cabernet dorio	1,07
Pinot noir	40,15	Helios	1,05
Pinot gris	21,63	Bianca	1,03
Auxerrois	20,07	Zweigelt	1
Johanniter	13,15	Bacchus	0,92
Pinot blanc	12,21	Gewürztraminer	0,91
Regent	11,15	Leon millot	0,86
Solaris	9,4	Grüner veltliner	0,86
Müller-Thurgau	6,92	Tempranillo	0,83
Dornfelder	6,73	Chenin	0,76
Pinotin	5,56	Optima	0,74
Pinot meunier	5,52	Lemberger	0,72
Cabernet cortis	5,4	Ortega	0,69
Riesling	5	Merzling	0,57
Cabernet dorsa	4,73	Sauvignon gris	0,54
Rondo	4,14	Sauvignon blanc	0,48
Kerner	4,06	Alvarinho	0,46
Souvignier gris	3,95	Muscat	0,45
Muscaris	3,86	Cabertin	0,4
Acolon	3,37	VB-91-26-29 PIWI	0,36
Bronner	2,95	Cabernet sauvignon	0,36
Cabernet noir	1,74	Schönburger	0,29
Phoenix	1,7	Roland	0,27
Gamaret	1,67	Reichensteiner	0,25
Cabernet jura	1,65	Pinot noir précoce	0,2
Muscat bleu	1,51	Reberger	0,19
Cabernet blanc	1,48	Würzer	0,18
Cabaret noir	1,46	VB 32-7 PIWI	0,18
Cabernet cantor	1,41	CAL 6-04-PIWI	0,18
Gamay	1,35	Rinot	0,17
Merlot	1,31	Neûr péry	0,15
Siegerrebe	1,11	Blanc péry	0,15
Sirius	1,1	Monarch	0,15

TABLEAU A.1 – Superficie par cépage en Belgique ([Direction de l'Inspection économique, 2018](#)).

## Annexe B

### Échelles de notation phénologique

## ANNEXE B. ÉCHELLES DE NOTATION PHÉNOLOGIQUE

















Code BBCH	Stade repère	Description	Code Baggiolini
<b>0 = Débournement</b>			
00		<b>BOURGEON D'HIVER</b> Période d'hiver (dormance). Stade de repos, œil presque entièrement recouvert par deux écailles brunâtres. Les bourgeons sont pointus à arrondis selon les cépages.	A 
00-01		<b>LA VIGNE PLEURE</b> Premier signe visible de la reprise végétative.	A 
01		<b>GONFLEMENT DU BOURGEON</b> Début du gonflement des bourgeons, ils s'allongent à l'intérieur des écailles.	A 
05		<b>BOURGEON DANS LE COTON</b> Les écailles s'écartent, la protection cotonneuse (bourre) brunâtre est nettement visible.	B 
09		<b>POINTE VERTE</b> Débournement, l'extrémité verte de la jeune pousse est nettement visible.	C 
<b>1 = Développement des feuilles</b>			
10		<b>SORTIE DES FEUILLES</b> Apparition des feuilles rudimentaires qui sont rassemblées en rosette, dont la base est encore protégée par la bourre progressivement rejetée hors des écailles.	D 
11		<b>DÉVELOPPEMENT DES FEUILLES</b> Première feuille étalée et écartée de la pousse.	D - E 
12		<b>DÉVELOPPEMENT DES FEUILLES</b> Deux feuilles étalées.	E 

FIGURE B.1 – Tableau reprenant la première partie des échelles BBCH et de Baggiolini (Bloesch et Viret, 2008).

## ANNEXE B. ÉCHELLES DE NOTATION PHÉNOLOGIQUE
















Code BBCH	Stade repère	Description	Code Baggiolini
<b>1 = Développement des feuilles</b>			
13		<b>DÉVELOPPEMENT DES FEUILLES</b> Trois feuilles étalées.	E 
14		<b>DÉVELOPPEMENT DES FEUILLES</b> Quatre feuilles étalées, stade 53 possible.	E - F 
<b>5 = Apparition des inflorescences</b>			
53		<b>GRAPPES NETTEMENT VISIBLES</b> Inflorescences visibles, 4 à 6 feuilles étalées.	F 
55		<b>GRAPPES SÉPARÉES</b> Les inflorescences s'agrandissent, les boutons floraux sont encore agglomérés.	G 
57		<b>BOUTONS FLORAUX SÉPARÉS</b> Les boutons floraux de l'inflorescence sont séparés.	H 
<b>6 = Floraison</b>			
61		<b>DÉBUT FLORAISON</b> Les premières fleurs poussent le capuchon (pétales).	
62-63		<b>FLORAISON</b> 20 à 30% des fleurs sont ouvertes.	
65		<b>PLEINE FLEUR</b> 50% des fleurs sont ouvertes (capuchons tombés). L'ovaire reste nu, tandis que les cinq étamines s'étalent en rayon autour de lui.	I 
67-69		<b>FIN DE LA FLORAISON</b> Floraison en phase terminale, la plupart des capuchons sont tombés.	

FIGURE B.2 – Tableau reprenant la deuxième partie des échelles BBCH et de Baggiolini (Bloesch et Viret, 2008).

ANNEXE B. ÉCHELLES DE NOTATION PHÉNOLOGIQUE







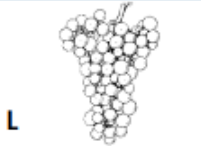







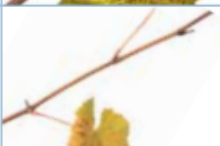

Code BBCH	Stade repère	Description	Code Baggiolini
<b>7 = Développement des fruits</b>			
71		<b>NOUAISON</b> Les ovaires commencent à grossir après la fécondation. Les étamines flétrissent, mais restent souvent fixées à leur point d'attache.	J 
73		<b>DÉVELOPPEMENT DES BAIES</b> Les baies ont atteint la grosseur de plombs de chasse, les grappes commencent à s'incliner vers le bas.	
75		<b>DÉVELOPPEMENT DES BAIES (STADE PETIT POIS)</b> Les baies atteignent 50% de leur taille finale, soit la grosseur d'un petit pois. Les grappes basculent en position verticale et prennent la forme typique du cépage.	K 
77		<b>FERMETURE DE LA GRAPPE</b> Les baies ont atteint environ 70% de leur taille finale et commencent à se toucher. Selon les cépages, la fermeture est plus ou moins lente et dans certains cas incomplète.	L 
<b>8 = Maturation des baies</b>			
81		<b>VÉRAISON</b> Les baies commencent à «traluire» et/ou changent de couleur selon le cépage. La grappe devient plus compacte, c'est la première étape de la maturation.	M 
83–85		<b>VÉRAISON</b> Poursuite de la véraison. Les baies deviennent translucides (cépages blancs) et continuent à se colorer. Elles deviennent molles au toucher.	
89		<b>RÉCOLTE</b> Pleine maturité. Les baies sont mûres. Leur développement est maximal. L'augmentation des sucres et la diminution de l'acidité se stabilisent.	N 
<b>9 = Sénescence</b>			
91		<b>MATURITÉ DES BOIS</b> Les sarments principaux prennent un aspect brunâtre, ils se lignifient. Ce phénomène s'amorce dès la véraison et s'achève après la récolte.	O 
97		<b>CHUTE DES FEUILLES</b> Les feuilles se colorent et chutent progressivement. Début du repos végétatif.	P 

FIGURE B.3 – Tableau reprenant la troisième partie des échelles BBCH et de Baggiolini (Bloesch et Viret, 2008).

## ANNEXE B. ÉCHELLES DE NOTATION PHÉNOLOGIQUE

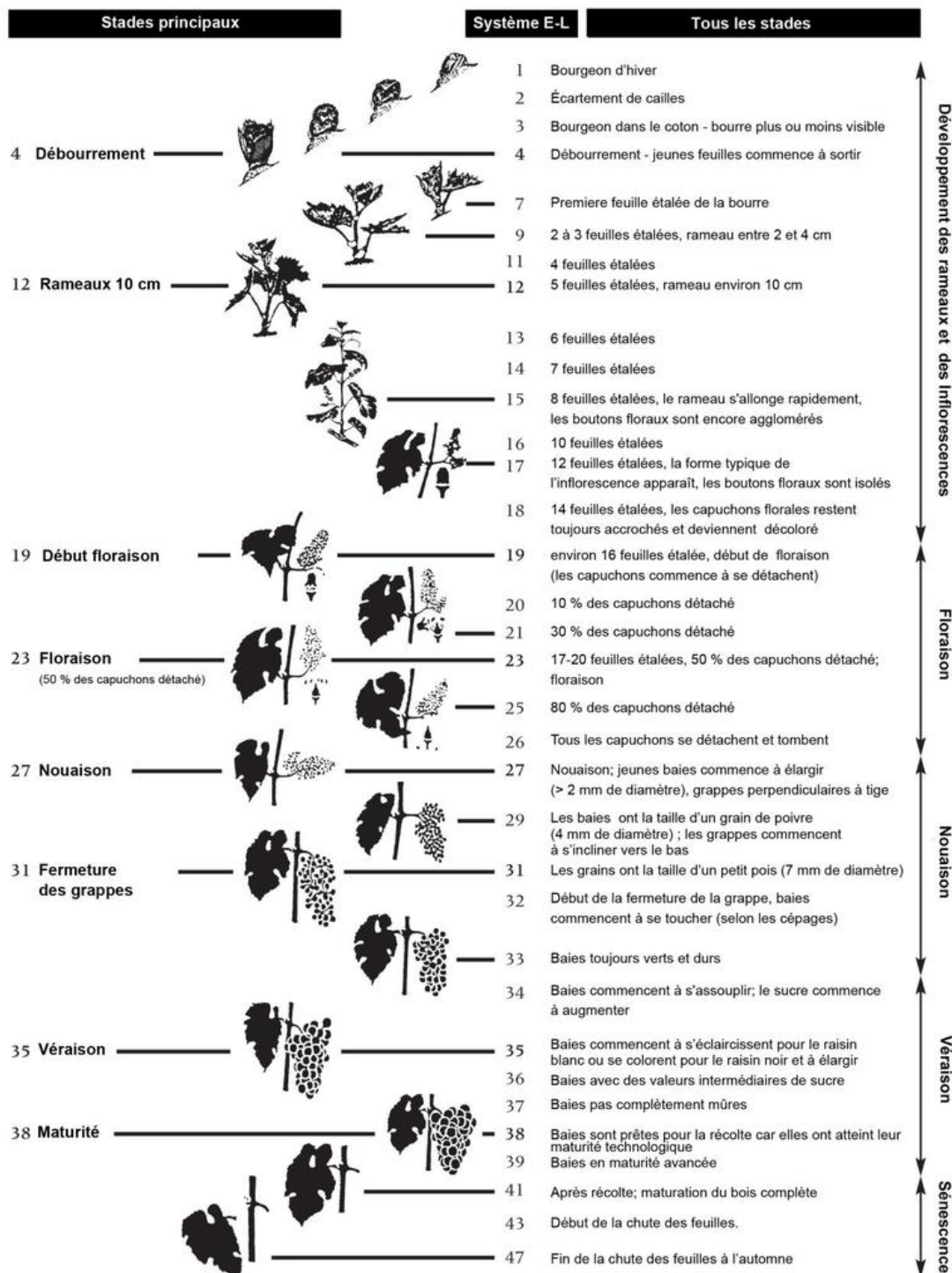


FIGURE B.4 – Échelle d'Eichhorn et Lorenz (Martins, 2012).