

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

INFLUENCE DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET DE L'IMPACT DES GELÉES TARDIVES SUR LE DÉBOURREMENT DE LA VIGNE : CAS DE LA MOSELLE LUXEMBOURGEOISE

ALIX MATHIEU

**MEMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT, A FINALITÉ SPECIALISÉE**

ANNÉE ACADEMIQUE 2024-2025

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE DR. BERNARD TYCHON ET DR. SEBASTIEN DOUTRELOUP

COMITÉ DE LECTURE :

DR. MOUSSA EL JARROUDI

DR. DANIEL MOLITOR

M. IGOR SACRE

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège.

*L'autorité académique est représentée par le(s) (co-)promoteur(s), membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : MATHIEU Alix ; alix.mathieu.am@gmail.com

Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier l'ensemble de mes camarades et professeurs que j'ai eu l'occasion de côtoyer durant mes années d'études. Que ce soit lors de mon Bachelier en sciences agronomiques ou de mon Master en sciences et gestion de l'environnement. Ce sont toutes ces rencontres, ces échanges et ces partages qui m'ont progressivement transmis le goût de la rigueur scientifique et de l'engagement environnemental.

Je remercie mes parents et ma compagne, pour leur soutien, leurs conseils et leur aide précieuse dans la relecture attentive de ce mémoire. Leur présence bienveillante a été un véritable pilier tout au long de mon parcours.

Il m'est important de remercier Monsieur Paul Lepesant, du service météorologique, sans qui l'analyse de mes données climatiques n'aurait pu se poursuivre au-delà de 2003. Son aide a été déterminante pour la continuité et la pertinence de ce travail.

Ma reconnaissance va aussi à l'Institut Viti-Vinicole, qui m'a répondu avec une grande réactivité et bienveillance dès mon premier contact. Un grand merci à Monsieur Daniel Molitor, vers qui l'IVV m'a orienté. Merci pour ses nombreux conseils, tant sur l'acquisition que sur l'interprétation des données phénologiques, ainsi que pour sa présence lors de la présentation de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement Igor Sacré pour le partage de documents essentiels, ses conseils techniques avisés, ainsi que sa relecture rigoureuse pour ce travail.

Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement mes promoteurs de mémoire, Messieurs Sébastien Doutreloup et Bernard Tychon pour tout le temps qu'ils ont consacré à ce travail de recherche. Leur disponibilité, leur encadrement attentif et la qualité de leurs retours ont été essentiels à l'aboutissement de ce mémoire.

Résumé

Ce mémoire analyse l'évolution du débourrement de différents cépages clés que sont le Riesling, le Rivaner, le Pinot gris, le Pinot blanc, le Traminer et l'Auxerrois dans la région de la Moselle au Grand-Duché de Luxembourg. La date de débourrement historique est alors comparée à celle des gelées tardives afin de déterminer si les jeunes bourgeons sont de plus en plus exposés à des épisodes de froid dommageables. Pour ce faire, deux modèles phénologiques ont été développés à partir de données climatiques in situ (stations de Remich et Grevenmacher) et de données phénologiques fournies par l'Institut Viti-Vinicole. Ces modèles permettent, d'une part, de simuler le débourrement en fonction des conditions locales, et d'autre part, de projeter son évolution ainsi que celle des risques de gel jusqu'à l'horizon 2100. Les résultats révèlent un avancement net du débourrement lié au réchauffement climatique, accompagné d'un chevauchement croissant avec les périodes de gel printanier, particulièrement depuis les années 2000. Ce mémoire souligne l'importance de ces dynamiques dans le contexte viticole luxembourgeois et met en évidence la nécessité d'adapter les pratiques pour assurer la résilience du vignoble face aux changements climatiques futurs.

Abstract

This study looks at when grapevines sprout leaves (called budburst) in Luxembourg's Moselle region. It focused on important grape types like Riesling, Rivaner, and others. Historical records of when the leaves appeared were compared with dates of late spring frosts. The goal was to see if young grape shoots are now more often hit by frost than they used to be. Two models were created using local weather data and information from the Viticultural Institute (IVV). These models help to predict when budburst will happen based on the weather. They also help to guess how often budburst and frost will overlap by the year 2100, given climate change. What was found is that leaves are sprouting much earlier because of warmer temperatures. This means that since the early 2000s, there's a bigger risk of frost damaging the young shoots.

Ultimately, this research highlights the challenges and chances for grape growing in Luxembourg. It stresses that growers need to change their methods to keep producing grapes successfully as the climate changes.

Table des matières

I.	Introduction	9
II.	La vigne	10
A.	Caractéristiques	10
B.	Stades physiologiques	10
1.	Dormance	11
2.	Débourrement	12
3.	Floraison	13
4.	Véraison et maturation	14
C.	La région viticole luxembourgeoise	15
1.	Présentation du vignoble	15
2.	Les critères AOP	16
3.	Importance locale	18
4.	Géographie et climat	19
5.	Géologie	21
D.	Impacts du réchauffement climatique sur la viticulture	24
1.	En Europe	24
2.	Au Luxembourg	29
III.	Matériels et méthodes	33
A.	Données	33
1.	Sources	33
B.	Modèle numéro 1	34
1.	Sortie de dormance	34
2.	Débourrement	36
3.	Ajustement à Remich	36
C.	Modèle numéro 2	37
D.	Fiabilité	40
1.	Modèle 1	40
2.	Modèle 2	41
E.	Gelées tardives	43
1.	Indice d'intensité de gelée	43
2.	Evolution des dernières gelées annuelles	44
3.	Ecart entre la date de débourrement et le dernier jour de gel	44
A.	Ruptures	45
IV.	Résultats	47

1. Température	47
2. Débourement	52
B. Modèle 1	58
1. Remich	58
2. Grevenmacher	61
3. Comparaison avec les données initiales	63
C. Modèle 2	65
D. Gelées tardives	71
E. Comparaison entre la date de débourement et la date de dernière gelées	83
V. Discussions	88
A. Température	88
1. Tendance au réchauffement	88
2. Interprétation du changement climatique	88
3. Conséquences sur la vigne	88
B. Débourement	90
1. Evolution des dates de débourement	90
2. Mécanismes biologiques	90
C. Gelées tardives	91
1. Phase de diminution des épisodes de gelées tardives jusque 2005	91
2. Phase d'augmentation des épisodes de gelées tardives après 2005	93
3. Phénomènes explicatifs	94
D. Comparaison des deux modèles	97
1. Evaluation statistique	97
2. Pertinence biologique et applications	98
3. Pertinence	98
VI. Limites et perspectives	100
VII. Conclusion	101
VIII. Bibliographie	102
IX. Annexes	107
A. AOP	107
B. Variables du modèle 2	123
D. Résultats bruts de la fonction « differential evolution »	124
E. Meilleures variables pour le second modèle	125
F. Date de débourement	127

Table des figures

Figure 1: Représentation des principaux stades BBCH (Musée de la vigne et du vin d'Anjou, 2013)	10
Figure 2: Stades visibles du débourrement (Australian Wine Research Institute, 2010)	12
Figure 3: Etiquetage AOP (IVBSA, 2025)	17
Figure 4: Influence de l'angle d'incidence sur le phénomène de captation d'Energie (lelivrescolaire, 2019)	19
Figure 5: coteaux mosellans (IVBSA, 2025)	20
Figure 6: Carte de distribution des sols autour de Grevenmacher (Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg)	21
Figure 7: Carte de distribution des sols autour de Remich (Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg)	22
Figure 8: capacités d'adaptation de la viticulture dans certains points clés d'Europe (Tscholl et al., 2024)	25
Figure 9: Vulnérabilité de zones clés de la viticulture en Europe (Tscholl et al., 2024)	25
Figure 10: Catégorisation de l'Indice de Huglin (Bonnefoy, Quenol, Planchon, & Barbeau, 2010)	26
Figure 11: vignoble au Royaume-Uni (Pollès, 2024)	28
Figure 12: Evolution de la température de l'air de chaque mois entre novembre 2019 et octobre 2020 à Remich comparée avec la moyenne entre 1968 et 2020 (IVV, 2020)	29
Figure 13: vignoble ayant subi des dégâts de sécheresse (Bonnefont, 2025)	32
Figure 14: paramètres de détermination du jour de débourrement de l'étude de Urhausen, Brienen, Kapala, & Simmer (2009)	37
Figure 15: Evolution de la température moyenne annuelle à Remich entre 1955 et 2022 avec rupture en 1987 représentée en ligne discontinue. Equation de la droite entre 1955 et 1987 : $y = -0,0056x + 20,6$. p-valeur = 0,614. Equation de la droite entre 1988 et 2022 : $y = 0,0218x - 33,06$. p-valeur = 0,0397	48
Figure 16: Evolution de la température moyenne annuelle à Grevenmacher entre 1955 et 2022 avec rupture en 1987 représentée en ligne discontinue. Equation de la droite entre 1955 et 1987 : $y = -0,0074x + 24,16$. p-valeur = 0,449. Equation de la droite entre 1988 et 2022 : $y = 0,0214x - 32,29$. p-valeur = 0,0214	49
Figure 17: Evolution annuelle des extrêmes de températures minimales pour la région de Remich et Grevenmacher avec les tendances représentées par des lignes discontinues. Avec p-valeur du minimum annuel des Tmin pour Remich = 0,042 et pente = 0,074. Avec p-valeur du maximum annuel des Tmin pour Remich = 0,587 et pente = 0,013. Avec p-valeur du minimum annuel des Tmin pour Grevenmacher = 0,099 et pente = 0,058. Avec p-valeur du maximum annuel des Tmin pour Grevenmacher = 0,959 et pente = 0,002	50
Figure 18: Evolution du débourrement des principaux cépages cultivés au Grand-Duché de Luxembourg entre 1966 et 2002 avec rupture en 1987 représentée en ligne noire discontinue. Pour chaque cépage, le jour indiqué est fait à partir d'une moyenne de toute la cote mosellane luxembourgeoise	52
Figure 19: Débourrement de l'Elbing avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue	54
Figure 20: Débourrement du Rivaner avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue	54
Figure 21: Débourrement du Traminer avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue	55

Figure 22: Débourement du Riesling avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.....	55
Figure 23: Débourement du Pinot Gris avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.....	56
Figure 24: Débourement de l'Auxerrois avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.....	56
Figure 25: Débourement du Pinot Blanc avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.....	57
Figure 26: Comparaison entre le jour de débourement moyen de tous les cépages simulés par la chaîne de modélisation SUWE et les données de terrain à Remich avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.	59
Figure 27: Résidus de la différence entre les valeurs prédites et observées entre 1966 et 2022 avec la chaîne de modélisation SUWE dans la région de Remich avec un RMSE calculé de 4,31 jours. La ligne de résidus représentant le 0 est représentée en gris discontinu.	60
Figure 28: Comparaison entre le jour de débourement moyen de tous les cépages simulés par la chaîne de modélisation SUWE et les données de terrain à Grevenmacher avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.	61
Figure 29: Résidus de la différence entre les valeurs prédites et observées entre 1966 et 2022 dans la région de Remich avec un RMSE calculé de 4,55 jours. La ligne de résidus représentant le 0 est représentée en gris discontinu.....	62
Figure 30: Graphe de comparaison entre les résidus avant et après l'application de la fonction "differential evolution" dans la zone de Remich entre 1984 et 2022.	63
Figure 31: Comparaison entre les dates de débourement calculés par la chaîne de modélisation SUWE avec et sans la fonction "differential evolution" et la moyenne des dates de débourement observées sur toute Zone de Remich.....	63
Figure 32: Graphe de comparaison entre les résidus avant et après l'application de la fonction "differential evolution" dans la zone de Grevenmacher entre 1984 et 2022.....	64
Figure 33: Comparaison entre les dates de débourement calculés par la chaîne de modélisation SUWE avec et sans la fonction "differential evolution" et la moyenne des dates de débourement observées sur toute Zone de Grevenmacher avec rupture en 1987 représentée par une ligne grise discontinue.....	64
Figure 34: Comparaison entre le jour de débourement moyen de tous les cépages simulés par la modélisation linéaire et les données de terrain à Remich avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.	66
Figure 35: Résidus de la différence entre les valeurs prédites et observées entre 1966 et 2022 avec la modélisation linéaire dans la région de Remich avec un RMSE calculé de 4,31 jours. La ligne de résidus représentant le 0 est représentée en gris discontinu.	67
Figure 36: Comparaison entre le jour de débourement moyen de tous les cépages simulés par la modélisation linéaire et les données de terrain à Grevenmacher avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.	69
Figure 37: Résidus de la différence entre les valeurs prédites et observées entre 1966 et 2022 avec la modélisation linéaire dans la région de Grevenmacher avec un RMSE calculé de 4 jours. La ligne de résidus représentant le 0 est représentée en gris discontinu.	70
Figure 38: Evolution de la date de la dernière gelée tardive à Remich entre 1978 et 2022 avec rupture statistique en 2005. La p-valeur avant 2005 = 0,0036 et la pente = -0,97. La p-valeur après 2005 = 0,066 et la pente = 1,3.	71

Figure 39: Evolution de la date de la dernière gelée tardive à Grevenmacher entre 1978 et 2022 avec rupture statistique en 2005. La p-valeur avant 2005 = 0,0074 et la pente = -0,68. La p-valeur après 2005 = 0,035 et la pente = 1,02.	72
Figure 40: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement de tous les cépages jusqu'au 31 janvier de l'année en cours entre 1984 et 2022 à Grevenmacher.	73
Figure 41: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement de tous les cépages jusqu'au 31 janvier de l'année en cours entre 1984 et 2022 à Remich.....	74
Figure 42: Comparaison entre Remich et Grevenmacher de l'évolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement de tous les cépages jusqu'au 31 janvier de l'année en cours entre 1984 et 2022.	75
Figure 43: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Traminer jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Traminer dans la vallée de la Moselle.....	76
Figure 44: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Elbling jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Elbling dans la vallée de la Moselle.	76
Figure 45: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Rivaner jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Rivaner dans la vallée de la Moselle.....	77
Figure 46: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Riesling jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Riesling dans la vallée de la Moselle.	77
Figure 47: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Auxerrois jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Auxerrois dans la vallée de la Moselle.....	78
Figure 48: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Pinot Gris jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Pinot Gris dans la vallée de la Moselle.....	78
Figure 49: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Pinot Blanc jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Pinot Blanc dans la vallée de la Moselle	79
Figure 50: Comparaison entre l'indice de gelées tardives fait à partir de la moyenne des dates de débourrement de tous les cépages à Remich et Grevenmacher avec le rendement en hectolitres par hectares entre 1984 et 2022.....	80
Figure 51: Cumul annuel des températures négatives pendant les cycle viticole (entre le 31 juillet de l'année N jusqu'au 30 juillet de l'année N+1) à Remich et Grevenmacher entre 1984 et 2022. Pour Remich, p-valeur = 0,0044 et la pente est de -3,15. Pour Grevenmacher, p-valeur = 0,0175 et la pente est de -2,64.	81
Figure 52: Comparaison de l'écart entre le jour de dernière gelée et le jour de débourrement entre Remich et Grevenmacher entre 1984 et 2022. Une valeur positive montre une gelée survenue X jours après le débourrement.	82
Figure 53: Comparaison entre la date de débourrement de chaque cépage et la date de dernière gelées entre 1983 et 2022 dans la zone de Remich	84
Figure 54: Comparaison entre la semaine avant la date de débourrement de chaque cépage et la date de dernière gelées entre 1983 et 2022 dans la zone de Remich	85
Figure 55: Comparaison entre la date de débourrement de chaque cépage et la date de dernière gelées entre 1983 et 2022 dans la zone de Grevenmacher.....	86

Figure 56: Comparaison entre la semaine avant la date de débourrement de chaque cépage et la date de dernière gelées entre 1983 et 2022 dans la zone de Grevenmacher87
Figure 57: changements projetés de fréquence des Cut-Off Lows (COLs) selon leur intensité maximale, dans le scénario climatique SSP5-8.5 (période 2071–2100), comparée à la période historique de référence (1950–2014). Les sous-figures a à d montrent le changement en pourcentage de la fréquence des COLs de faible intensité ($\leq 10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), tandis que les sous-figures f à i illustrent la même évolution pour les COLs les plus intenses ($> 10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$). Les parties e et j présentent le nombre absolu de COLs identifiés par an dans les zones régionales définies, répartis par saison, avec une comparaison entre les simulations historiques (en blanc) et futures (en gris). Pour chaque boîte, le centre représente la médiane, les bords indiquent les 1er et 3e quartiles, et les moustaches s'étendent de P5 à P95. Les chiffres indiqués au-dessus des diagrammes en boîte correspondent au nombre de modèles climatiques projetant une augmentation significative du phénomène. Traduction littérale de (Mishra, Maraun, Schiemann, Hodges, & Zappa, 2024).....95

Table des illustrations

Tableau 1: Critères pour être accepté en AOP Moselle luxembourgeoise (AOP, 2024)	17
Tableau 2: Part des productions dans la valeur de production agricole luxembourgeoise.....	18
Tableau 3: résumé des statistiques pour définir la robustesse d'un modèle	42
Tableau 4: Elements statistiques du test de Pettitt	45
Tableau 5: Pente, p valeur et R ² de la régression linéaire des différents cépages entre 1966 et 2022 avec rupture en 1987	53
Tableau 6: résultat des C* et F* obtenus avec la fonction differential_evolution depuis les données de Remich et de Grevenmacher	58
Tableau 7: Résumé des statistiques explicatives de la chaîne de modélisation SUWE après calibration pour Remich	60
Tableau 8: Résumé des statistiques explicatives de la chaîne de modélisation SUWE à Grevenmacher	62
Tableau 9: Tableau récapitulatif des résultats statistiques du modèle 2 sur la région de Remich	65
Tableau 10: Tableau récapitulatif des résultats statistiques du modèle 2 sur la région de Grevenmacher	68
Tableau 11: Tableau récapitulatif des résultats statistiques de la chaîne de modélisation SUWE sur la région de Remich	97
Tableau 12: Tableau récapitulatif des résultats statistiques de la chaîne de modélisation SUWE sur la région de Remich	97
Tableau 13: Tableau récapitulatif des résultats statistiques du modèle 2 sur la région de Remich	97
Tableau 14: Tableau récapitulatif des résultats statistiques du modèle 2 sur la région de Grevenmacher	98

I. Introduction

La viticulture, activité fortement liée au climat, fait aujourd’hui partie des cultures les plus affectées par le changement climatique (OIV, 2023). Celui-ci modifie les conditions environnementales qui déterminent les grandes étapes du cycle phénologique de la vigne, et en particulier le débourrement. Ce stade marquant la sortie de dormance de la plante au printemps, tend à se produire de plus en plus tôt sous l’effet du réchauffement global, notamment en réponse à des températures hivernales et printanières plus élevées (Chuine et al., 2004; Duchêne et Schneider, 2005; Molitor et al., 2014). Dans les régions viticoles de climat frais, comme la Moselle luxembourgeoise, cette précocité accrue augmente la vulnérabilité de la vigne face aux gelées tardives, autre phénomène climatique tendant à changer.

Les gelées printanières, ou gelées tardives surviennent lorsque les températures descendent sous les 0°C après le redémarrage de la végétation. Si elles coïncident avec un stade phénologique important (comme cela pourrait être le cas pour le débourrement), elles peuvent causer des dégâts sévères, pouvant aller jusqu’à compromettre une grosse partie de la récolte (Tscholl et al., 2024; Zohner et al., 2020). Or, si les hivers sont globalement moins rigoureux qu’auparavant, la probabilité que des épisodes de gel tardif interviennent après le débourrement a déjà augmenté dans certaines régions viticoles européennes. Selon Leolini et al. (2018), cette probabilité aurait augmentée d’environ 60% entre 1980 et 2016. En avril 2024, un épisode de grand ampleur a d’ailleurs touché sévèrement les vignobles luxembourgeois, notamment dans le secteur de Grevenmacher et Mertert .

Cette région située entre à la limite nord de la zone viticole européenne (49°N), est un excellent observatoire des effets du réchauffement climatique et du gel (Jones et al., 2005). Longtemps caractérisé par un climat marginal pour la vigne, la Moselle luxembourgeoise bénéficie aujourd’hui de conditions plus favorables à la maturation ce qui permet d’y envisager la culture de cépages plus tardifs (Fraga et al., 2014) ; . Cependant, cette amélioration s’accompagne d’une hausse des risques de gel printanier, en raison de la précocité du débourrement(Tscholl et al., 2024; Zohner et al., 2020).

Face à cette problématique, l’objectif principal de ce mémoire est de comprendre comment la viticulture luxembourgeoise s’adapte aux nouvelles conditions climatiques, et plus précisément, d’évaluer l’effet du réchauffement climatique et des gelées tardives sur la viabilité de la vigne Pour ce faire, deux méthodologies sont développées. Dans un premier temps, deux modèles ont été développés à partir de données climatiques issues des stations météorologiques de Remich et Grevenmacher et des données phénologiques de terrain. Ces modèles pourront alors servir à déterminer comment le débourrement pourrait changer dans les années futures. Dans un second temps, une analyse des dates de dernières gelées, ainsi que des températures a été réalisée pour détecter des tendances (ruptures , avances ou retard).

L’étude se focalise sur plusieurs cépages emblématiques de la région et cherche à mettre en évidence le chevauchement entre les périodes de débourrement et les dernières gelées, potentiellement dommageables. A travers cette approche, ce mémoire pourrait offrir des éléments d’aide à la décision pour une adaptation viticole durable dans le contexte de changements que connaît le Grand-Duché de Luxembourg (Weinjahr, 2024).

II. La vigne

A. Caractéristiques

La vigne, *Vitis vinifera L.*, est une liane à feuille caduque (Chaptal, 1801). Cette espèce est classée parmi les plantes pérennes ligneuses. Cela signifie que la période entre la germination et l'entrée dans sa maturité sexuelle dure plusieurs années. Pendant ces années, les plantes peuvent cependant se reproduire de façon asexuée (par le bouturage par exemple). Le qualificatif *ligneuse* désigne des plantes conservant leurs systèmes racinaires, continuant chaque année l'expansion de leurs organes aériens à partir de bourgeons latents.

Sa partie végétative comprend : sarments, feuilles, racines et organes de réserve (à la fois dans le tronc, le bras et la racine). Elle possède une tige très poreuse (bois tendre), favorisant une montée rapide de la sève, des feuilles riches en stomates (100–300/mm²), siège des échanges gazeux (CO₂, O₂, vapeur d'eau) et un système hydraulique très dépendant de la pression racinaire et de la transpiration foliaire. La photosynthèse est très active mais coûteuse en eau : pour fixer 1 g de CO₂, la vigne perd entre 100 et 120 g d'eau (Zufferey et al., 2023).

Selon (INRA Bordeaux, Colmar, 1992), la photosynthèse et la mise en réserve sont les principaux facteurs climatiques sur les phénomènes de croissance de la plante. Le cycle de vie ainsi que ces facteurs climatiques seront détaillés dans la suite du travail.

B. Stades physiologiques

Il est important de s'intéresser aux stades phénologiques de la vigne afin de connaître les liens entre les différentes étapes de ses cycles végétatif et reproducteur et les variations du climat.

Ce mémoire se concentre sur le débourrement de la vigne. Cependant, les différents événements annuels de la plante étant interconnectés, il est essentiel de les considérer dans leur ensemble afin d'améliorer la prévision de chacun (Chaptal, 1801).

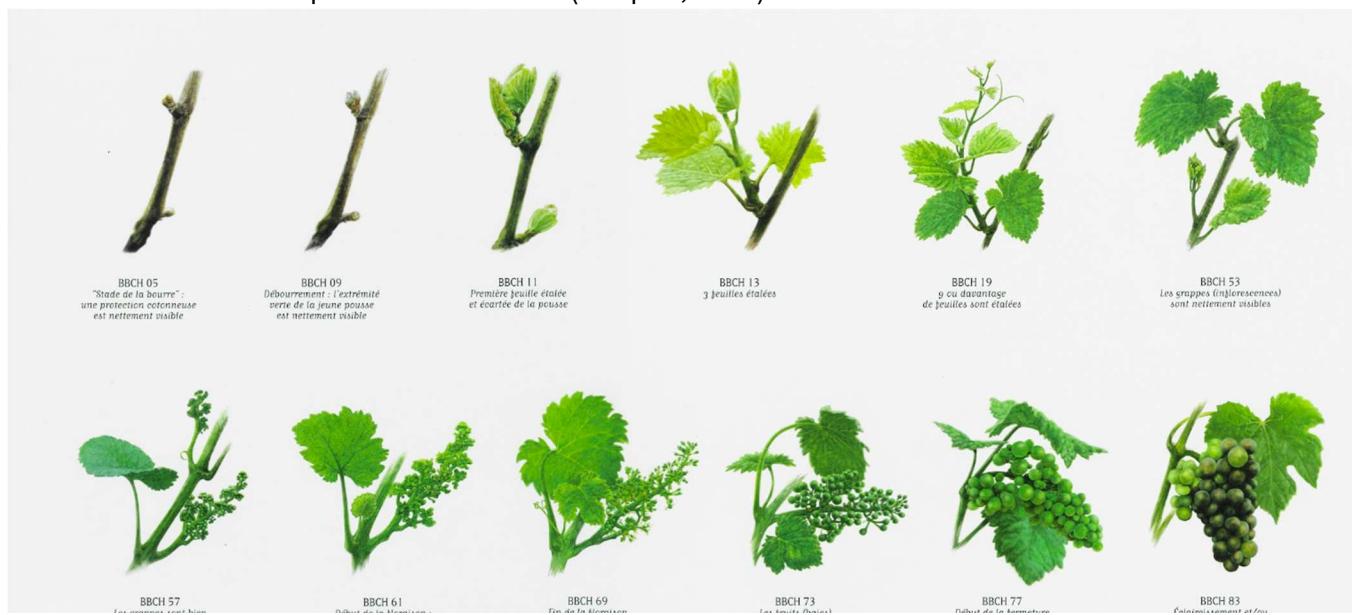


Figure 1: Représentation des principaux stades BBCH (Musée de la vigne et du vin d'Anjou, 2013)

1. Dormance

La dormance est la période préparant les bourgeons latents au débourrement, c'est-à-dire leur développement au printemps (Pellegrino et al., 2020). Ces bourgeons sont un ensemble de trois petits bourgeons en dormance, protégés par un système d'écailles. Ces trois bourgeons sont aussi appelés primordia d'axe puisqu'ils sont les ébauches des futurs rameaux. Parmi ces trois organes, seul le bourgeon primaire se développera au printemps. Les autres seront inhibés et ne seront activés qu'en cas de besoin. Au stade de débourrement, tous ces bourgeons sont très sensibles au gel. Si un de ceux-ci venait à être endommagé, les autres pourraient prendre sa place et entrer en croissance. On parle alors de « contre bourgeons » ou « double bourre ». Cet axe qui entre en croissance formera le futur rameau de la plante (Louvieaux et al., 2021).

La dormance est séparée en deux phases :

- Endodormance :

L'entrée en dormance est induite par des signaux environnementaux et hormonaux. Elle est notamment stimulée par la réduction progressive de la photopériode ainsi que par la baisse des températures automnales. Sur le plan physiologique, cette inhibition du développement est renforcée par l'accumulation d'acide abscissique (ABA), qui contribue au maintien de l'inactivité du méristème¹ apical du bourgeon.

Pour atteindre la levée de cette phase de repos, la plante a besoin d'accumuler un certain nombre d'heures où la température est inférieure à une valeur seuil. Pour beaucoup de cépages, ce besoin physiologique est d'environ 200 heures inférieures à 8°C (Pellegrino et al., 2020).

- Écodormance :

Une fois l'endodormance levée, la barrière physiologique interne est levée et le bourgeon est physiologiquement prêt au débourrement. A ce moment-là, la levée de l'écodormance dépend alors de facteurs environnementaux. Ce n'est qu'avec l'arrivée de la hausse des températures et une bonne disponibilité en eau que la croissance du bourgeon est activée. Ce phénomène est appelé débourrement (Pellegrino et al., 2020).

¹ zone de division cellulaire, à l'origine d'organes et/ou de tissus végétaux

2. Débourrement

Comme dit précédemment, le débourrement n'a pas lieu tout de suite après la levée de dormance. La vigne attend des conditions favorables, elle attend que les températures atteignent un seuil. En anglais cette phase est appelée « *enforced dormancy* », il s'agit d'une phase de post dormance (Australian Wine Research Institute, 2010).

D'un point de vue physiologique, il s'agit de la croissance cellulaire des entre-nœuds², feuilles... Ceux-ci sont déjà préformés de l'année N-1. Mais aussi, du redémarrage du méristème apical permettant la formation de nouveaux nœuds (Michaux, 2018).

Selon Reynier, (2016), il existe deux seuils de température pouvant être atteints pour l'apparition du débourrement :

- Seuil de croissance réelle : Il se situe entre 4°C et 5°C et correspond à la température à laquelle l'activité cellulaire reprend. Elle est d'abord de faible intensité, puis croît avec l'élévation de températures. Les actions journalières de la température sont cumulatives. En grossissant, les organes prennent assez de place que pour écarter les écailles qui les protègent et provoquent l'apparition de la bourre.
- Seuil de croissance apparente : Il se situe entre 8°C et 12°C. La valeur est couramment fixée à 10°C. Ce seuil est également appelé « zéro de végétation » et correspond à la température moyenne journalière à partir de laquelle le débourrement se produit.

Visuellement, le débourrement constitue le premier stade phénologique où la reprise de la plante est visible. Il est encore ici décrit en plusieurs stades dont les plus visibles sont (Australian Wine Research Institute, 2010) :

- Bourgeon d'hiver (ou stade 01) : stade de repos hivernal où le bourgeon est recouvert par deux écailles brunâtres.
- Bourgeon dans le coton (ou stade 03) : stade où l'œil est gonflé et les écailles écartées laissent apparaître la bourre cotonneuse et brunâtre qui protège les apex.
- Pointe verte (ou stade 05) : stade où la jeune pousse devient visible, où le bourgeon allongé et gonflé pointe à travers la bourre.

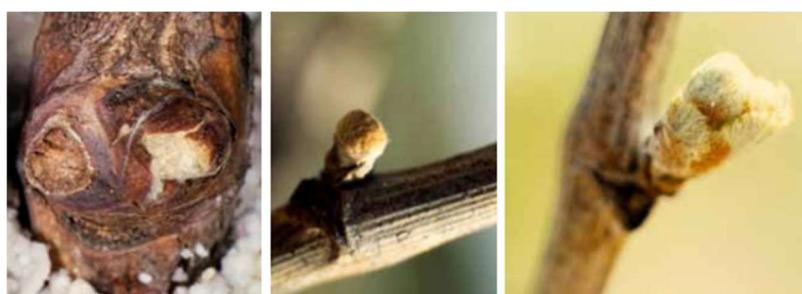


Figure 2: Stades visibles du débourrement (Australian Wine Research Institute, 2010)

Il est important de noter pour notre cas d'étude, que le débourrement est plus tardif et plus homogène quand on remonte dans les pays au Nord de l'Europe. C'est ce qu'explique Jones (2007), qui justifie ce phénomène en montrant que les régions plus au nord deviennent plus stables pour la maturation, avec des climats plus constants et moins extrêmes. Il montre que historiquement, que les régions septentrionales sont adaptées à la viticulture grâce à des saisons

² partie (espace) sans feuille de la tige d'une plante se situant entre deux nœuds adjacents, ou deux articulations successives.

de croissance plus longues, et des climats plus constants, ce qui contribue à une phénologie plus homogène et prévisible.

Pour comprendre les modèles qui seront exposés dans la suite du travail, il faut savoir que :

La température de l'air ambiant est le principal facteur influençant le débourrement (INRA Bordeaux, Colmar, 1992). Selon Pouget (1967), l'accumulation de froid hivernal (températures basses pendant plusieurs semaines, notamment de décembre à février) est essentielle pour lever l'endodormance. Aussi, une période de froid suffisante (exprimée en "somme de températures froides") est nécessaire pour que les bourgeons puissent devenir sensibles aux températures printanières et initier le débourrement (May, 1964). La température automnale est aussi importante, car une dormance mal installée rend ensuite la levée de dormance en hiver plus chaotique. Cela risque de perturber le calendrier de débourrement et la régularité de la croissance des rameaux au printemps.

Il a aussi été établi, que plus la température moyenne entre mars et avril est élevée, plus le débourrement est rapide (Pellegrino et al., 2020). Pouget (1967), décrit également que entre 5°C et 25°C, la vitesse de débourrement a une relation logarithmique avec la température.

Il est évident que tous les cépages ont des besoins différents pour leur débourrement et ne débourent donc pas en même temps. Cependant, pour un même cépage, des facteurs biologiques, cultureaux ou des conditions microclimatiques peuvent avoir une réelle influence sur la date du débourrement (Reynier, 2016).

3. Floraison

Reynier (2016) dit du cycle de la vigne que c'est une « succession de cycles annuels qui sont interdépendants les uns des autres car les conditions de vie au cours d'un cycle ont des influences sur le ou les cycles suivants ». Le potentiel de production est donc déjà inscrit dans la plante l'année précédente via ses réserves accumulées et la qualité de ses bourgeons. Elle suit un double cycle : végétatif et reproducteur. Le cycle végétatif sert à la croissance des rameaux, feuilles, racines et vrilles mais aussi à l'accumulation de réserves en fin de saison et la mise en dormance des bourgeons pour l'hiver. En parallèle se déroule le cycle reproducteur avec le développement des inflorescences. La floraison est le moment où les fleurs s'ouvrent sur les inflorescences faites à l'année N-1. En juin-juillet, les bourgeons latents reçoivent un signal d'initiation florale en conditions favorables. Si le bourgeon a reçu le signal d'initiation l'année précédente, il donnera naissance à un rameau fertile qui donne des feuilles puis des inflorescences. Si le signal floral n'est pas reçu, il n'y aura que des feuilles. Une sécheresse, carence ou mauvais travail agronomique en juin-juillet peut donc avoir des retombées l'année suivante (Reynier, 2016). La floraison est induite lorsque les grains de pollen et les ovules sont mûrs. L'éjection du capuchon et la déhiscence des étamines dépend là aussi de la température. La plage optimale peut être donnée entre 20°C et 30°C (INRA Bordeaux, Colmar, 1992). La durée de la floraison est d'autant plus courte que la température est assez élevée (25°C – 30°C). Il est aussi à notifier que la germination du pollen en journée peut être gênée sous des températures seuils de 14°C-15°C (INRA Bordeaux, Colmar, 1992).

4. Véraison et maturation

La courbe de croissance des baies traduit la présence de 3 phases distinctes :

- Phase 1 : Le stade raisin vert. La somme des températures journalières est encore une fois le paramètre climatique dominant qui favorise le grossissement des baies. Il faut y ajouter les autres facteurs tel que le rayonnement global et la pluviométrie (INRA Bordeaux, Colmar, 1992). Visuellement, c'est une phase où les baies vertes encore chlorophylliennes grossissent (Reynier, 2016).
- Phase 2 : Le stade véraison. C'est l'arrêt momentané de la croissance des fruits suivi du basculement métabolique au niveau de la plante entière. Elle passe d'une activité de croissance à une activité de stockage. La plante passe de l'utilisation de sève brute remplie en nutriment à de la sève élaborée riche en sucre pour stocker de l'énergie. On remarque un ramollissement du raisin lié à cet afflux sucré (INRA Bordeaux, Colmar, 1992).
- Phase 3 : La maturation du raisin et le grossissement par élongation. C'est ici l'alimentation hydrique qui est la plus importante pour la plante bien plus que les températures (INRA Bordeaux, Colmar, 1992).

La phase de maturation doit être considérée en plusieurs parties afin d'être comprise dans sa globalité :

Les sucres sont influencés par le rayonnement global, les températures moyennes et maximales. Une faible pluviosité, sans toutefois avoir de sécheresse favorise de bonnes concentrations en sucre (INRA Bordeaux, Colmar, 1992).

Les polyphénols (ou tanins) sont influencés par les températures extrêmes. On suppose que cette influence s'exerce via des facteurs comme l'amplitude thermique journalière (différence entre les températures maximales et minimales) et le rayonnement solaire, qui agissent comme des signaux environnementaux favorisant la synthèse des polyphénols. En effet, la molécule est synthétisée en réponse à des stress modérés ou en réponse à des trop fortes accumulations de sucre. Avoir trop de sucre signifie que la plante a subi beaucoup de rayonnement et de fortes températures sur une longue période. Il y a alors un risque de respiration cellulaire trop forte et prolongée qui risque d'entrainer une production importante d'espèces réactives à l'oxygène (ROS) comme des molécules contenant des radicaux hydroxydes ou du peroxyde d'hydrogène. Quand le stress oxydatif monte, la plante réagit en produisant des tanins antioxydants enzymatiques (Oosalo et al., 2024).

Les arômes comme la synthèse des anthocyanes sont favorisés par des nuits fraîches (14°C-15°C). Des températures trop élevées peuvent alors affecter la qualité aromatique du raisin (Neethling et al., 2011). Un stress hydrique peut favoriser la teneur en arômes des raisins notamment pour la synthétisation des thiols volatils. Il faut cependant faire attention aux stress excessifs qui feront l'effet inverse (Peyrot des Gachons, 2002). Le rayonnement peut lui aussi avoir un effet bénéfique lors de la synthétisation des arômes, s'il n'est pas excessif (Leeuwen et al., 2023).

Les acides organiques sont fortement dégradés par la température. Cependant, en cas de période de pluie abondante, des remontées acides peuvent partir du sol vers le raisin (INRA Bordeaux, Colmar, 1992).

Attention aussi à l'état sanitaire de la vigne, car des maladies fongiques se développent dans les mêmes conditions que le sucre ou d'autres composés (comme les anthocyanes ou les arômes) dans les baies de raisin. Ces conditions sont : une température modérée

(accompagnée d'un bon ensoleillement, un feuillage dense (favorisant la stagnation de l'humidité) et une fréquence de pluie importante.

C. La région viticole luxembourgeoise

Selon la Chambre d'Agriculture luxembourgeoise, la culture de la vigne en Moselle (région située à l'est du Luxembourg, le long du fleuve Moselle, formant la frontière naturelle avec l'Allemagne) représente environ 13% des exploitations agricoles. En terme de surface, cela représente 1268ha en 2021 principalement composé des cépages suivants (Chambre d'Agriculture, 2023) ; (IVV, 2024) :

- Rivaner : 24,5%
- Pinot Blanc 14,6%
- Pinot Gris 12,5%
- Auxerrois 11,8%
- Riesling 10,6%
- Pinot Noir 10,4%
- Elbling 6,3%

Sur la surface totale cultivée, 90% de ces cépages sont destinés à faire du vin blanc contre 10% pour faire du vin rouge. Cela représente au total 125000hL, dont 25% représente du Crémant de Luxembourg.

1. Présentation du vignoble

Historiquement, la Moselle a toujours été terre fertile pour la viticulture. Le poète romain Ausone parlait déjà dans son poème *Mosella* composé en 370, de la beauté du fleuve Moselle tout en y décrivant les vignobles en terrasse, qui s'étendaient sur les coteaux ensoleillés, qu'il comparait aux plaines alluviales qui étaient réservées pour les autres cultures. Il a été traduit en 1800 et on y lisait : « *Les dons de Bacchus, croissant en longues lignes dans les vignobles, attirent l'œil du voyageur, accrochés aux rochers et aux pentes ensoleillées. Quel spectacle saisissant ! [...] Depuis les rives jusqu'aux sommets, la vigne grimpe. Des travailleurs montent et descendent avec agitation, emplissant les collines de leurs cris.* » (White, 1919).

Pendant le Moyen-Age, les monastères, ayant continués la viticulture ont, profitant du réchauffement climatique naturel de cet époque, étendu la culture jusqu'en Eislek (actuelles Ardennes luxembourgeoises) (AOP, 2024).

Au 20^{ème} Siècle, la culture de la vigne y est chamboulée. Il y a évidemment les guerres, mais aussi le phylloxéra³ et le changement profond du marché du vin. Le commerce s'ouvre, les consommateurs sont plus stricts et les préférences évoluent. Le marché luxembourgeois doit aussi s'adapter. De nouveaux vins apparaissent, ainsi que le crémant. Les techniques évoluent, les producteurs se forment. La viticulture se modernise. (AOP, 2024)

³ Petit insecte ravageur (hémiptère) qui attaque les racines de la vigne. Il provoque des nodosités et des plaies qui finissent par tuer la plante et a causé une crise viticole majeure en Europe au 19^e siècle.

2. Les critères AOP

En 1991, l'Etat pousse à la création de l'appellation d'origine contrôlée, « Moselle luxembourgeoise » qui remplace l'ancienne « marque nationale ». Elle couvre 42 kilomètres de la rive gauche de la Moselle entre Schengen et Wasserbillig.



Figure 3: carte des vignes en côte mosellane en AOP (IVBSA, 2025)

Cet AOC avait pour but de se rapprocher des standards de traçabilité et de qualité européenne. En 2009, avec l'harmonisation européenne des appellations, cette AOC est devenue officiellement une AOP (Appellation d'Origine Protégée), en application du règlement européen n° 510/2006 (puis 1151/2012).

Pour qu'un vin ait l'appellation AOP Moselle luxembourgeoise, il faut rencontrer les critères suivants :

Critères AOP Moselle luxembourgeoise
Le raisin est exclusivement cultivé sur la zone délimitée citée plus haut.
Le raisin est issu des cépages autorisés, à savoir le Riesling, Pinot Gris, Pinot Blanc, Auxerrois, Elbling, Gewürztraminer, Rivaner, Pinot Noir, Chardonnay, Muscat-Ottonel et Sylvaner
Le raisin est cultivé avec des rendements limités selon le cépage (pas de surproduction au détriment de la qualité).
Le vin est dégusté à l'aveugle par une commission indépendante et y a obtenu au moins 12/20.
La commercialisation peut uniquement se faire dans une bouteille ou récipient agréée par le Ministre
Le vin n'utilise que les seules mentions autorisées, à savoir « Premier Cru », « Grand Premier Cru », « Vendanges tardives », « Vin de paille », « Vin de glace », « Crémant de Luxembourg ».
Le vin n'utilise l'appellation « Coteau de... » que si son rendement est inférieur à 75hL.ha ⁻¹ et que ses vendanges sont manuelles.
Le vin n'utilise l'appellation « Vieille vignes » que si la vigne est plus âgée que 35 ans, année de plantation enregistrée.
Le vin n'utilise le nom générique « pinot » que pour les assemblages de Pinot Blanc, Pinot Gris et Auxerrois.
La mise en bouteille ne se fait que 9 mois après l'obtention de l'agrégation AOP.

Tableau 1: Critères pour être accepté en AOP Moselle luxembourgeoise (AOP, 2024)

Le tout est combiné à une étiquette qui figure sur les bouteilles, afin d'orienter le consommateur sur le type de vin qu'il achète.



Figure 4: Etiquetage AOP (IVBSA, 2025)

Toutes ces règles sont inscrites dans le « règlement (CEE) n° 607/2009 de la Commission du 14 juillet 2009 fixant certaines modalités d'application du règlement (CE) n° 479/2008 du Conseil, en ce qui concerne les appellations d'origine protégées et les indications géographiques protégées, les mentions traditionnelles, l'étiquetage et la présentation de certains produits du secteur vitivinicole et portant création de l'Office national des appellations d'origine protégées. (4456BLU) ». Il est disponible en Annexe.

Le cahier des charges est réalisé par l'Institut Viti-Vinicole situé à Remich selon un arrêté ministériel.

3. Importance locale

Concernant l'importance économique de la viticulture au Grand-Duché, Romain Schneider, ancien ministre de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement Rural dira : « *D'après des valeurs provisoires pour 2012, la valeur de la production viticole devrait se chiffrer aux alentours de 19 millions d'euros. L'agriculture en général -y compris la viticulture- représente 0,3% de la valeur ajoutée brute de l'économie luxembourgeoise. Toutefois, la viticulture ne représente qu'une petite partie de ce pourcentage. Or, ces chiffres ne tiennent pas compte du 'poids' réel de la viticulture. N'est, par exemple, pas pris en compte le paysage viticole qui constitue un atout majeur pour le secteur touristique et gastronomique de la Moselle.* » (Schneider, 2013).

Selon STATEC (2018) la viticulture reste cependant, la troisième production végétale la plus importante du pays, bien que loin d'égaler la part des plantes fourragères.

Part des différentes productions dans la valeur de la production agricole au prix de base en 2018	
Plantes fourragères	24,5%
Céréales	6,6%
Vin	6,4%

Tableau 2: *Part des productions dans la valeur de production agricole luxembourgeoise (STATEC, 2018)*

4. Géographie et climat

Les coteaux viticoles de la Moselle présentent le plus souvent une orientation Sud-Ouest leur permettant une bonne exposition au soleil. L'orientation d'une culture signifie, qu'en se tenant en haut des vignes, on regarde en direction du Sud-Ouest. Le soleil se levant à l'est, une orientation Sud-Ouest permet de bénéficier d'un ensoleillement prolongé et intense tout au long de la journée. C'est d'autant plus important que l'après-midi est la partie de la journée où les températures et l'ensoleillement sont les plus élevés favorisant la photosynthèse et la maturation. L'angle d'incidence (α) sera minimisé, ce qui offre une surface plus petite. L'énergie étant exprimée en W.m^{-2} , lorsque la surface diminue pour une même puissance, l'énergie augmente. C'est ce que représente la figure 4.

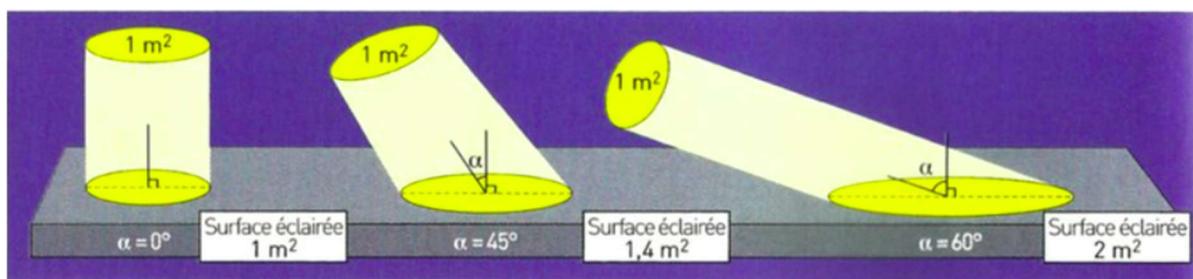


Figure 5: Influence de l'angle d'incidence sur le phénomène de captation d'énergie (lelivrescolaire, 2019)

Une étude réalisée par Campos et al. (2016) a analysé comment l'orientation des rangs de vigne influence l'absorption du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), c'est-à-dire la lumière utilisée par la plante pour la photosynthèse. Cette absorption a été évaluée à l'aide de deux indicateurs : le PAR effectivement absorbé par la canopée (APAR) et la fraction de ce rayonnement absorbée par rapport au total disponible (fPAR). L'étude a été conduite dans des vignobles en coteaux situés entre les latitudes 30°N et 50°N, ce qui correspond à une large gamme de régions viticoles, afin d'observer l'effet de l'orientation des rangs en fonction de la position géographique. Les rangs montrent une meilleure absorption du PAR dans les vignobles espagnols situés au début de ces latitudes et étant orientés Nord-Est et Sud-Ouest. La Moselle cultivée se situant vers 50°N, elle bénéficie également de cette absorption. Elle montre également que les vignes captent assez bien le PAR en matinée, où les conditions de photosynthèse se font a priori sans stress hydrique. L'étude montre aussi que cette orientation, couplée au système de conduite en VSP pour « Vertical Shoot Position » (positionnement vertical des pousses en français) impacte positivement la transpiration et le développement végétatif ainsi que la maturation. Une étude réalisée par Molitor et al. (2019) montre également, que suite au réchauffement climatique, cette conduite VSP peut avoir des avantages en terme de gestion efficace de maladies comme la pourriture grise et avancer la maturation de certains cépages. Cependant, d'autres systèmes comme la conduite SMPH pour « Semi-Minimal-Pruned Hedge », peuvent représenter un avantage technique. Elle consiste à moins tailler le végétal afin de permettre une canopée plus épaisse, apportant plus de production.

Concernant l'importance de la disposition en coteaux, Eric Stafne (2019) explique qu'elle est fortement recommandée pour un drainage optimal du sol. Les sols sur pente favorisent un drainage naturel, et évitent de cultiver sur des zones saturées. Un trop plein d'humidité risque de réduire la vigueur de la vigne et favorisera certaines maladies hydriques. Il ajoute que l'altitude

relative⁴ d'une parcelle, même si elle est faible, influence le drainage de l'air froid. Les zones basses retiennent l'air froid et les vignes sont plus exposées aux gelées tardives. Les pentes douces permettent à l'air froid de s'écouler vers le bas, où les vignes ne seront idéalement pas installées.



Figure 6: coteaux mosellans (IVBSA, 2025)

⁴ L'altitude relative est une mesure de la hauteur d'un point par rapport à un autre point de référence local, et non par rapport au niveau moyen de la mer.

5. Géologie

Pour cette étude se basant sur Remich et Grevenmacher, seule la géologie de ces régions sera analysée.

Ce qu'il faut retenir, c'est que le canton de Grevenmacher est représenté par des roches calcaires tandis que le canton de Remich est majoritairement composé de marnes Keupériennes (AOP, 2024).

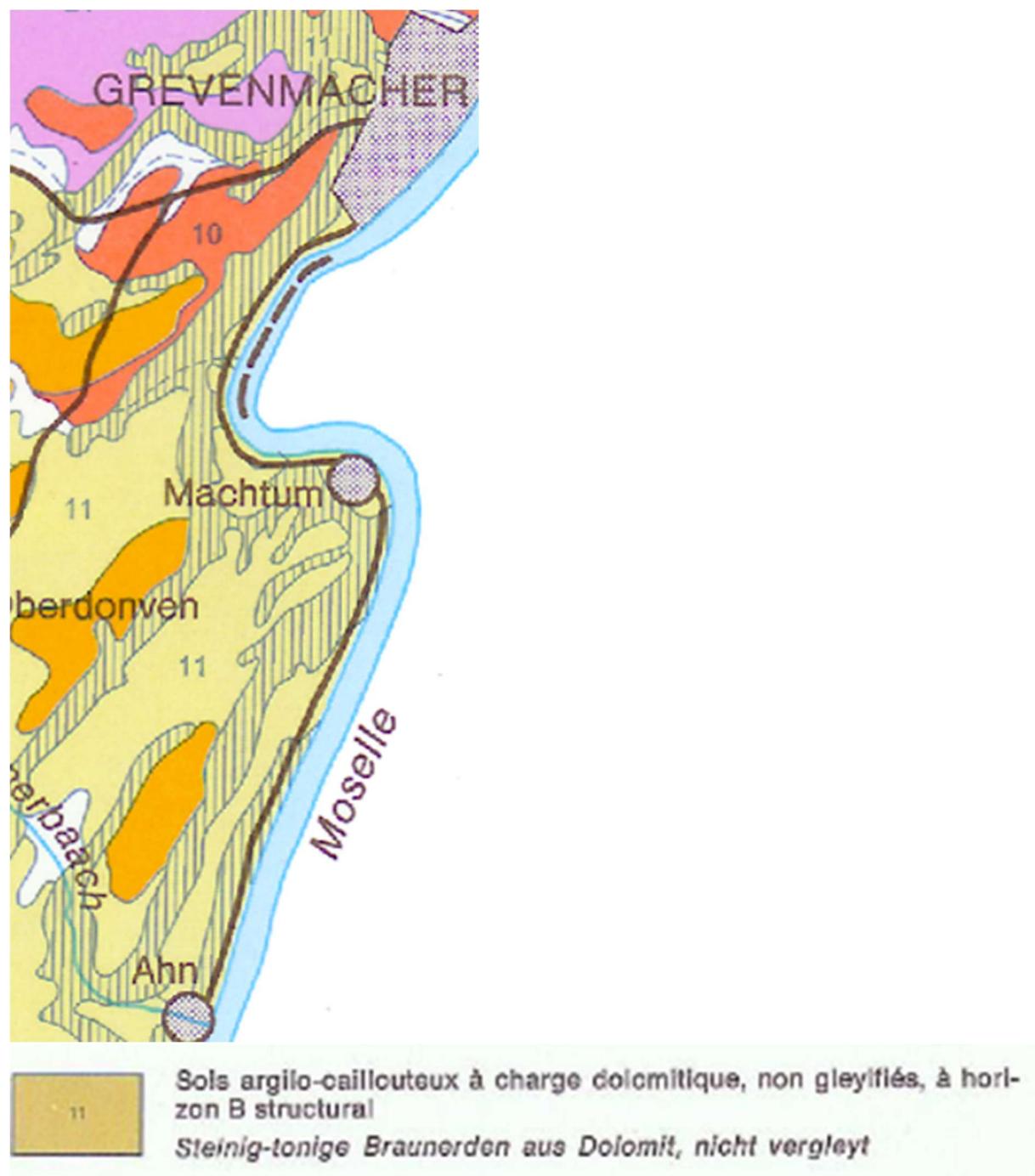


Figure 7: Carte de distribution des sols autour de Grevenmacher (Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, s.d.)

Sur la figure 6, on peut voir que le sol autour de Grevenmacher est principalement composé de Sols argilo-caillouteux à charge dolomitique, non gleyifiés, à horizon B structural (Fagot, 2019).

- Argilo-caillouteux : mélange d'argile (bon pour la rétention) et de cailloux (bon pour le drainage).
- Charge dolomitique : présence de dolomite ($Mg Ca (CO_3)_2$) typique du Muschelkalk.
- Non gleyifiés : présence d'un sol non-hydromorphe (pas gorgé en eau donc bon drainage).
- Horizon B structural : couche pauvre en humus mais riche en minéraux.



Figure 8: Carte de distribution des sols autour de Remich (Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, s.d.)

Sur la figure 7, on peut voir que le sol autour de Remich est principalement composé de sols argileux et argileux lourd, non gleyifié, à horizon B structural, sur substrat de marnes.

- Argileux lourd : lourd en particules (lourd et rétention d'eau).
- Non gleyifiés : présence d'un sol non-hydromorphe (pas gorgé en eau donc bon drainage).
- Horizon B structural : couche pauvre en humus mais riche en minéraux.
- Substrat de marnes : composé de calcaire, sables et argile de compositions différentes. (Fagot, 2019)

Le caractère calcaire confère aux vins cultivés une acidité fine et un caractère minéral prisé pour le riesling et le gewurztraminer, alors que le caractère marneux du sol confère aux vins un goût puissant plutôt prisé ici pour des cépages venant historiquement de bourgogne.

La composition du sol influence fortement la thermorégulation du sol et particulièrement sa capacité thermique et sa conductivité. Les sols dolomitiques et argilo-caillouteux de Grevenmacher, composés de roches calcaires, est bien drainé, plus sec et moins compact, ce qui leur confère une conductivité thermique plus faible et une chaleur plus rapidement dissipée. Le sol se réchauffe vite au lever du jour mais se refroidit tout aussi rapidement la nuit (effet thermique amorti faible) (Seguin, 1986), (August Imports, 2021).

En revanche, les sols argileux et marneux de Remich présentent une haute teneur en argile, une densité volumique élevée et retiennent davantage l'eau. Cette combinaison engendre une capacité thermique augmentée (plus de chaleur stockée par unité de volume). Ces sols se réchauffent plus lentement au printemps mais bénéficient d'un effet tampon thermique, ils restituent la chaleur progressivement, limitant les extrêmes thermiques (Zito, Leeuwen, & Bois, 2024), (Leeuwen C. v., Managing Wine Quality (Second Edition), 2010).

D. Impacts du réchauffement climatique sur la viticulture

1. En Europe

Les changements climatiques sont une réalité déjà présente, qui pourrait mettre en danger la viabilité de la vigne. L'Europe est considérée comme une région particulièrement sensible. D'autant plus que c'est un continent où cette culture joue un rôle environnemental, économique et social (Droulia & Charalampopoulos, 2021).

a) *Indices climatiques :*

Les tendances montrent une augmentation globale des températures et une diminution globale de précipitations. Par exemple, dans le sud-ouest de l'Allemagne, sur les 40 dernières années, la pluviométrie annuelle n'a pas changé significativement. Cependant, la moyenne des températures annuelles minimales et maximales ont augmenté respectivement de 0,9°C et 3,4°C, entraînant une augmentation moyenne de la température annuelle de 2,1°C. L'augmentation est particulièrement observée durant le printemps (Droulia & Charalampopoulos, 2021).

Dans certaines régions du sud de la France, entre 1981 et 2010, une augmentation annuelle de température moyenne pendant la période de croissance végétative de 0,076°C a été détectée, principalement due à l'augmentation des températures minimales. Les précipitations saisonnières montrent une tendance à la baisse de -7,5mm par décennie entre 1931 et 2010, surtout marquée durant la période estivale (Koch & Oehl, 2018).

Les projections climatiques annoncent une augmentation des températures minimales et maximales, notamment en été et en automne, accompagnée d'une diminution des précipitations annuelles dans le sud de l'Europe, tandis qu'une tendance inverse est observée dans le nord du continent (Droulia & Charalampopoulos, 2021). Ces évolutions devraient affecter de manière particulièrement marquée des pays comme la Bulgarie, la Hongrie, la Croatie ou encore l'Italie, où les impacts attendus du changement climatique sur la viticulture sont considérables. Cette vulnérabilité s'explique en partie par la rigidité du système des indications géographiques, qui limite fortement la possibilité de modifier les pratiques viticoles (par exemple, changer de cépage ou d'itinéraire technique). Elle est également aggravée dans certaines régions par des ressources socio-économiques parfois insuffisantes pour mettre en œuvre des mesures d'adaptation efficaces (Tscholl, et al., 2024). Ainsi, les contraintes climatiques se superposent à des freins

structurels, rendant la transition viticole particulièrement complexe dans ces zones.

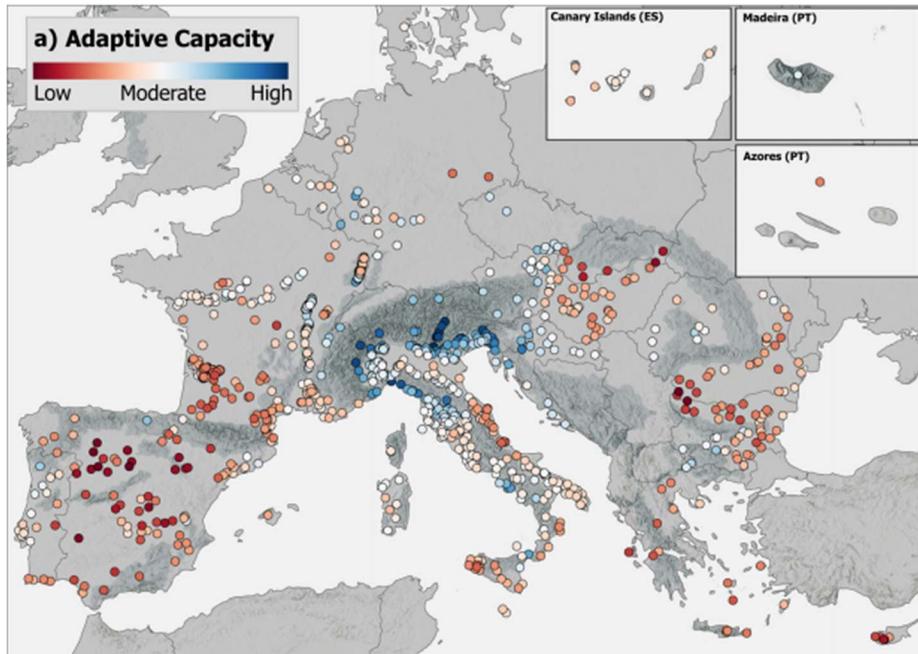


Figure 9: capacités d'adaptations de la viticulture dans certains points clés d'Europe (Tscholl et al., 2024)

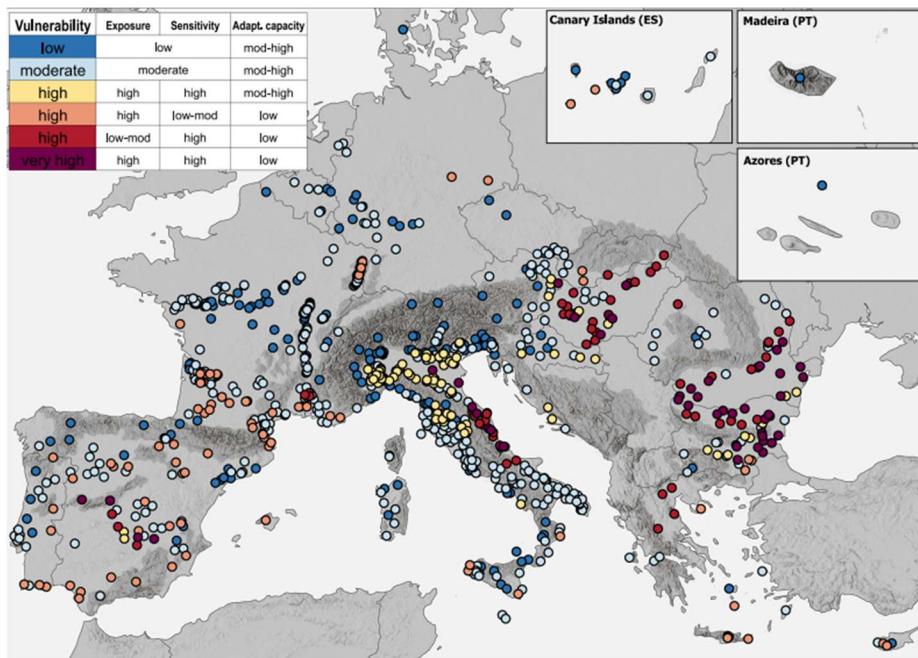


Figure 10: Vulnérabilité de zones clés de la viticulture en Europe (Tscholl et al., 2024)

b) Indices bioclimatiques :

L'indice de Huglin est un indicateur agroclimatique qui mesure la somme de chaleur disponible pour la vigne entre avril et septembre (Huglin, 1978). Il tient compte des températures moyennes et maximales journalières au-dessus de 10°C, pondérées par un facteur lié à la latitude. Il permet d'évaluer la maturité potentielle d'un cépage dans une région donnée (Koch & Oehl, 2018). L'évolution de cet indice est un indicateur clé du changement climatique sur la vigne (Tscholl et al., 2024).

Les données pour Hainfeld, ville située près du Rhin en Allemagne montrent une augmentation significative de l'indice entre 1975 et 2015. L'indice est passé de 1685°Jours en 1975 à 2063°Jours en 2015 faisant passer la région de frais à tempéré (tempéré chaud étant proche avec un indice nécessaire de 2100 pour cette catégorie) (Koch & Oehl, 2018).

Dans le Sud de la France, l'indice a évolué de 2100°Jours en 1975 à 3000 °Jours en 2005, faisant passer la région de tempéré chaud à chaud (Koch & Oehl, 2018).

Une augmentation de 360 unités a également été observées à la fois dans le nord de l'Italie et en Slovaquie (Droulia & Charalampopoulos, 2021).

Très chaud	IH+3	3000 < IH
Chaud	IH+2	2400 < IH ≤ 3000
Tempéré chaud	IH+1	2100 < IH ≤ 2400
Tempéré	IH-1	1800 < IH ≤ 2100
Frais	IH-2	1500 < IH ≤ 1800
Très frais	IH-3	IH ≤ 1500

Figure 11: Catégorisation de l'Indice de Huglin
(Bonnefoy et al., 2010)

c) Phénologie

Le réchauffement déjà observé entraîne une précocité des stades phénologiques de la vigne et un allongement de la saison de croissance. En Allemagne, dans les zones proches du Rhin, le débourrement, la floraison, la véraison et les vendanges sont plus précoces depuis 1970 respectivement de :

- 11 à 15 jours pour le débourrement .
- 18 à 22 jours pour la floraison.
- 16 à 22 jours pour la véraison.
- 25 à 40 jours pour les vendanges (Koch & Oehl, 2018).

En Slovaquie, une étude a montré une augmentation des températures moyennes entre 1985 et 2018 et montre également une augmentation de la saison de croissance, entraînant des avancées significatives dans la phénologie de la vigne (Droulia & Charalampopoulos, 2021).

d) Qualité

L'augmentation des températures et l'avancement de la phénologie a aussi des impacts sur la qualité du raisin et de fait sur le vin. Dans les régions proche du Rhin allemand citées ci-dessus, les concentrations en sucre ont augmenté de façon significative. Pour les variétés Riesling et Silvaner, cela représente une augmentation de la densité de moût de 9 à 17° Oechsle entre 1975 et 2015 (Koch & Oehl, 2018).

Dans le Sud de la France, beaucoup de vignerons ont signalé une maturation phénolique incomplète ainsi qu'une incohérence entre l'accumulation élevée en sucre et la réduction de l'acidité. Le risque est alors d'obtenir un vin fort alcoolisé à terme ou de devoir récolter plus tôt, pouvant alors amener à un raisin manquant de certaines subtilités. Cependant, le réchauffement futur dans les régions au climat frais, pourrait améliorer l'aptitude de celles-ci à produire des vins de plus haute qualité (Droulia & Charalampopoulos, 2021).

e) Rendements

Les effets sont assez hétérogènes selon les régions. Les impacts négatifs sont surtout attribués à l'augmentation des températures ainsi qu'à la réduction des pluies estivales et ce de façon plus marquée dans l'Europe du Sud. Dans le sud de la France, la décennie 2001-2010 a par exemple été parmi les moins rentables en terme de rendements. (Droulia & Charalampopoulos, 2021) explique cependant, que l'augmentation de la concentration en CO₂ pourrait améliorer l'efficacité de l'eau et du rayonnement par la vigne, réduisant alors l'effet de l'impact de la baisse de précipitations et l'augmentation de l'évapotranspiration. Cette interaction entre effets négatifs et positifs du relargage de gaz à effet de serre sur la physiologie de la plante peut expliquer les effets hétérogènes que les différents cépages vont subir selon les zones où ils se situent et la baisse ou non de rendements (Droulia & Charalampopoulos, 2021).

Inversement, dans l'ouest et au centre de l'Europe, certaines régions pourraient profiter de cette augmentation de température pour augmenter leurs rendements et leur qualité. Ce serait par exemple, le cas de la Grande-Bretagne, certaines régions fraîches du Portugal et le Sud de l'Allemagne (Droulia & Charalampopoulos, 2021).

f) Géographie

L'augmentation globale des températures a favorisé l'expansion de la viticulture dans des régions normalement trop froides, à des latitudes plus septentrionales (Angleterre, Danemark, Finlande...).

Droulia & Charalampopoulos (2021) disent cependant que dans le cadre du Royaume-Uni, le changement climatique a eu l'impact d'un catalyseur, renforçant la confiance de certains vignerons et investisseurs qui avaient déjà ce projet en tête. Cela a alors permis un élargissement des variétés dans le pays (Leeuwen et al., 2024).

Toutefois, si le nord de l'Europe pourra profiter de températures plus chaudes pour la vigne, les zones viticoles méditerranéennes pourraient être enclines à devoir migrer ou adapter leurs pratiques agricoles (Leeuwen, et al., 2024) . Si les scénarios futurs pessimistes se vérifient, les régions du nord pourraient devenir des zones adaptées à la viticulture tandis que le Sud sera trop chaud pour la culture du vin.



Figure 12: vignoble au Royaume-Uni (Pollès, 2024)

2. Au Luxembourg

a) Indices climatiques

La température de l'air de la région viticole luxembourgeoise subit la même augmentation générale des températures (Molitor & Junk, 2019). Les observations récentes confirment le caractère exceptionnel des températures enregistrées à la fin du 20ème siècle et au début du 21ème siècle. Les données actuelles du Luxembourg confirment que cette période est très probablement la plus chaude en Europe depuis 500 ans (Molitor et al., 2016). A Remich, la température annuelle moyenne atteint 11,69°C et 11,88°C en 2020 et 2022. Cela représente une augmentation de +1,55°C et +1,70°C au-dessus de la moyenne de référence de 1968 à 2020. On voit sur la figure 12 que la température a augmentée et continue encore d'augmenter (IVV, 2020) ; (IVV, 2022). En 2024, l'augmentation a atteint +0,9°C par rapport à la moyenne de 1991 à 2020. Elle a été classée parmi les 10 années les plus chaudes depuis 1838 (IVV, 2024).

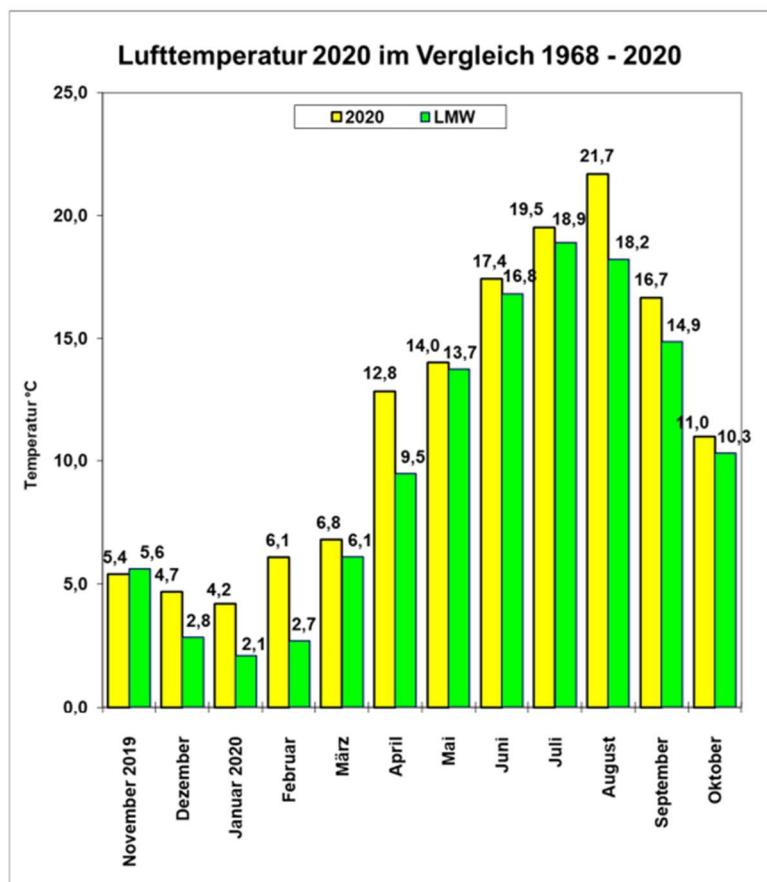


Figure 13: Évolution de la température moyenne de l'air mois par mois entre novembre 2019 et octobre 2020 à Remich, comparée à la moyenne climatologique de la période 1968–2020. Les barres jaunes représentent les températures mensuelles enregistrées durant l'année viticole 2019–2020, tandis que les barres vertes correspondent aux moyennes historiques calculées sur la période 1968–2020. L'indice LMW (Langjährige Mittelwerte) désigne les valeurs moyennes à long terme, utilisées ici comme référence climatologique. (IVV, 2020)

Une augmentation annuelle moyenne de la température de l'air de 3,1°C est projetée de 2012 à 2100 selon un ensemble de modèles régionaux. Des évaluations suggèrent que dans le cas du Luxembourg, les précipitations annuelles ne devraient pas changer (Goergen et al., 2012). Cependant, la distribution des précipitations risque de changer. Les distributions montrent une tendance vers la diminution de celles-ci en été tandis que la projection pour l'hiver est à la hausse. Comme pour le reste de l'Europe, l'analyse des indices climatiques sur la période 1971

à 2020 révèle une hausse significative du nombre de jours estivaux ($>25^{\circ}\text{C}$), de jours très chauds ($>30^{\circ}\text{C}$), et de nuits tropicales ($>20^{\circ}\text{C}$).

- Jours estivaux sont en moyenne de 28 jours.an $^{-1}$ pendant la période 1971-2000, contre 48 jours projetés d'ici 2100 sous le scénario RCP4.5 et 69 jours sous le RCP8.5.
- Jours très chauds sont actuellement de 4 jours.an $^{-1}$, contre 12 à 24 attendus sous les deux scénarios respectifs.
- Nuits tropicales, pratiquement absentes historiquement, elles devraient atteindre 3,8 nuits.an $^{-1}$ sous RCP4.5 et 13,2 nuits.an $^{-1}$ sous RCP8.5 (Junk et al., 2024).

Le nombre de vagues de chaleur (6 jours consécutifs supérieurs au 90^e percentile) devrait augmenter d'ici les prochaines années, ayant des conséquences sur l'homme et l'agriculture. Elles peuvent passer 65 jours.an $^{-1}$ sous le RCP8.5 d'ici la fin du siècle (Junk et al., 2024).

Une étude de Junk (2024) mentionne une augmentation des risques liés aux gels tardifs, en particulier durant dans un futur proche (2021-2050) en raison du démarrage plus précoce de la période de végétation. Une autre mentionne cependant que puisque les températures augmentent également, la viticulture luxembourgeoise devrait être moins fortement touchée par les gelées (Molitor et al., 2014).

b) Indices bioclimatiques

Dans son étude, (Junk, Görgen, Eickermann, Sinigoj, & Hoffmann, 2011) utilise l'indice de Huglin pour analyser l'évolution des températures dans la région viticole de Remich. Cet indice agroclimatique, prend en compte les températures journalières entre avril et septembre et permet d'évaluer la somme de chaleur disponible pour la maturation de la vigne. Les résultats montrent une augmentation progressive de cet indice au fil du temps, ce qui indique un réchauffement du climat local. Cette tendance laisse entrevoir la possibilité, à moyen ou long terme, d'introduire dans la région des cépages actuellement non cultivés à Remich, car ils nécessitent des conditions thermiques plus élevées pour arriver à maturité optimale.

c) Phénologie

Historiquement, l'augmentation des températures a conduit à un avancement significatif des stades phénologiques. Par rapport aux années 1970, le débourrement a eu lieu en moyenne 12 jours plus tôt, la floraison 13 jours et la véraison 17 jours en 2010 (IVV, 2010).

Les projections modélisées pour la région viticole luxembourgeoise indiquent que chacun des 27 stades phénologiques du code BBCH devrait être atteint significativement plus tôt à l'avenir qu'au cours de la période de référence (1971-2000). Ce phénomène est le même que celui capté pour le reste de l'Europe (Molitor & Junk, 2019).

Selon une des projections, la durée des stades phénologiques précoces n'est pas affectée. Toutefois, la période de la véraison à la récolte est projetée comme devenant de plus en plus courte (Molitor & Junk, 2019).

d) Qualité

Des températures plus élevées entraînent des taux de maturation des fruits altérés, des changements dans les profils de saveurs et d'arômes, ainsi qu'une dissociation des synthèses d'anthocyanes et de sucres dans les baies. Les concentrations attendues de sucre plus élevées conduisent à des teneurs en alcool plus importantes dans les vins, et une accélération de la dégradation des acides organiques, menaçant à la fois la fraîcheur et la légèreté, caractéristiques

des vins blancs des régions fraîches, comme le Luxembourg (Molitor & Junk, Climate change is implicating a two-fold impact on air temperature increase in the ripening period under the conditions of the Luxembourgish grapegrowing region, 2019) ; (Junk et al., 2011).

Comparativement à 1970, 2010 a vu le poids moyen de moûts pour le Rivaner augmenter de 12°Oe et l'acidité totale moyenne diminuer de 16g.L⁻¹. Alors que les moûts du Rivaner nécessitent encore parfois une chaptalisation⁵, les cépages de la famille du Pinot ont déjà atteint des niveaux d'alcool supérieurs aux standards de typicité dans la dernière décennie (Molitor, Junk, & Schultz, Klimawandel im Luxemburger Weinbau - Teil 2, 2022).

e) Rendements

Les gelées tardives peuvent entraîner de graves pertes de récoltes au Luxembourg. En moyenne, le rendement moyen aurait été réduit de 39% entre 1948 et 2011 suite à des gelées tardives (Molitor, et al., 2014). L'année 2019 a notamment été catastrophique avec un rendement de 76000hL soit la moitié de ce qui était prévu pour cette année. Cette année a été principalement impactée par des gelées tardives extrêmes et des dégâts causés par des brûlures dues au soleil (IVV, 2019).

Pour le Rivaner, les rendements moyen ont diminué, passant de 138,1hL.ha⁻¹ en 1970 à 101,6 hL.ha⁻¹ dans les années 2010. Cette baisse est due à des facteurs climatiques, mais aussi l'évolution des règlementations des rendements maximum, l'âge des vignes et une recherche de qualité au détriment de la qualité (Molitor et al., 2022).

Des températures de l'air plus élevées dans la période entre la floraison et la véraison pourraient avoir un impact sur le rendement annuel, des études montrant des corrélations négatives entre le rendement et les températures, en particulier les températures maximales, pendant les trois premières semaines après la floraison pour le cépage Riesling (Molitor & Junk, 2019).

Pour parler de rendements, il faut finalement aussi parler du changement d'encépagement qu'a connu le Grand-Duché. Entre 2000 et 2019, la part du Rivaner et de l'Elbling ont diminué de 46 à 27% de la superficie viticole totale tandis que les cépages de la famille des Pinots et du Chardonnay ont doublé, représentant maintenant pas loin de 50% de cette surface (IVV, 2019). La surface totale de viticulture est relativement constante depuis 20 ans (1300ha).

f) Perspectives

Afin de maintenir une viticulture durable avec des niveaux de qualité et de rendements viables, une adaptation sera primordiale face aux enjeux climatiques (Leeuwen et al., 2024).

Les producteurs peuvent s'adapter par le choix du matériel végétal, ou en modifiant les pratiques de gestion. Il est important de considérer séparément l'adaptation aux températures et l'adaptation à la sécheresse. Les mesures d'adaptation visent à retarder la période de maturation pour profiter de températures plus fraîches. Le choix du matériel végétal peut alors être un levier en choisissant des cépages génétiquement sélectionnés. Un modèle peut alors être utilisé pour simuler les différents stades en fonction des températures. Des cépages ou portes greffes plus résistants à la sécheresse peuvent aussi constituer une adaptation intéressante (Leeuwen et al., 2024). Cependant, toutes ces options nécessitent un temps important avant que le nouveau pied soit prêt à produire. Il est aussi possible de modifier les pratiques agricoles, par exemple en modifiant la canopée, ce qui augmente l'ombrage. Il faut toutefois faire attention que cette

⁵ Ajout de sucre

pratique entraîne une plus forte exposition aux maladies cryptogamiques, puisque la plante garde plus d'humidité. La solution la plus simple est alors l'irrigation d'appoint (Molitor et al., 2019).

Une chose est certaine : le changement climatique entraînera des changements majeurs dans la production mondiale de vin dans un avenir proche, et la flexibilité pour s'adapter à ces changements sera essentielle.



Figure 14: vignoble ayant subi des dégâts de sécheresse (Bonnefont, 2025)

III. Matériels et méthodes

A. Données

1. Sources

Toutes les données météorologiques m'ont été envoyées par l'administration des services techniques de l'agriculture du Grand-Duché de Luxembourg, et plus précisément par Monsieur P. Lepesant du service météorologique. Elles proviennent de deux stations météorologiques, situées à Remich et Grevenmacher.

Les jeux de données comprennent :

- La température moyenne journalière
- La température minimale journalière
- La température maximale journalière
- Les jours de végétations journaliers
- Les précipitations journalières
- La durée d'ensoleillement mensuelle

Les données phénologiques proviennent de l'institut viti-vinicole. Elles m'ont été conseillées par Monsieur Daniel Molitor. Le jeu de données est disponible sur le Landwirtschaftsportal sous la gouvernance de l'Etat luxembourgeois. On y retrouve les dates de :

- Gonflement du bourgeon (reprise cellulaire)
- Débourrement
- Stade 4 feuilles
- Stade 8 feuilles
- Floraison
- Vendanges

Il décrit aussi les principales informations météorologiques de l'année qu'il faut retenir et les maladies qui ont principalement touché les vignes cette année-là. En indiquant finalement la production viticole annuelle et les statistiques de culture par cépages.

Il est important de noter que les données phénologiques ont été moyennées en données nationales. Ainsi, il est impossible de faire la différence entre un cépage débourrant le 5 Mai à Remich et le 7 Mai à Grevenmacher puisque le document inscrira juste que le débourrement a eu lieu le 6 Mai.

Les rendements annuels décrits en $hl.ha^{-1}$ proviennent de la base de données de Statec.

B. Modèle numéro 1

La première chaîne de modèles choisie provient d'une étude réalisée par Morales-Castilla et al., (2020). Celle-ci combine le modèle Smoothed-Utah avec celui de Wang-Engel. La combinaison des deux est appelée SUWE (Smoothed-Utah, Wang-Engel). Le tout va être utilisé pour simuler la dormance et le débourrement des cépages les plus présents au Grand-Duché de Luxembourg.

1. Sortie de dormance

Le modèle Smoothed-Utah permet de déterminer la date de levée de dormance (Richardson et al., 1974). A partir de la date d'entrée en dormance, fixée au 1^{er} aout. Il cumule des unités de refroidissement sur base des données de températures journalières. Ces unités de refroidissement sont accumulées et l'auteur a calculé pour certains cépages, les valeurs à atteindre afin que la vigne sorte de sa dormance. Cette valeur d'accumulation est nommée « C* ». La valeur C* est le seuil auquel l'addition des valeurs de sortie de $f(T_{mj})$ de la fonction ci-dessous atteint la date de sortie de dormance.

En hiver, lorsque la vigne est exposée à des températures trop élevées, celle-ci subit un ralentissement de son métabolisme afin de ne pas débourrer trop tôt. Dans le cas de températures élevées, l'accumulation de froid devient négative.

Le modèle Smoothed-Utah utilisé est le suivant :

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

Où l'on retrouve,

T_{m1}	la diminution de l'efficacité du froid pour l'endodormance	-6,7°C
T_{opt}	la température moyenne quotidienne optimale	7,94°C
T_{n2}	la température avec la moitié de l'efficacité de la température moyenne quotidienne optimale pour induire l'endodormance	40,58°C
min	l'impact négatif des températures élevées	-0,17
T_{mj}	la température moyenne journalière	A déterminer

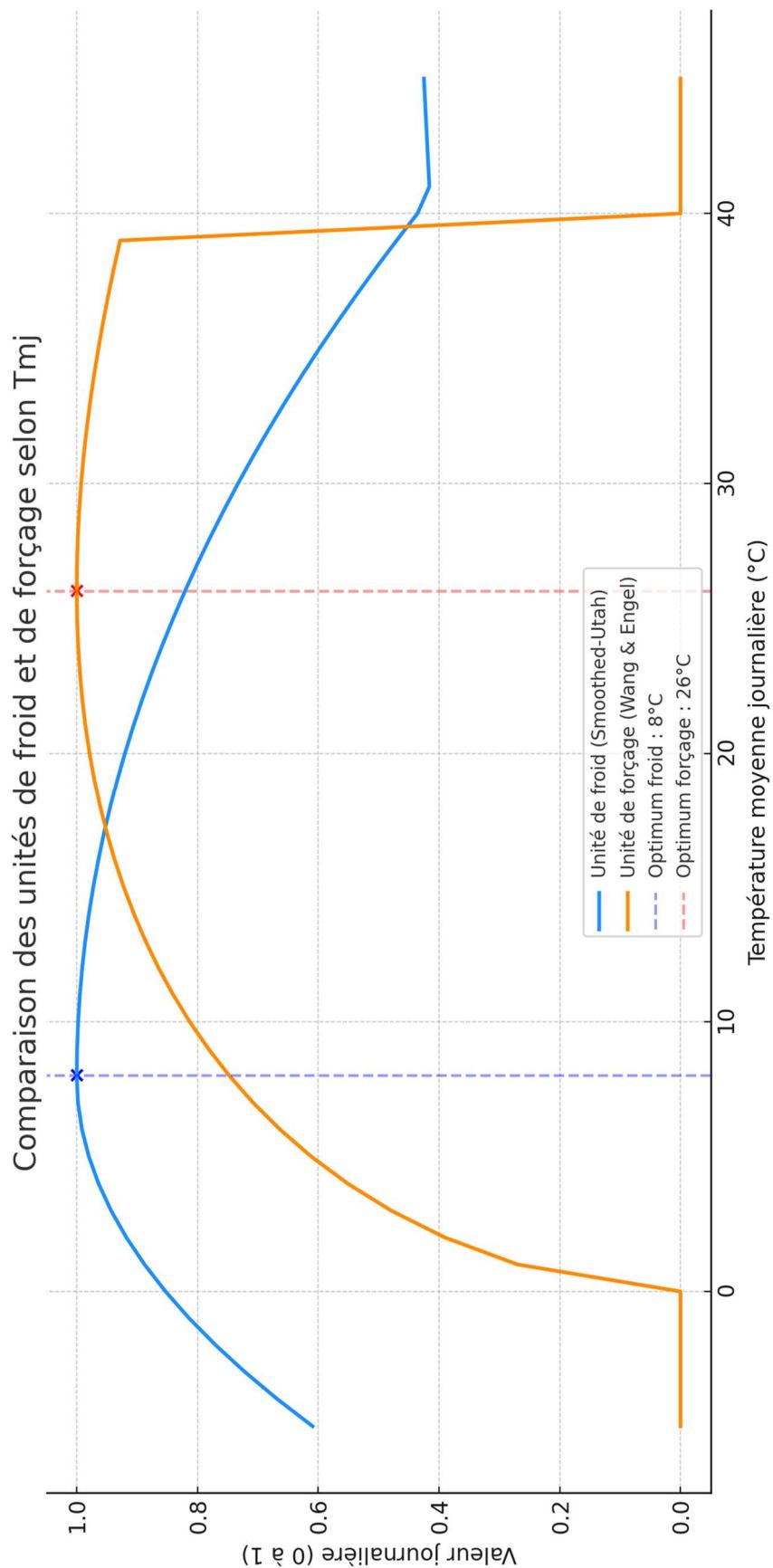


Figure 15: Comparaison des fonctions d'accumulation des unités de froid (Smoothed-Utah, en bleu) et des unités de forçage (Wang & Engel, en orange) en fonction de la température moyenne journalière. L'optimum pour le froid est situé à 8 °C et celui du forçage à 26°C

2. Débourrement

Une fois la date de fin de dormance trouvée, le modèle Wang-Engel y est greffé. Ce modèle cumule des unités de forçage « F^* » jusqu'à ce que le seuil nécessaire au débourrement de la vigne soit atteint. La valeur de ce seuil dépend du cépage. F^* vaut donc une addition de $f(T_{mj})$ après le calcul de la date de sortie de dormance (Wang & Engel, 1998).

Cette méthode de calcul a par la suite été modifiée par Morales-Castilla et al. (2020) afin d'être adaptée à la chaîne de modélisation.

Sur base de seuils physiologiques, l'auteur a fixé les températures minimales et maximales au-delà desquelles la vigne cesse de se développer à 0°C et 40°C. Lorsque T_{mj} se situe entre ces deux conditions, il se calcule comme suit :

$$f(T_{mj}) = \begin{cases} \frac{2(T_{mj} - T_{nj})^\alpha (T_{opt} - T_{nj})^\alpha - (T_{mj} - T_{nj})^{2\alpha}}{(T_{opt} - T_{nj})^{2\alpha}} & \text{si } T_{nj} < T_{mj} < T_{xj} \\ 0 & \text{si } T_{mj} \leq T_{nj} \\ 0 & \text{si } T_{mj} \geq T_{xj} \end{cases}$$

Avec,

$$\alpha = \frac{\ln(2)}{\ln\left(\frac{(T_{xj} - T_{nj})}{(T_{opt} - T_{nj})}\right)}$$

Où l'on retrouve,

T_{nj}	La température minimale journalière	40°C
T_{xj}	La température maximale journalière	0°C
T_{opt}	La température optimale	26,1°C
T_{mj}	La température moyenne journalière	A déterminer

En accumulant les unités de forçage, on trouve la date à laquelle la vigne débourse au seuil F^* .

3. Ajustement à Remich

La chaîne de modélisation SUWE ayant un RMSE de ± 13 jours d'avance sur la date réelle de débourrement à la fois à Remich et à Grevenmacher, il a été décidé de l'ajuster. De plus, les F^* et C^* n'étaient disponibles que pour calculer la sortie de dormance et le débourrement du Riesling. Les seuils pour les autres cépages emblématiques du Grand-Duché n'ont pas été déterminés par (Morales-Castilla et al., 2020).

Pour réaliser cet ajustement, une fonction du langage de programmation « Python » a été utilisée. La fonction choisie se nomme « differential_evolution » et explore automatiquement les seuils de C^* dans un intervalle compris entre [150-250] et F^* dans un intervalle de [5-25].

Cette méthode est particulièrement intéressante pour des fonctions non linéaires et non dérivables, caractéristique des modèles d'accumulation. Il a été décidé de l'utiliser suite à la lecture de l'étude de (Migliavacca et al., 2012), qui l'a utilisée dans un cadre comparable

d'utilisation de modèles phénologiques. De plus, cette méthodologie est aussi recommandée par la documentation officielle SciPy⁶.

Le modèle numéro 1 a été calibré sur la période 1984-2005. Cela représente 19 ans. Pour la validation de celui-ci, elle sera faite de 2006 à 2022 ce qui permet une analyse de plus de 15 ans.

C. Modèle numéro 2

Cette fois, le modèle est linéaire et est décrit dans l'étude de (Urhausen, Brienen, Kapala, & Simmer, 2009). Cependant, dans le cas de cette étude et en utilisant les données à disposition, ce modèle n'était pas concluant (sera décrit dans la partie résultats).

	Total R ² in [%]	Contribution to R ²			Regression coefficients			
		DD3	TX4	FD1-3	const	DD3	TX4	FD1-3
ALL	82.9	64.1	14.0	3.8	142.62	-0.36	-1.69	+0.13
Auxerrois	84.1	66.3	14.2	3.6	142.16	-0.35	-1.62	+0.12
Elbling	80.8	62.8	13.7	4.3	141.27	-0.36	-1.70	+0.14
Pinot blanc	83.2	64.9	15.3	3.0	144.12	-0.36	-1.74	+0.12
Pinot gris	82.2	65.7	12.5	4.0	141.68	-0.36	-1.61	+0.13
Riesling	80.8	63.0	14.6	3.2	144.49	-0.36	-1.73	+0.12
Rivaner	83.3	67.8	12.2	3.3	142.09	-0.38	-1.60	+0.12
Traminer	81.2	59.6	16.4	5.2	143.54	-0.34	-1.89	+0.16

Figure 16: paramètres de détermination du jour de débourrement de l'étude de Urhausen et al. (2009)

Où :

- DD3 est la somme de degrés jours du mois de mars
- TX4 est la moyenne de température du mois d'avril
- FD1-3 est le nombre de jours de gel du mois de janvier au mois de mars

Pour reporter la méthodologie à cette étude, il a fallu rassembler toutes les données dans un même document. Il contient des données comprenant:

- La température moyenne
- La température maximale
- La température minimale
- Les degrés jours
- Les heures d'ensoleillement mensuelles
- Le nombre de jours de gel mensuels

Les degrés jours ont été calculés selon la méthode en triangle de Zalom (Zalom et al., 1983) comme suit :

⁶ Banque de modèles disponibles pour le codage Python.

$$^{\circ}D = \begin{cases} 0, & \text{if } T_L > T_{\max}, \\ T_{\text{mean}} - T_L, & \text{if } T_L < T_{\min}, \\ \frac{(T_{\max} - T_L)^2}{2(T_{\max} - T_{\min})}, & \text{if } T_{\min} < T_L < T_{\max}, \end{cases}$$

Avec :

$^{\circ}D$	Degrés-jours	A déterminer
T_L	Température seuil minimale de développement	0°C
T_{\max}	Température maximale journalière	A déterminer
T_{mean}	Température moyenne journalière	A déterminer
T_{\min}	Température minimale journalière	A déterminer

Cette méthode a été proposée par Zalom et al., (1983), et permet une estimation plus précise des unités de chaleur tout en tenant compte des valeurs extrêmes de la journée. Dans notre cas, la vigne étant sensible aux extrêmes, cela nous permet de, ni sur, ni sous-estimer l'effet thermique sur la croissance de la plante.

Ces données ont été moyennées pour avoir des moyennes mensuelles. Ces moyennes mensuelles ont alors été transformées comme expliqué dans le tableau récapitulatif de l'annexe.

Il a alors fallu utiliser ce qui s'appelle en anglais : « Stepwise forward selection and backward elimination ». Cela signifie que l'étude applique une sélection pas à pas bidirectionnelle, où des variables sont ajoutées progressivement (forward selection) tant qu'elles améliorent significativement le modèle. En même temps, à chaque étape, le modèle vérifie si certaines variables déjà sélectionnées deviennent non significatives, et les élimine si nécessaire (backward elimination) (Urhausen et al., 2009).

Kipsang (2023) explique comment utiliser ce modèle sur python. D'un point de vue théorique, l'approche permet de construire un modèle itératif (qui est fait/ répété plusieurs fois). Le programme part d'un modèle vide et ajoute ou supprime des variables à chaque étape, en fonction de son impact sur le fonctionnement du modèle. Cela permet de ne pas se baser sur la valeur p d'une variable en particulier, mais bien de combiner des variables clés d'un phénomène qui seules, n'auraient pas pu expliquer le débourement (Choueiry, 2025).

Le processus se poursuit jusqu'à ce qu'aucune variable supplémentaire ne puisse être ajoutée ou retirée de manière significative. Cette méthode permet d'obtenir un modèle à la fois parcimonieux et performant, limitant le surajustement (Choueiry, 2025).

Les critères statistiques retenus pour déterminer la robustesse du modèle sont le R^2 et le VIF global (Variance Inflation Factor). Ceux-ci seront expliqués dans la suite du travail. Cela sert à montrer si le modèle est globalement cohérent mais également si il ne contient pas de multicolinéarité. Les indicateurs utilisés étant climatiques et donc, souvent corrélés entre eux car ils proviennent d'une même série temporelle et de périodes voisines, la valeur VIF est une statistique importante. D'autant plus que les indicateurs sont parfois corrélés entre eux (degré jours et température par exemple) (Montgomery et al., 2012).

A la fin, la fonction sort les modèles dans l'ordre du plus au moins pertinent en terme de ces deux statistiques. Cependant, un modèle peut être statistiquement valide mais ne pas expliquer un événement de façon biologique. Il est alors important de se référer à la partie théorique du débourement expliqué en point 2. Plus le VIF est bas et le R^2 est proche de 1, plus le modèle est fiable.

D. Fiabilité

1. Modèle 1

La chaîne de modélisation SUWE (Morales-Castilla, et al., 2020) suggère d'utiliser le RMSE (Root Mean Square Error) afin de vérifier sa fiabilité. Cette approche nous permet de déterminer de combien de jours Julian le modèle dévie de la réalité de terrain. Un RMSE de 0 correspondrait à une prédiction parfaite des observations de terrain.

Le RMSE représente la distance quadratique entre les stades phénologiques observés (N_{PO}) et simulés (N_{PS}) (ici : débourrement, floraison et véraison). Le RMSEP et le RMSE sont calculés de la même manière, mais le premier renseigne spécifiquement sur l'erreur de prédiction lors de la validation croisée, tandis que le second mesure l'erreur de calibration. Comme pour le RMSE, des valeurs plus faibles de RMSEP indiquent une meilleure précision.

Il se calcule comme suit :

$$RMSEP = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (N_{PS}(i) - N_{PO}(i))^2}$$

Où l'on retrouve,

$N_{PS}(i)$	Date phénologique prédictive
$N_{PO}(i)$	Date phénologique observée

L'auteur suggère également de calculer l'efficience du modèle « EF ».

Elle se calcule comme suit :

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (N_{PO}(i) - N_{PS}(i))^2}{\sum_{i=1}^N (N_{PO}(i) - \bar{N}_{PO})^2}$$

Pour calculer si le modèle prévoit en moyenne trop tôt ou trop tard, un biais peut être calculé:

$$Biais = moyenne (prédictions - observations)$$

Si le biais est négatif, la prédiction se fait systématiquement trop tôt tandis que si il est positif, elle sera trop tard.

2. Modèle 2

Pour le modèle linéaire, la banque de modèles Bookdown propose les tests suivant pour expliquer la solidité de la régression :

- Les R^2 et le VIF (qui provient du test de multicolinéarité) ont déjà été calculés lors de la pré-sélection du modèle le plus pertinent.
- La normalité des résidus selon le test Shapiro-Wilk
- L'hétéroscédasticité selon le test de Breusch-Pagan
- L'influence des points extrêmes selon la distance de Cook (Bookdown, n.d.)

Tous ces tests ont été réalisés grâce à des fonctions Python. Elles sont cependant décrites ci-dessous.

a) *Le coefficient de détermination R^2*

$$R^2 = 1 - \sum(y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum(y_i - \bar{y})^2$$

Où :

- y_i représente les valeurs observées de la variable dépendante,
- \hat{y}_i représente les valeurs prédites par le modèle,
- \bar{y} est la moyenne des valeurs observées,
- $\sum(y_i - \hat{y}_i)^2$ est la somme des carrés des résidus (ou erreurs),
- $\sum(y_i - \bar{y})^2$ est la somme totale des carrés, qui mesure la dispersion totale des valeurs observées (Delahaut, 2019).

Plus le R^2 est proche de 1, plus la fonction est représentative de la réalité. Moins il y a de résidus et plus les points sont alignés sur la droite de régression.

b) *La multicolinéarité VIF (Variance Inflation Factor)*

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2}$$

Où le R^2 est le coefficient de détermination obtenu en régressant la variable X_j sur toutes les autres variables explicatives du modèle.

Un VIF inférieur à 5 est signe d'une absence de multicolinéarité.

c) *La normalité des résidus selon Shapiro-Wilk*

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{(\sum_{i=1}^n x_i - \bar{x})^2}$$

Où :

- $x_{(i)}$,i-ème ordre croissant des résidus (valeurs triées)
- \bar{x} est la moyenne des résidus
- a_i est une constante calculée à partir des moyennes et covariances des ordres statistiques d'une loi normale
- n , est la taille de l'échantillon

Le a_i est obtenu à l'aide de tables. Il est ici indicatif mais doit aussi être calculé.

Si la p valeur obtenue est plus petite que α , il y a rejet de la normalité.

d) L'hétéroscédasticité selon le test Breusch-Pagan

Il sert à détecter si la variance des résidus dépend des variables explicatives.

$$LM = n \cdot R^2$$

Où :

- LM, appelé Lagrange Multiplier
- n, est le nombre d'échantillon
- R^2 , est ici un coefficient de détermination auxiliaire d'une régression spécialement construite pour ce test.

Ce R^2 auxiliaire est fait en déterminant une régression des résidus au carré.

Ce LM sera alors comparé à une loi du χ^2_k où k est le degré de liberté.

Si LM est trop élevé, il y a hétéroscédasticité détecté. Si c'est le cas, les erreurs détectées sont extrêmes pour certaines variables explicatives. La variance des résidus n'est pas constante tout au long du modèle.

e) L'influence des points extrêmes selon les « Cooks distance »

$$Di = \frac{e_i^2}{p * MSE} * \frac{h_{ii}}{(1 - h_{ii})^2}$$

Où :

- Di , est la distance de Cook pour un point i
- e_i , est le résidu pour l'observation i
- h_{ii} , est la valeur diagonale de la matrice des leviers
- MSE, est l'erreur quadratique moyenne
- p est le nombre de paramètres estimés (ordonnée à l'origine comprise)

Concrètement, ce test permet d'affirmer si la régression contient des valeurs influentes. Des valeurs qui, si elles étaient supprimées renforceraient fortement le modèle.

Si le Di est inférieur à 0,5, il y a peu d'influences.

f) Statistiques

	Abréviation	Nom du test	Valeur de fiabilité
Coefficient de détermination	R^2	Régression linéaire	0,8-1
Multicolinéarité	VIF	Variance Inflation Factor	<5
Normalité des résidus	W	Shapiro-Wilk	$p > 0,05$
Hétéroscédasticité	LM	Breusch-Pagan	$p > 0,05$
Influence des points extrêmes	Di	Cooks distance	$D < 1$

Tableau 3: résumé des statistiques pour définir la robustesse d'un modèle

Pour la normalité des résidus et l'hétéroscédasticité, la valeur est fiable si la moyenne des p valeurs de toutes les variables est supérieure à 5%. On ne rejette alors pas la normalité ou l'hétéroscédasticité des résidus. Attention, la constante ne doit pas être prise en compte pour ces test statistiques au risque d'avoir une analyse aberrante.

E. Gelées tardives

Pour calculer l'évolution des gelées tardives, il a été décidé de travailler avec les 3 indices suivants : l'indice d'intensité de gelée, l'évolution des dernières gelées annuelles et l'écart entre la date de débourrement et le dernier jour de gel. Ces trois analyses seront réalisées à la fois pour le site de Remich et Grevenmacher.

1. Indice d'intensité de gelée

De la date de début de débourrement de chaque cépage jusqu'au 31 juillet (date à laquelle il ne devrait plus geler), chaque jour a été rattaché à un indice d'intensité de gelée. Celui-ci est calculé depuis les données de températures minimales journalières. Dans un premier temps, une température minimale de danger pour les bourgeons a été choisie. Pour la période post-débourrement, une température en dessous ou égale à 0°C peut déjà être nocive (Delmas, 2024).

$$\text{Indice de gelée } (T_{min}(j)) = \begin{cases} 0^{\circ}C - T_{min}(j) & \text{si } T_{min}(j) \leq 0^{\circ}C \\ 0 & \text{si } T_{min}(j) > 0^{\circ}C \end{cases}$$

$$\text{Indice d'intensité des gelées tardives} = \sum_{(j=1)}^n \text{Indice de gelée } (T_{min}(j))$$

Où :

- $T_{min}(j)$, est la température minimale journalière.
- n , est le nombre de jours de la période étudiée

Une fois les valeurs accumulées, un indice nul présente une absence de gelées après débourrement. Un indice élevé présente ou de fortes gelées, ou des gelées modérées mais sur des périodes plus importantes.

Pour comparer l'évolution de la longueur de la période de froid et de l'importance du froid, il est possible aussi de faire une sommation annuelle des indices journaliers. Cette méthode offre une vue d'ensemble sur les tendances climatiques à long terme, tout en permettant d'évaluer la régularité ou l'irrégularité des hivers, ce qui est crucial pour déterminer la capacité des cépages à sortir de dormance et à amorcer le débourrement de manière optimale.

2. Evolution des dernières gelées annuelles

Il s'agit simplement du dernier jour de l'année caractérisé par une température inférieure à 0°C avant le 31 juillet. La tendance est analysée pour y déterminer la tendance future de l'évolution annuelle de la date de dernière gelée.

3. Ecart entre la date de débourrement et le dernier jour de gel

Une fois la date de dernière gelée trouvée, il est possible de calculer l'écart de jours entre le débourrement et la dernière gelée. Si elle est négative, cela signifie que le débourrement risque de subir des dégâts potentiellement irréversibles pour un vigneron. Si les valeurs sont proches de 0, cela reste dangereux.

A. Ruptures

Avant les modélisations, il est essentiel de vérifier si les données climatiques ont subi une rupture statistique.

Afin de détecter les ruptures dans l'évolution de la date de dernière gelée, deux tests complémentaires ont été utilisés : le test de Pettitt (Pettitt, 1979), non paramétrique, pour identifier une rupture dans la tendance centrale (médiane), et le test de Chow (Chow, 1960), qui permet de tester une rupture structurelle dans un modèle de régression linéaire. Cette approche permet d'explorer à la fois les changements abrupts globaux (Pettitt) et les modifications progressives de tendance (Chow).

a) Pettitt

Pour calculer ce point de rupture, le test de Pettitt (Pettitt, 1979) est reconnu comme fiable et robuste. Il s'agit d'un test non paramétrique inspiré du test de Mann-Whitney (Paturel et al., 2004).

On admet que H_0 = absence de rupture.

Rejet de H_0 = présence de rupture.

Pour calculer la statistique de test, il faut :

$$U_k = 2 \sum_{i=1}^k R_i - k(n + 1)$$

Où l'on retrouve,

Tableau 4: Elements statistiques du test de Pettitt

U_k	statistique de rupture de Pettitt correspondant à l'année k , calculée à partir des rangs des données ; elle mesure le déséquilibre entre les deux sous-séries avant et après k .
R_i	Rang attribué à la température de l'année i lorsqu'on classe toutes les valeurs de la série par ordre croissant.
k	Nombre d'observations
n	La taille totale de série

La valeur maximale (en valeur absolue) de U_k est celle à prendre en compte dans le cadre d'une potentielle rupture. La p-valeur de cette variable de décision est ensuite calculée.

La p-valeur s'obtient par :

$$p \approx 2 \cdot \exp \left(\frac{-6 \cdot K^2}{n^3 + n^2} \right)$$

Où K est la valeur maximale de U_k trouvée.

Si p est inférieur à 0,05, il y a rejet de H_0 et donc, rupture temporelle.

Ce test a été réalisé via la formule brute sur Excel.

b) Chow

Le test de Chow (Chow, 1960), a été appliqué afin de détecter une rupture structurelle dans la relation linéaire entre l'année et la date de dernière gelée jusqu'au 31 juillet. Il repose sur la

comparaison de deux modèles de régression linéaire estimés séparément avant et après une date de rupture supposée, en évaluant si les coefficients (intercept et pente) diffèrent significativement. Plus précisément, ce test permet de vérifier l'hypothèse nulle d'égalité des paramètres de régression entre les deux sous-périodes, contre l'alternative d'un changement de structure du modèle. Ce test, de nature paramétrique, est particulièrement adapté lorsque l'on cherche à mettre en évidence une modification dans la dynamique temporelle d'une variable, typiquement causée par un forçage externe tel que le changement climatique. Il a été appliqué ici aux séries annuelles des dates de dernière gelée pour les stations de Remich et de Grevenmacher.

Pour que le test de Chow soit justifié, il est nécessaire de justifier certains paramètres (Chow, 1960) :

- Linéarité : La relation entre les variables indépendantes et dépendantes est linéaire.
- Indépendance des erreurs : Les résidus (erreurs) sont indépendants entre eux, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'autocorrélation.
- Homoscedasticité : Les résidus ont une variance constante à travers toutes les observations.
- Normalité des erreurs : Les résidus suivent une distribution normale.

Il sera nécessaire de tester tous ces paramètres avant l'analyse des dates de dernières gelées.

IV. Résultats

1. Température

L'étude des températures moyenne montre une rupture selon le test de Pettitt en 1987. La période de rupture a été calculée de 1949 à 2022. Le K (U_k maximal) qui a été trouvé est de 957. Il correspond à l'année 1987. La valeur p est de 3.10^{-8} . Il y a donc, une rupture statistique des températures avant et après 1987. Il faut maintenant trouver les deux fonctions appliquées à celle-ci.

Pour les températures minimales, aucune rupture n'est détectée.

Cela nous permettra de trouver si il y a une hausse de température historique, pouvoir la quantifier et éventuellement pouvoir prédire les futurs changements si les conditions ne changent pas.

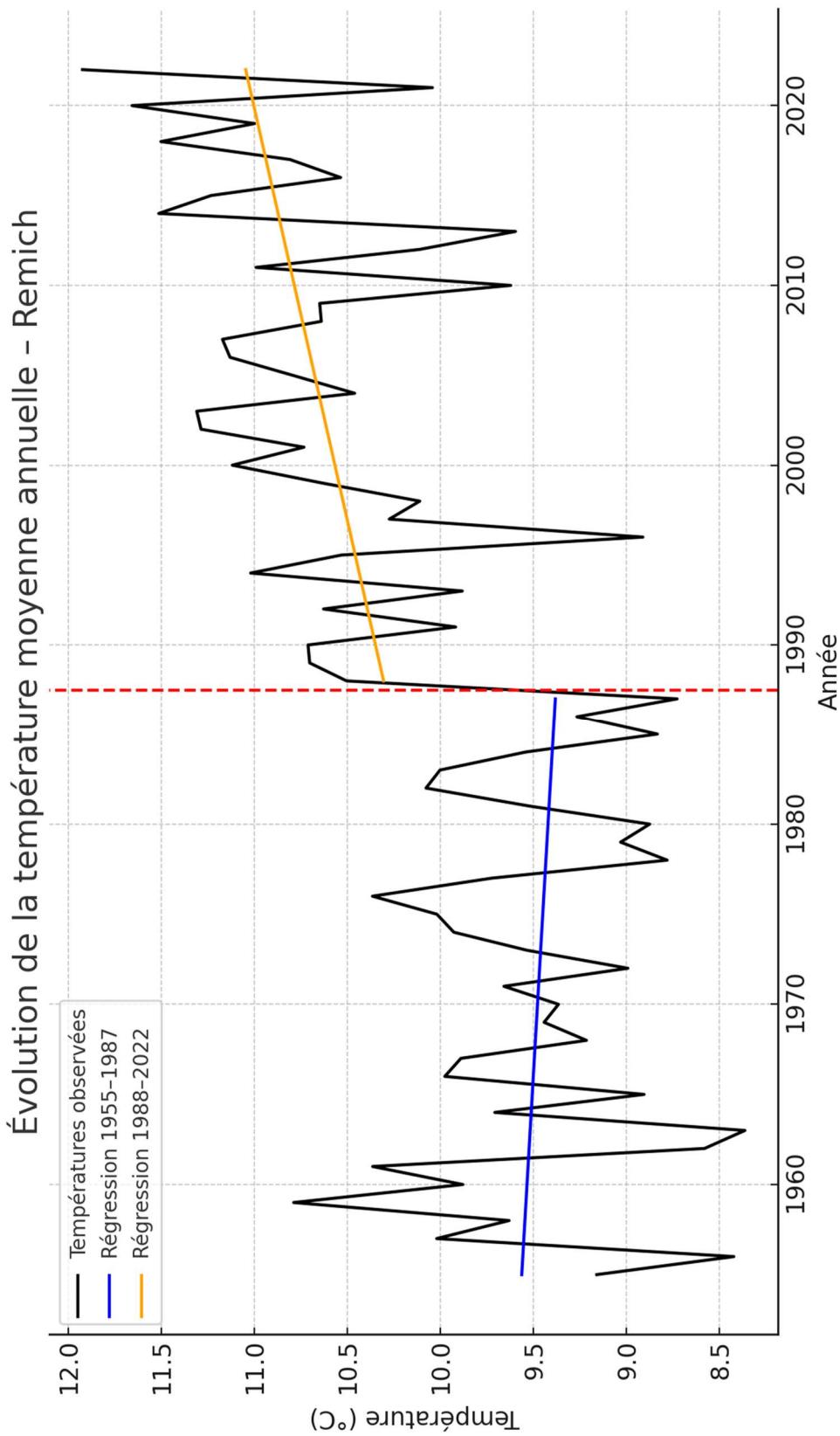


Figure 17: Evolution de la température moyenne annuelle à Remich entre 1955 et 2022 avec rupture en 1987 représentée en ligne discontinue. Equation de la droite entre 1955 et 1987: $y = -0,0056x+20,6$. p -valeur = 0,614. Equation de la droite entre 1988 et 2022 : $y = 0,0218x-33,06$. p -valeur = 0,0397.

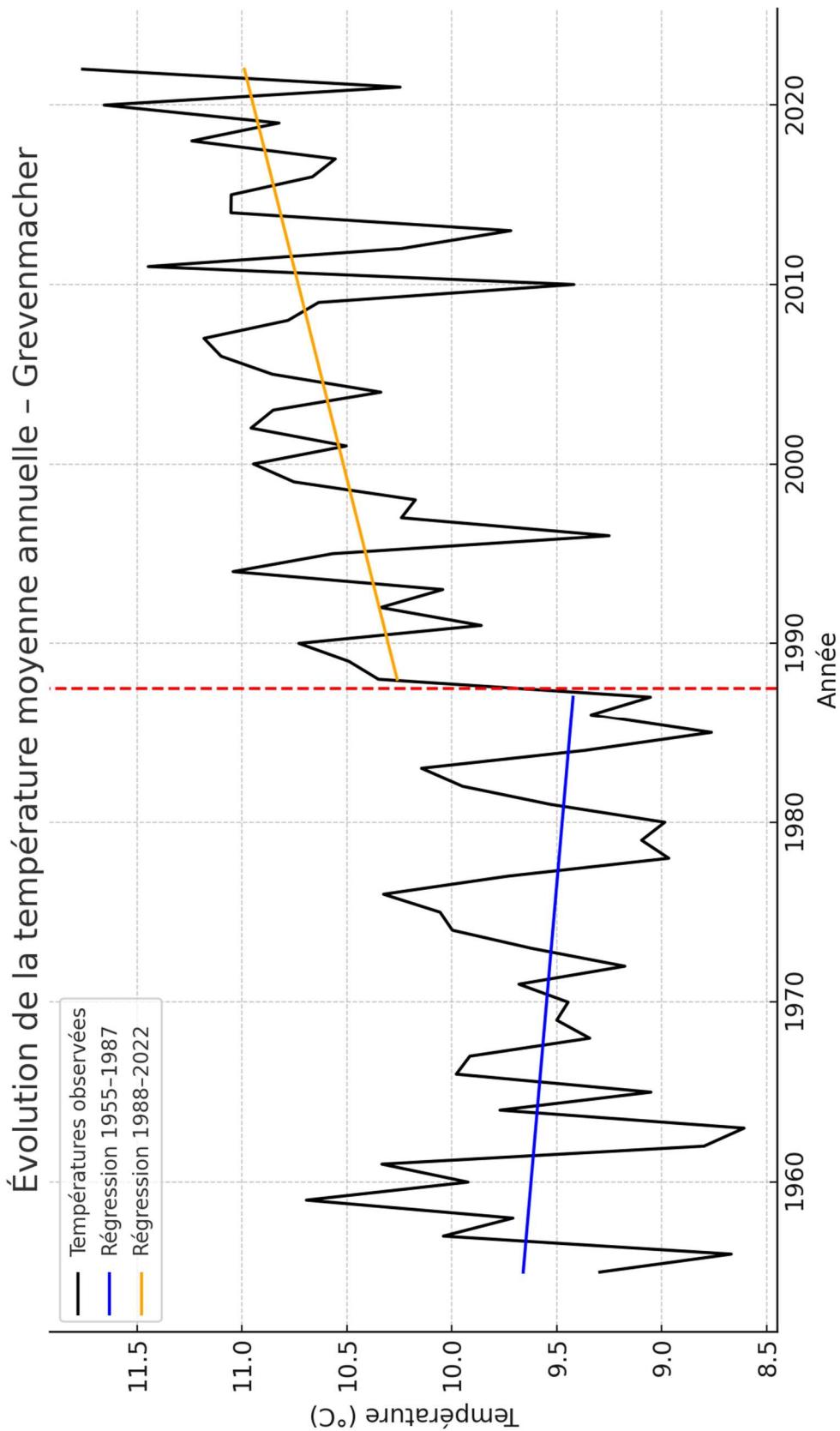


Figure 18: Evolution de la température moyenne annuelle à Grevenmacher entre 1955 et 2022 avec rupture en 1987 représentée en ligne discontinue. Equation de la droite entre 1955 et 1987: $y = -0,0074x + 24,16$. p -valeur = 0,449. Equation de la droite entre 1988 et 2022 : $y = 0,0214x - 32,29$. p -valeur = 0,0214.

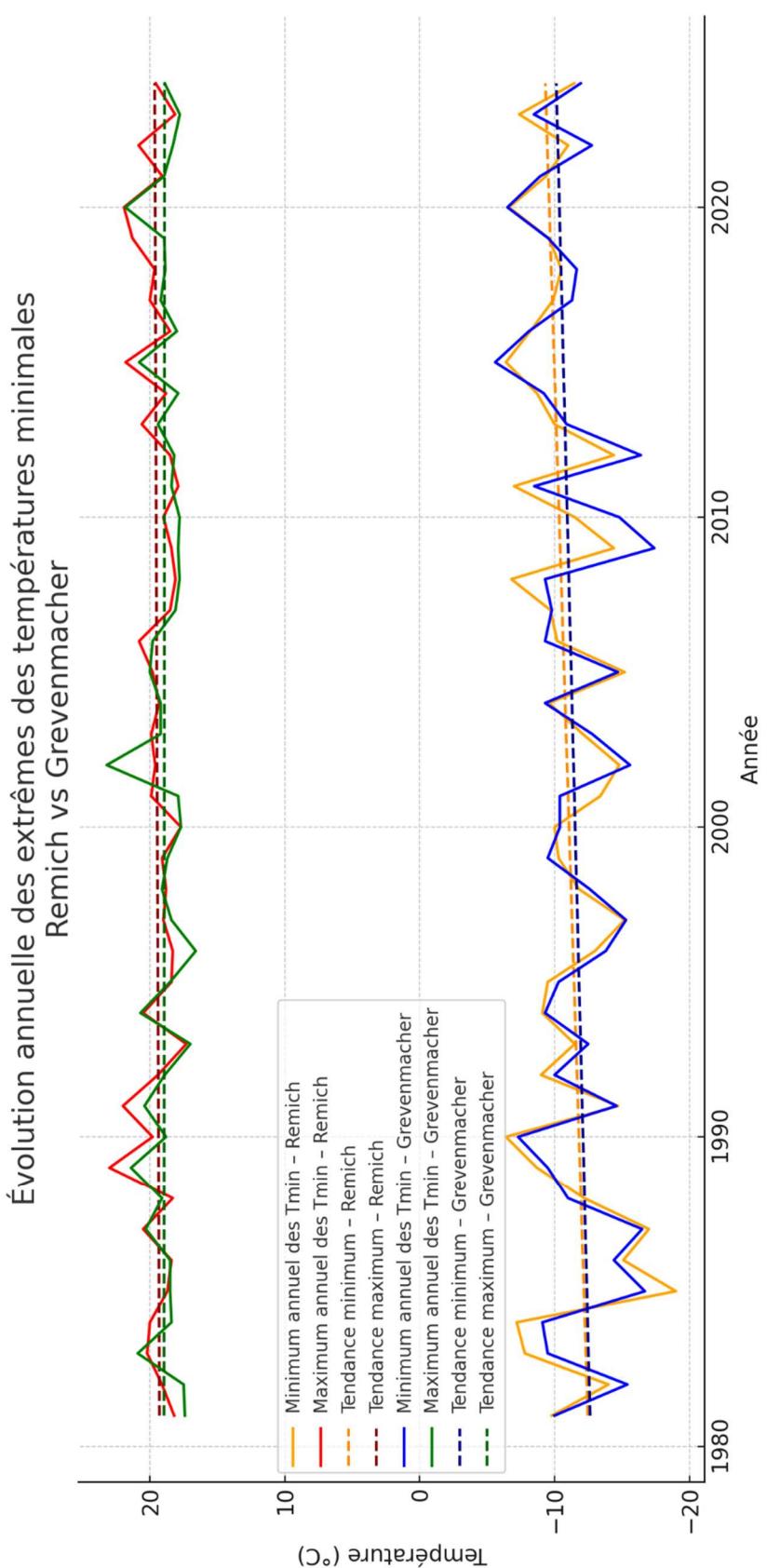


Figure 19: Evolution annuelle des extrêmes de températures minimales pour la région de Remich et Grevenmacher avec les tendances représentées par des lignes discontinues. Avec p-valeur du minimum annuel des Tmin pour Remich = 0,042 et pente = 0,074. Avec p-valeur du maximum annuel des Tmin pour Remich = 0,587 et pente = 0,013. Avec p-valeur du minimum annuel des Tmin pour Grevenmacher = 0,099 et pente = 0,058. Avec p-valeur du maximum annuel des Tmin pour Grevenmacher = 0,959 et pente = 0,002.

a) Remich :

Sur les figures 17 et 18,

Régression 1955–1987 : $y = -0,0056x + 20,6$ ($p = 0,614$)

Régression 1988–2022 : $y = 0,022x - 33,06$ ($p = 0,04$; $R^2 = 0,12$)

La pente de 1955 à 1987 a une p valeur supérieure à 0,05. Cela signifie que la pente est statistiquement non significative et que l'équation ne peut pas être prise en compte.

Le coefficient de détermination est de 0,12. Cela signifie que 12% de la variabilité est expliquée par le simple modèle de tendance linéaire. Cela reflète de la complexité de modéliser des systèmes climatiques mondiaux. On y voit quand même la rupture de 1987.

Sur la figure 17,

La régression entre 1983 et 2022 vaut :

Minimum annuel des T_{min} : $y = 0,073x - 134,15$ ($p = 0,042$)

Maximum annuel des T_{min} : $y = 0,013x - 13,65$ ($p = 0,587$)

b) Grevenmacher :

Régression 1955–1987 : $y = -0,0074x + 24,16$ ($p = 0,45$)

Régression 1988–2022 : $y = 0,0214x - 32,29$ ($p = 0,021$, $R^2 = 0,15$)

La pente de 1988-2022 est ici aussi statistiquement significative.

Sur la figure 18,

La régression entre 1983 et 2022 vaut :

Minimum annuel des T_{min} : $y = 0,058x - 106,51$ ($p = 0,099$)

Maximum annuel des T_{min} : $y = 0,002x - 3,62$ ($p = 0,959$)

On peut maintenant vérifier si les données phénologiques vont aussi suivre cette tendance.

2. Débourrement

Le test de Pettitt a retourné une statistique $K = 558$, ce qui reflète l'ampleur du changement dans la série de données. Cette valeur représente la plus grande différence cumulative entre les deux segments de la série (avant et après 1987), suggérant que cette année marque un tournant significatif dans l'évolution du débourrement.

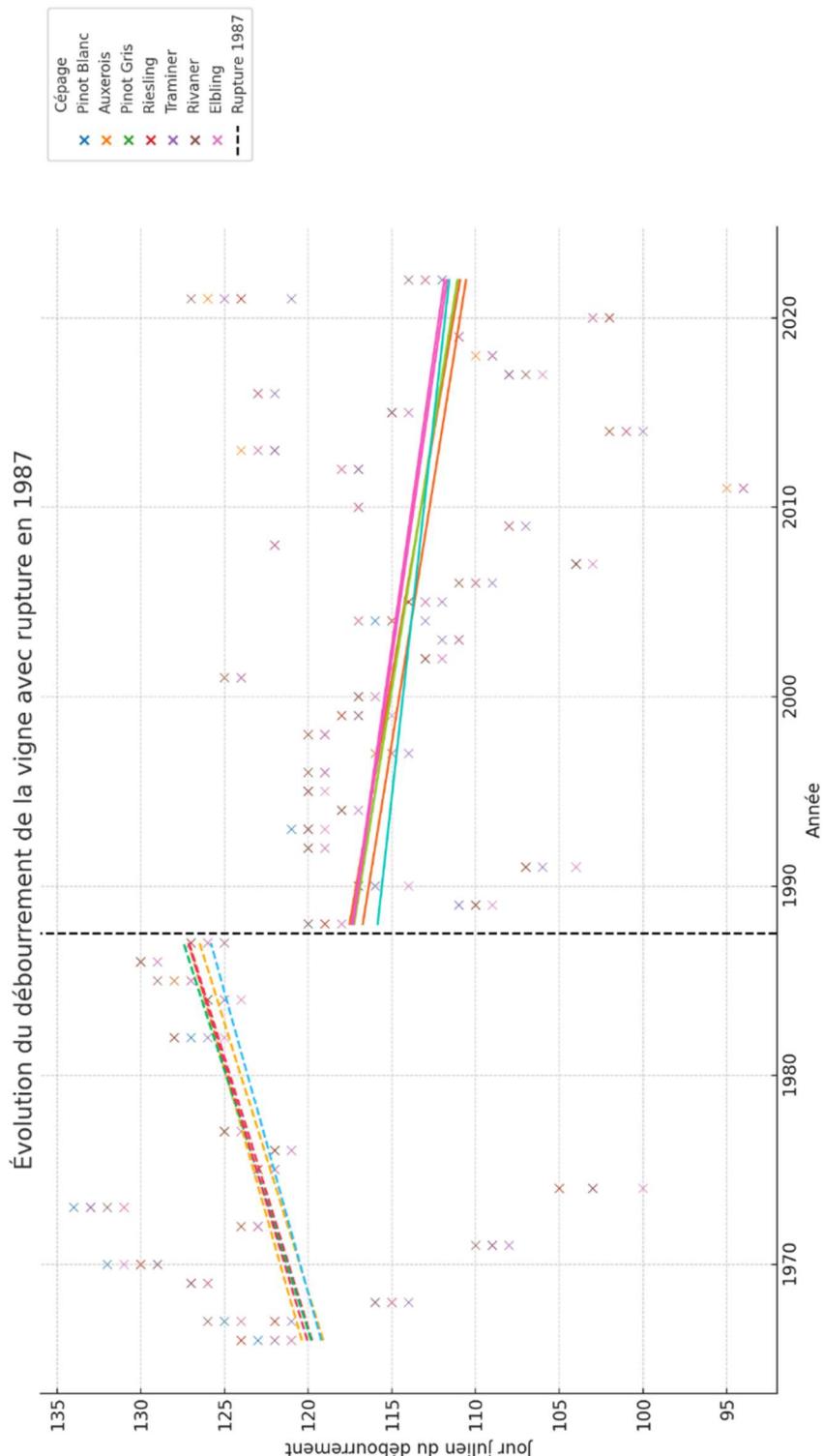


Figure 20: Evolution du débourrement des principaux cépages cultivés au Grand-Duché de Luxembourg entre 1966 et 2002 avec rupture en 1987 représentée en ligne noire discontinue. Pour chaque cépage, le jour indiqué est fait à partir d'une moyenne de toute la côte mosellane luxembourgeoise.

Les données brutes de débourrement des différents cépages sur la région viticole luxembourgeoise seront disponibles en annexe. Pour rappel, c'est une moyenne de débourrement de toute la zone. Puisque la date de débourrement subit une rupture, il faut aussi y chercher les deux fonctions appliquées.

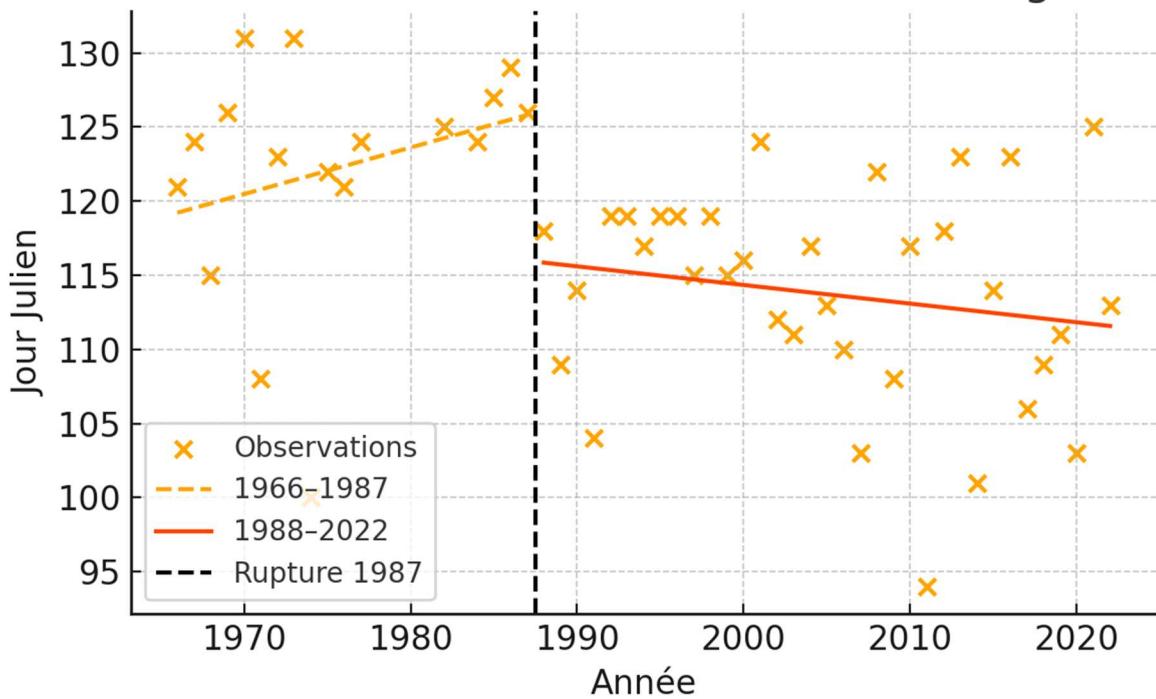
Cépage	Période	Pente	P valeur	R ²
Elbling	1966-1987	0,31	0,22	0,1
	1988-2022	-0,13	0,15	0,076
Rivaner	1966-1987	0,34	0,22	0,1
	1988-2022	-0,16	0,09	0,055
Pinot Blanc	1966-1987	0,32	0,27	0,08
	1988-2022	-0,19	0,04	0,08
Auxerois	1966-1987	0,35	0,2	0,105
	1988-2022	-0,16	0,08	0,055
Pinot Gris	1966-1987	0,36	0,17	0,12
	1988-2022	-0,18	0,05	0,071
Riesling	1966-1987	0,28	0,17	0,12
	1988-2022	-0,18	0,05	0,071
Traminer	1966-1987	0,35	0,2	0,107
	1988-2022	-0,18	0,04	0,074

Tableau 5: Pente, p valeur et R² de la régression linéaire des différents cépages entre 1966 et 2022 avec rupture en 1987

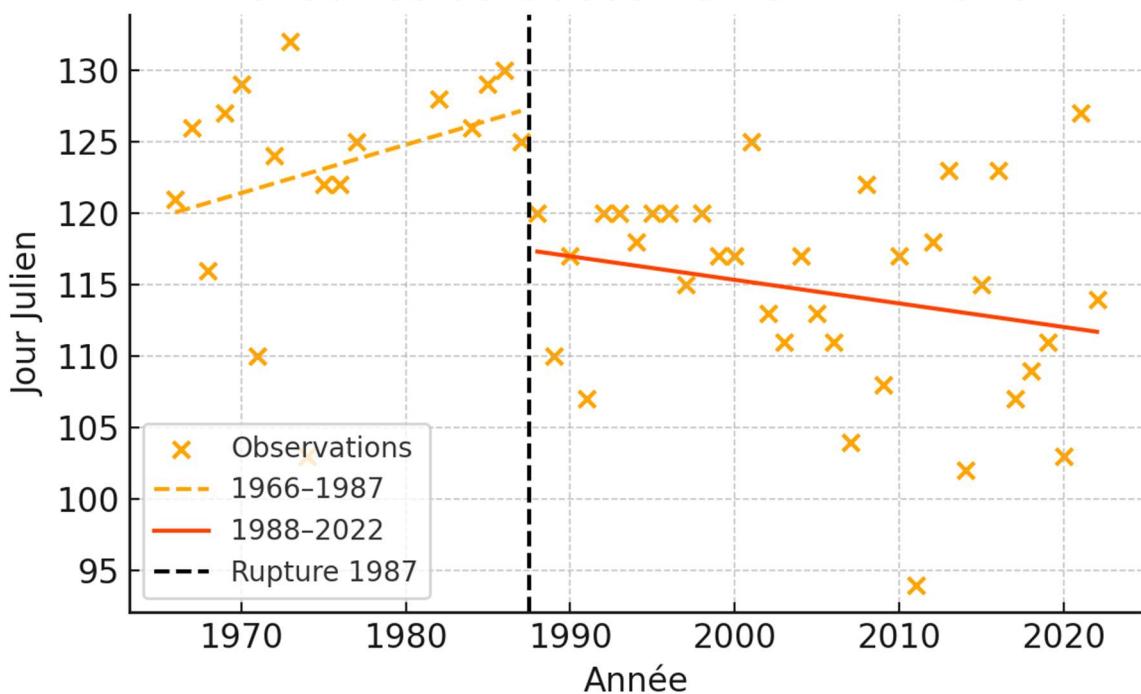
Les régressions linéaires appliquées aux dates de débourrement montrent une tendance générale à l'avance du débourrement pour l'ensemble des cépages. Toutefois, en raison de la variabilité importante, de la taille réduite des échantillons et des R² faibles, ces tendances ne sont pas toujours statistiquement significatives. Ces résultats suggèrent un signal climatique cohérent mais statistiquement fragile, qui doit être renforcé par une modélisation plus complète (ex. : température effective, somme de températures...). C'est pourquoi les modèles ont été sélectionnés.

On voit sur la figure 20 qui reprend toutes les dates de débourrement pour les différents cépages, que celles-ci sont, dans le cas de la vallée de la Moselle, assez proches les unes des autres. Pour la suite des modélisations, une moyenne géométrique de débourrement annuel sera alors réalisée afin de ne pas « alourdir » le travail. La moyenne géométrique a été choisie car elle est moins dépendante des extrêmes. Dans notre cas où les données sont dans des régions où certains coteaux peuvent abriter un cépage particulier qui réagit différemment des autres, cette moyenne présente un certain « pouvoir tampon ». Certains coteaux peuvent abriter des cépages particuliers, qui réagissent différemment en fonction de leur exposition au soleil, de leur altitude ou de leur microclimat. Ces cépages peuvent donc présenter des comportements phénologiques très variés, avec des réponses plus sensibles aux fluctuations climatiques, comme les périodes de gelées tardives ou les pics de chaleur.

Tendance du débourement - Elbling



Tendance du débourement - Rivaner



Tendance du débourrement - Traminer

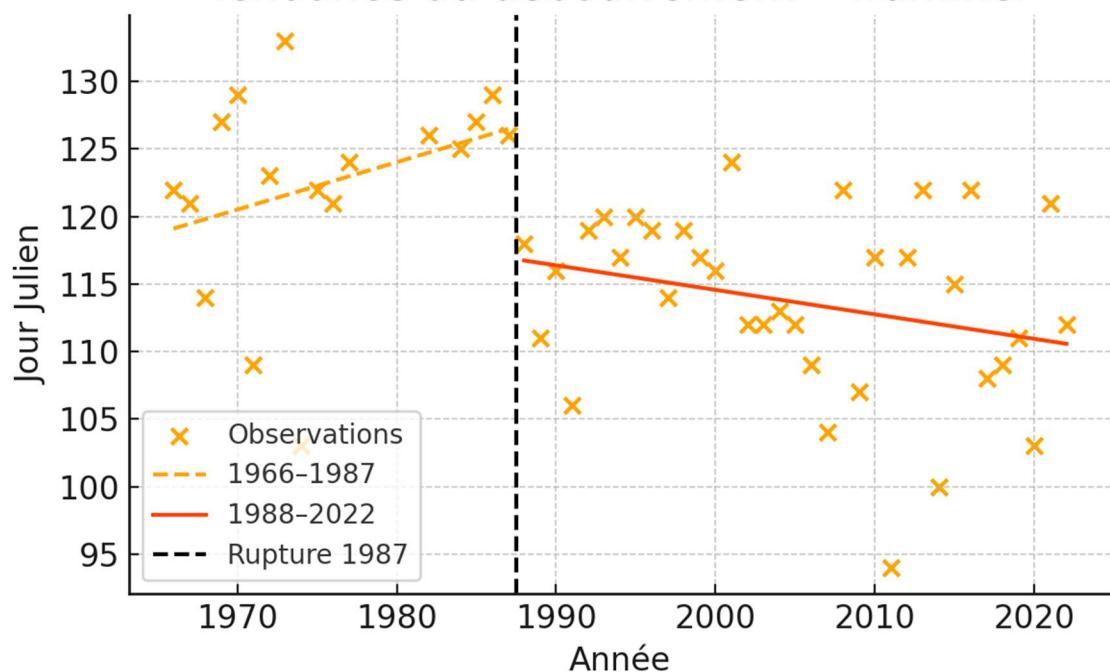


Figure 23: Débourrement du Traminer avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue

Tendance du débourrement - Riesling

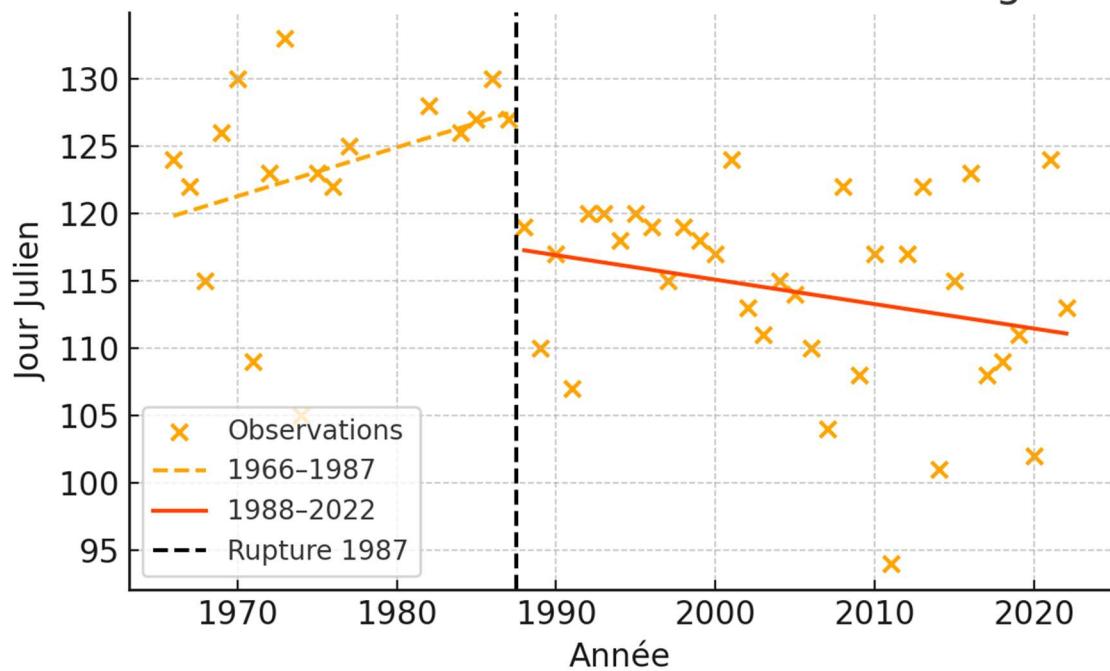


Figure 24: Débourrement du Riesling avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue

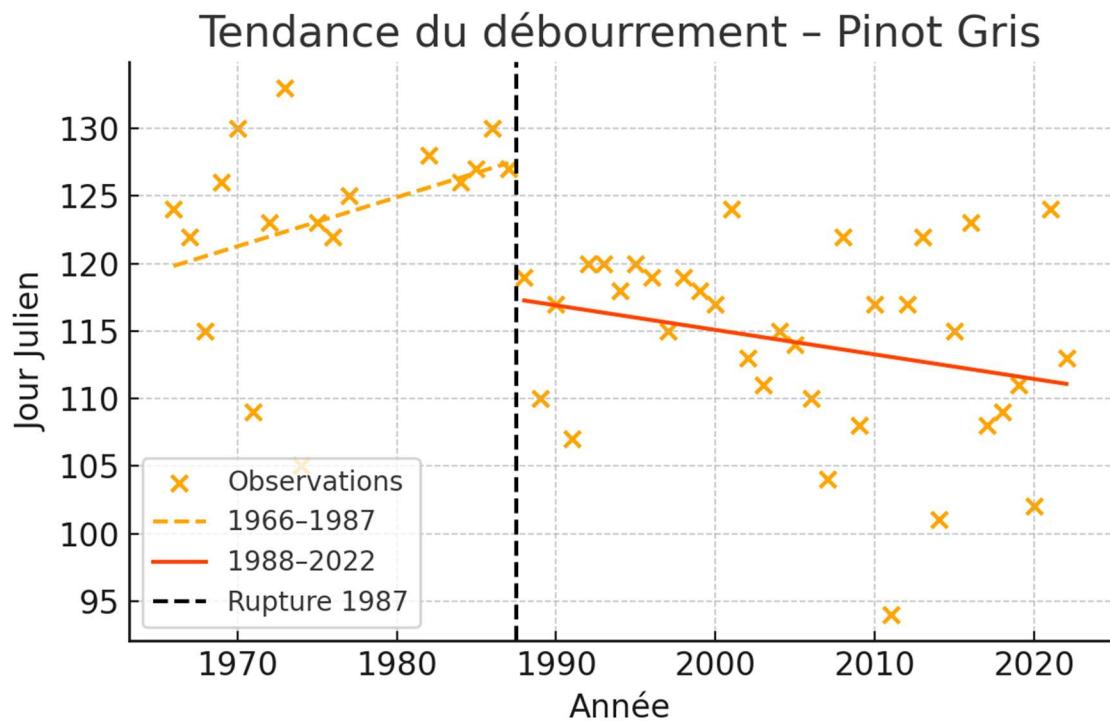


Figure 25: Débourrement du Pinot Gris avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue

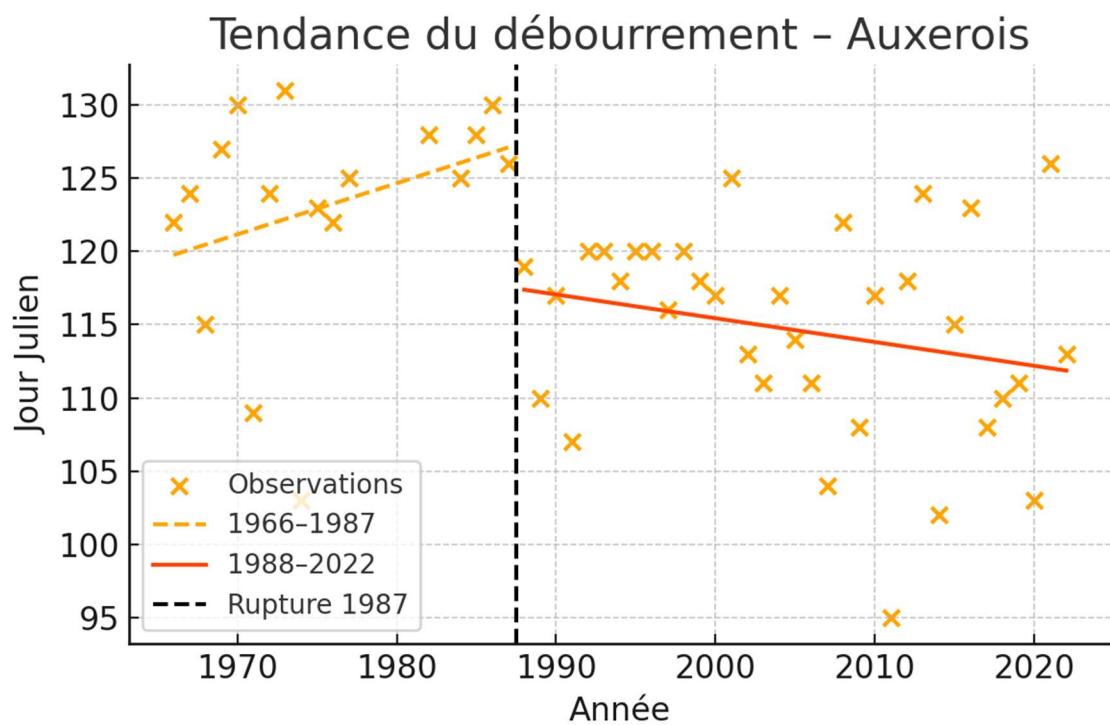


Figure 26: Débourrement de l'Auxerois avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue

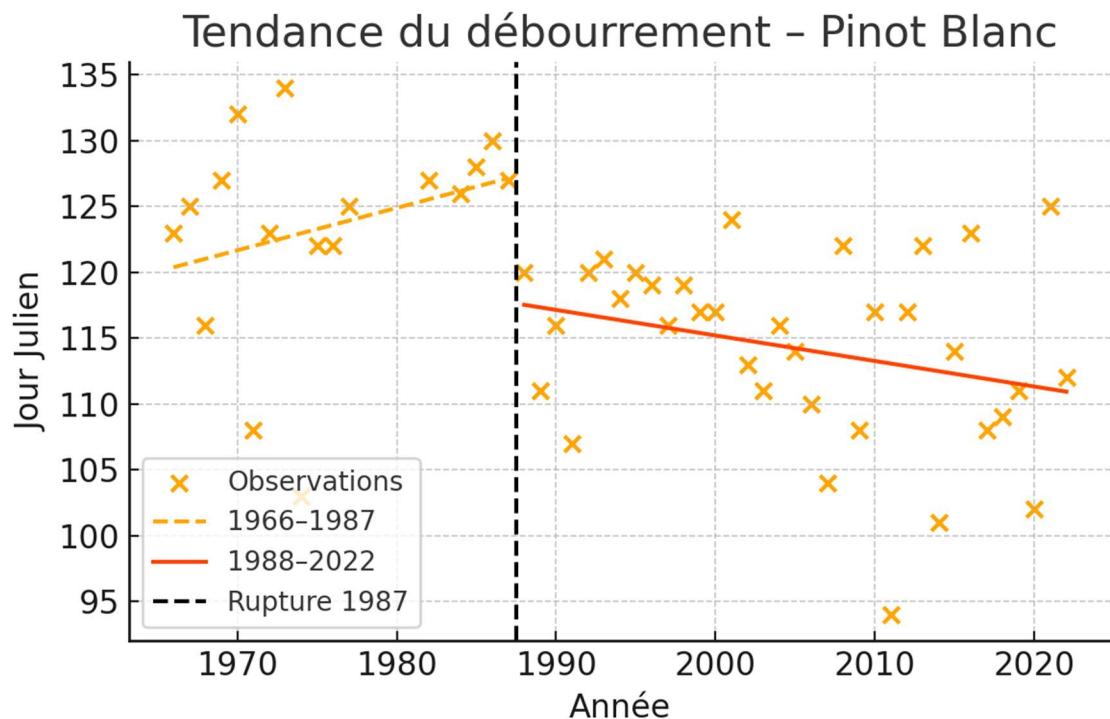


Figure 27: Débourrement du Pinot Blanc avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue

B. Modèle 1

1. Remich

Pour rappel, parmi les cépages présents dans la vallée de la Moselle au Luxembourg, la chaîne de modélisation SUWE de (Morales-Castilla, et al., 2020) ne proposait que des simulations avec F^* et C^* pour le Riesling.

Pour ce cépage, le seuil C^* proposé par l'auteur est de 185,38 et le seuil F^* de 14,08.

En calculant le RMSE de Remich, on obtient 13,11. Le biais vaut -6,8.

Cela signifie, que le modèle est précis à 13,11 jours et prédit généralement la date trop tôt de 6,8 jours.

Comme expliqué dans la partie traitant des matériels et méthode, il a été décidé d'appliquer la fonction « differential evolution » afin d'améliorer la simulation du jour de débourrement du Riesling et déterminer des seuils pour les autres cépages. En comparant les dates de débourrement réelles de chaque cépage avec les seuils C^* et F^* journaliers, la fonction a calculé les résultats optimaux suivant pour le modèle régional basés sur les villages de Remich et Grevenmacher :

Riesling	
C^* optimal	187.13 chilling units
F^* optimal	18.13 forcing units
Elbling	
C^* optimal	191.67 chilling units
F^* optimal	17.07 forcing units
Rivaner	
C^* optimal	189.69 chilling units
F^* optimal	17.62 forcing units
Auxerrois	
C^* optimal	189.44 chilling units
F^* optimal	17.59 forcing units
Pinot blanc	
C^* optimal	189.77 chilling units
F^* optimal	17.62 forcing units
Pinot gris	
C^* optimal	191.67 chilling units
F^* optimal	17.16 forcing units
Traminer	
C^* optimal	196.54 chilling units
F^* optimal	16.48 forcing units
Débourrement moyen	
C^* optimal	198.62 chilling units
F^* optimal	16.27 forcing units

Tableau 6: résultat des C^* et F^* obtenus avec la fonction differential_evolution depuis les données de Remich et de Grevenmacher

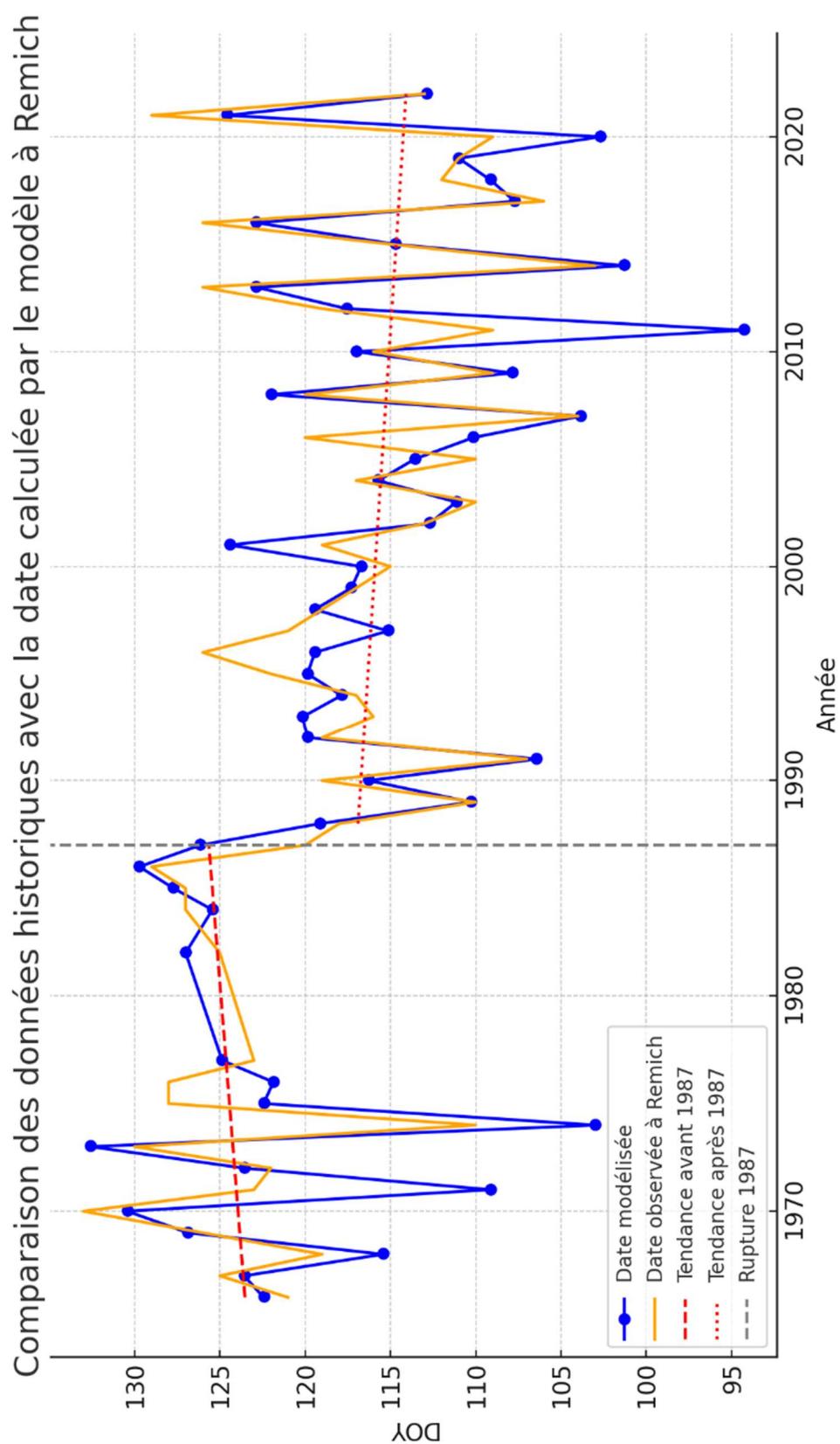


Figure 28: Comparaison entre le jour de débourrement moyen de tous les cépages simulés par la chaîne de modélisation SUWE et les données de terrain à Remich avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.

Graphique des résidus - Remich (RMSE = 4.31)

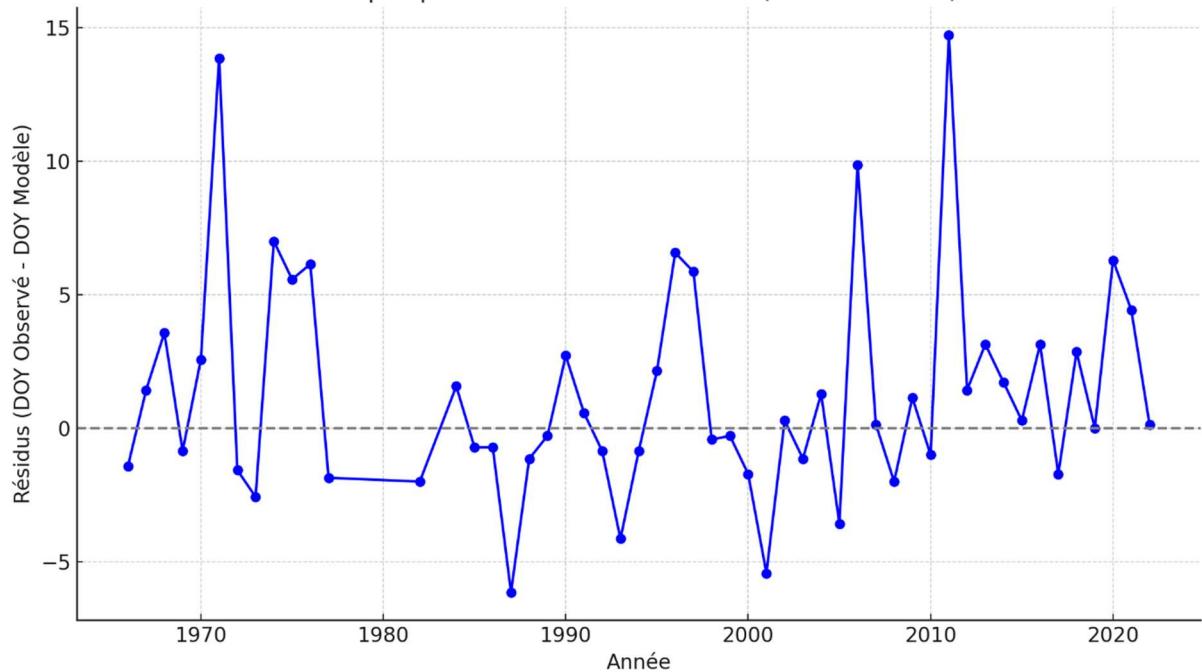


Figure 29: Résidus de la différence entre les valeurs prédites et observées entre 1966 et 2022 avec la chaîne de modélisation SUWE dans la région de Remich avec un RMSE calculé de 4,31 jours. La ligne de résidus représentant le 0 est représentée en gris discontinu.

On voit ici que les résidus varient autour du 0 dans beaucoup de cas, bien qu'ayant encore quelques erreurs fortes (10-14 jours). Globalement, le modèle reste assez stable sur la période.

Le tableau est le résultat de la validation de 2006 à 2022, après l'utilisation de la fonction « differential evolution ».

R ²	0,62
p-valeur	2,6.10 ⁻⁵
RMSE	5,1
EF	0,616
Biais moyen	2,3

Tableau 7: Résumé des statistiques explicatives de la chaîne de modélisation SUWE après calibration pour Remich

2. Grevenmacher

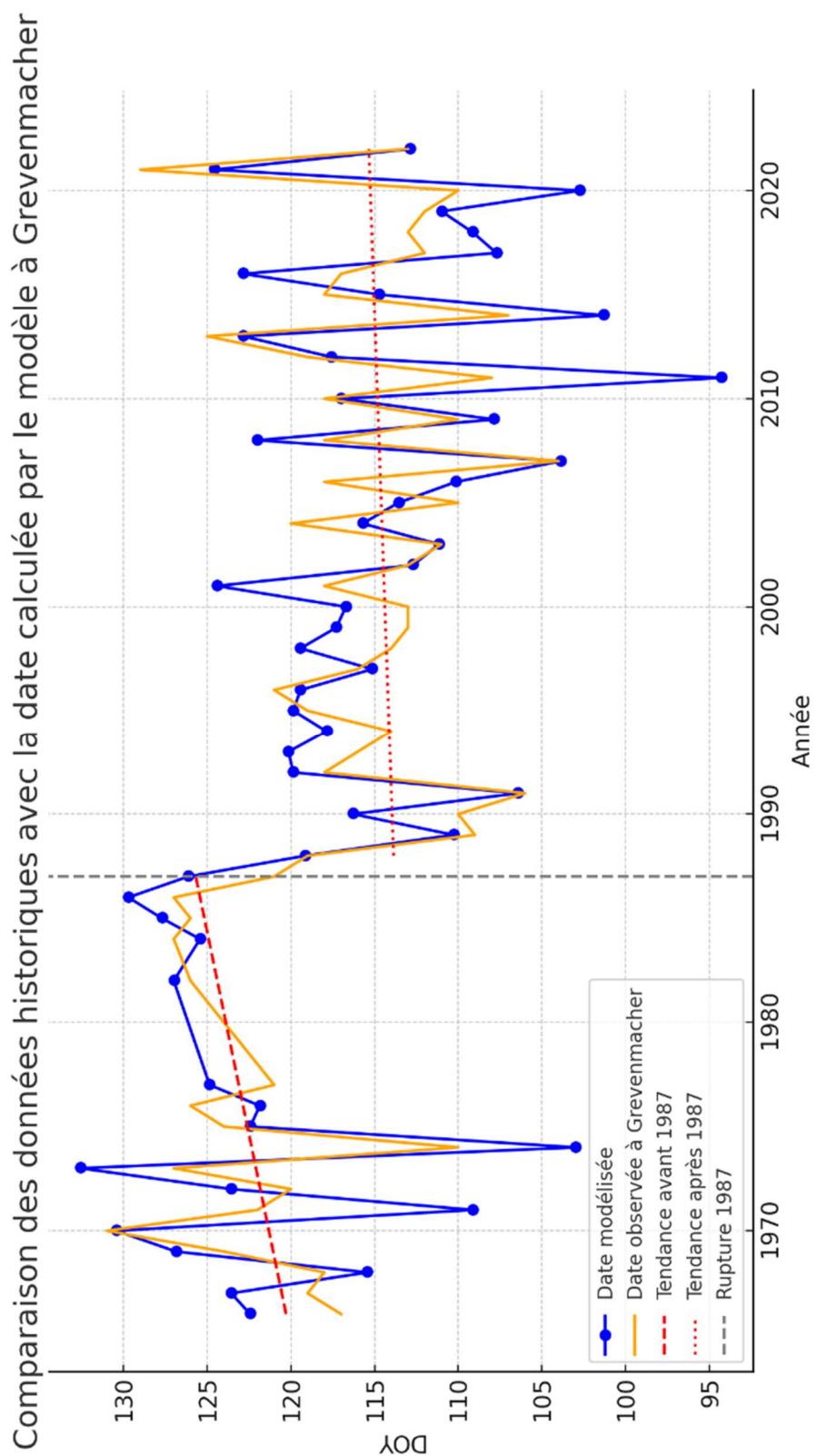


Figure 30: Comparaison entre le jour de débourrement moyen de tous les cépages simulés par la chaîne de modélisation SUWE et les données de terrain à Grevenmacher avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.

Graphique des résidus - Grevenmacher (RMSE = 4.55)

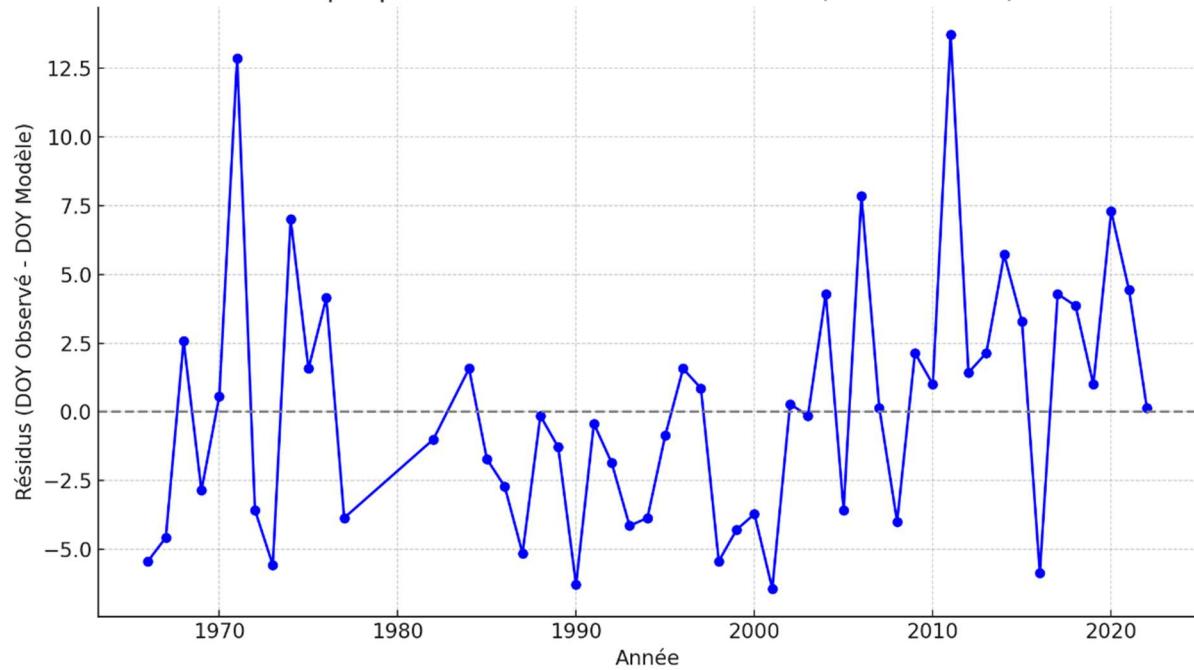


Figure 31: Résidus de la différence entre les valeurs prédites et observées entre 1966 et 2022 dans la région de Remich avec un RMSE calculé de 4,55 jours. La ligne de résidus représentant le 0 est représentée en gris discontinu.

R ²	0,63
P valeur	9,53.10 ⁻⁶
RMSE	5
EF	0,6
Biais moyen	2,6

Tableau 8: Résumé des statistiques explicatives de la chaîne de modélisation SUWE à Grevenmacher

Les dates de débourrement pour chaque cépages à Remich et Grevenmacher seront disponibles en annexe.

3. Comparaison avec les données initiales

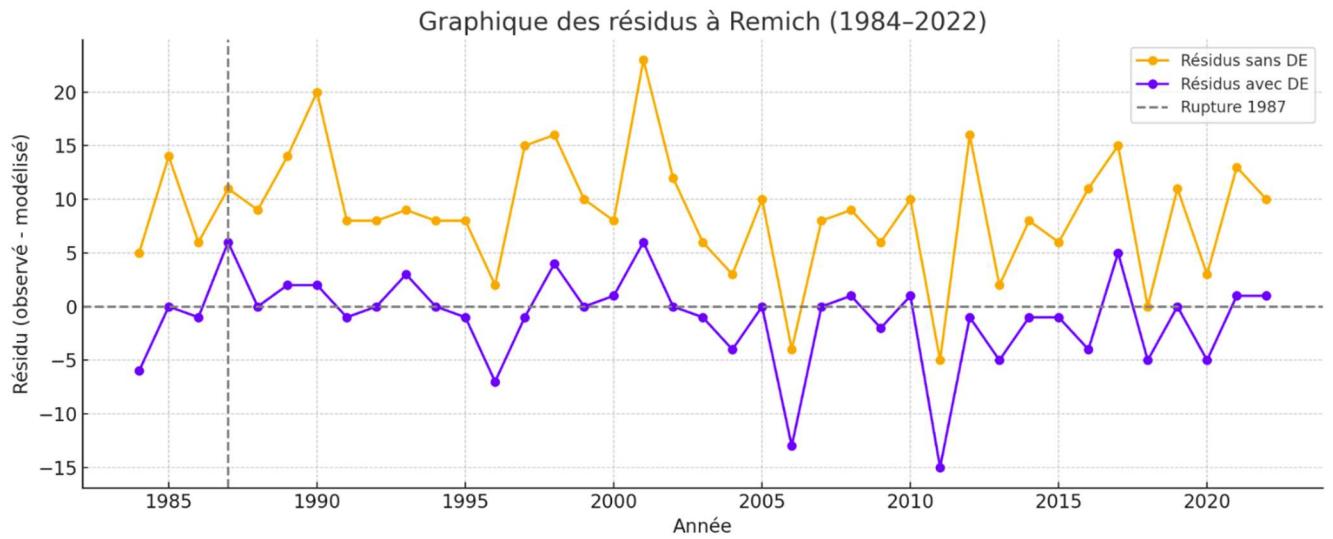


Figure 32: Graphe de comparaison entre les résidus avant et après l'application de la fonction "differential evolution" dans la zone de Remich entre 1984 et 2022.

Cette partie sera consacrée à la comparaison entre le modèle simulant le débourrement avant et après la fonction « differential evolution » et la réalité de terrain. Le modèle de (Morales-Castilla, et al., 2020) n'étant mis au point que pour le Riesling, ces comparaisons seront faites pour ce cépage uniquement.

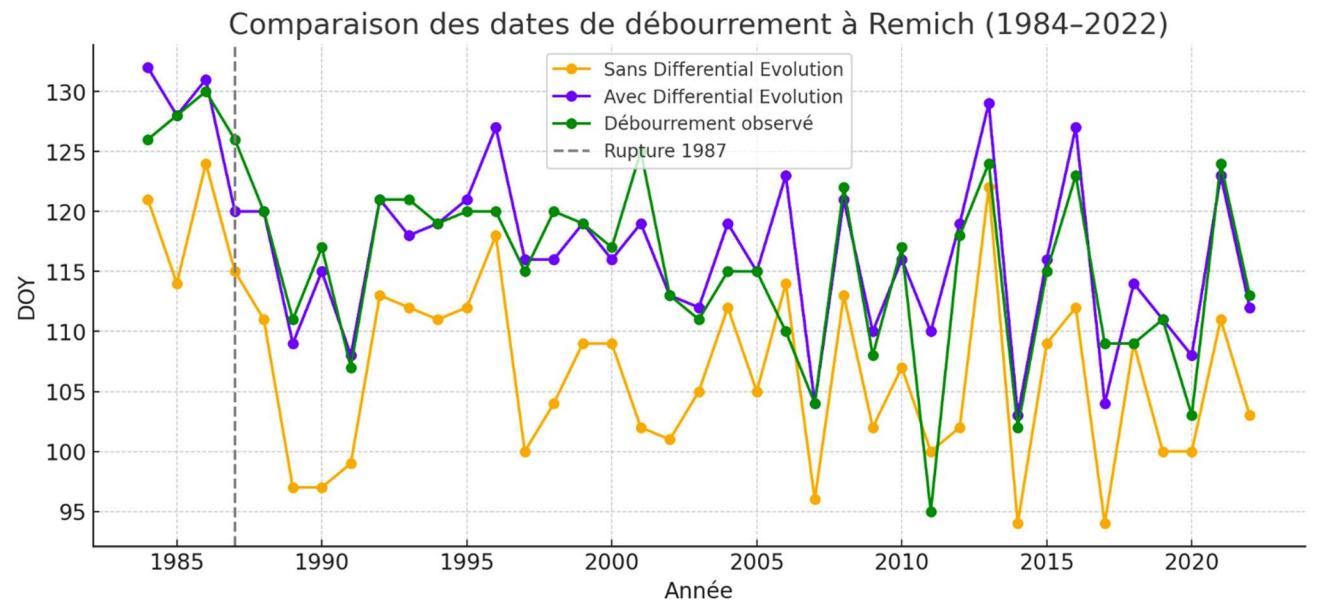


Figure 33: Comparaison entre les dates de débourrement calculés par la chaîne de modélisation SUWE avec et sans la fonction "differential evolution" et la moyenne des dates de débourrement observées sur toute Zone de Remich.

Le modèle avec la fonction « differential evolution » suit beaucoup mieux les données observées. Les résidus du modèle optimisé sont également plus faibles et centrés traduisant un modèle plus fiable et avec moins d'erreurs de prédictions.

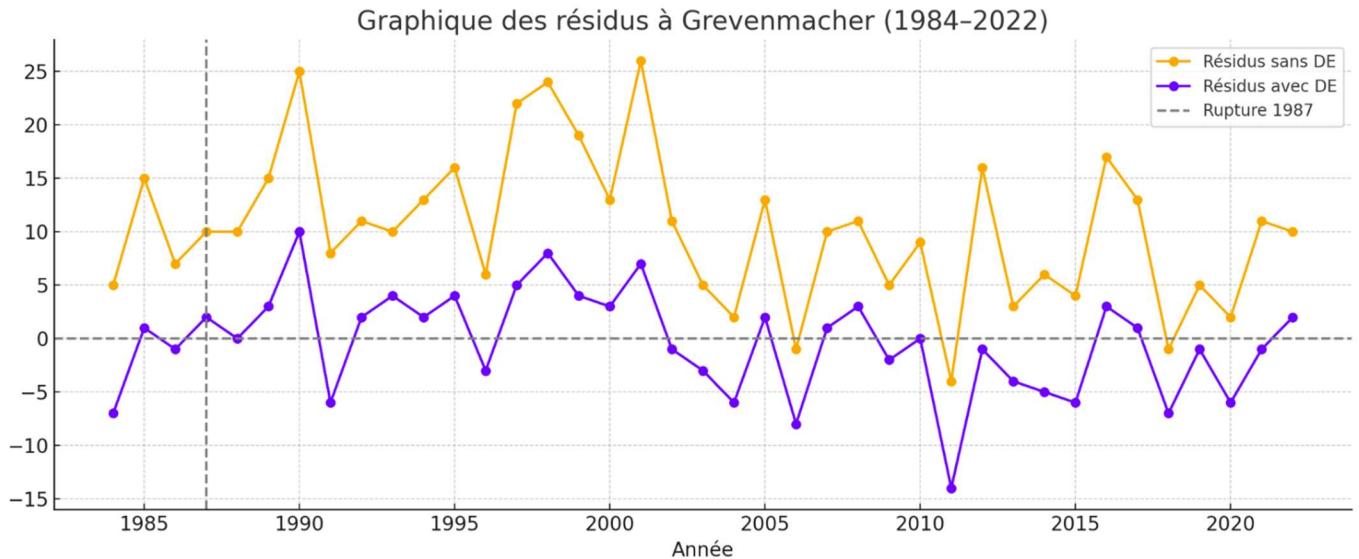


Figure 34: Graphe de comparaison entre les résidus avant et après l'application de la fonction "differential evolution" dans la zone de Grevenmacher entre 1984 et 2022.

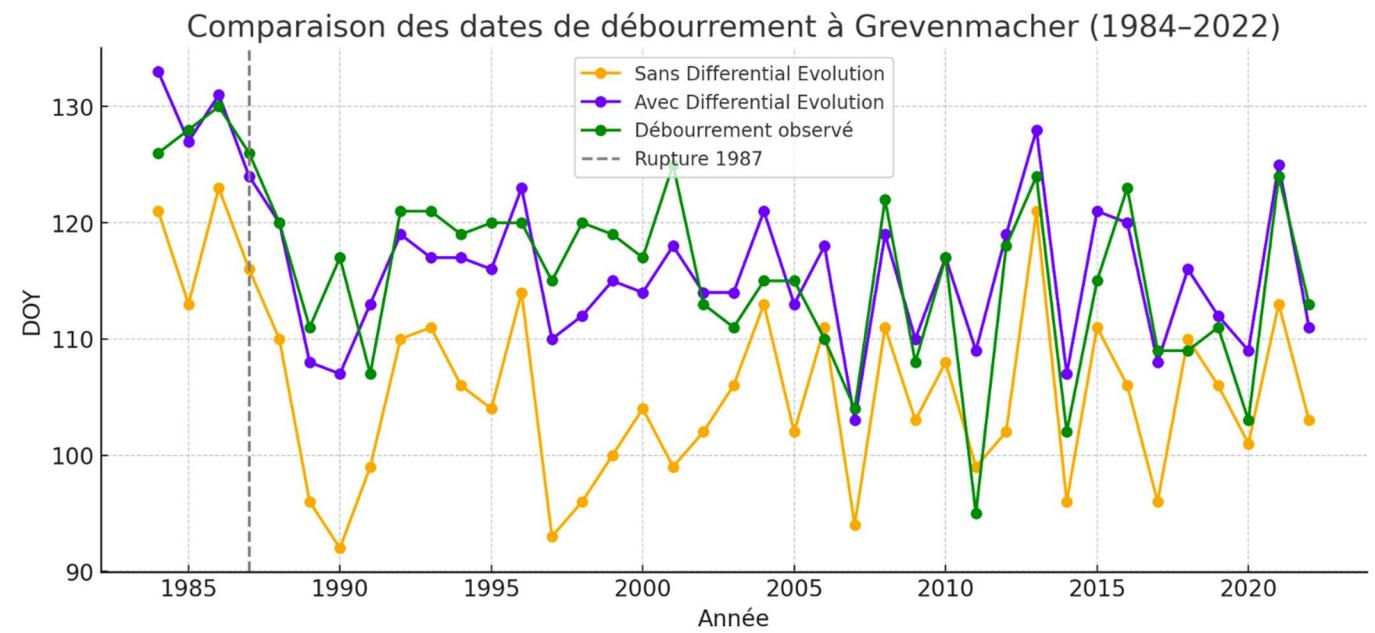


Figure 35: Comparaison entre les dates de débourement calculés par la chaîne de modélisation SUWE avec et sans la fonction "differential evolution" et la moyenne des dates de débourement observées sur toute Zone de Grevenmacher avec rupture en 1987 représentée par une ligne grise discontinue

La comparaison avant et après l'utilisation de la fonction « differential evolution » montre à quel point les résultats sont plus fiables pour les deux zones étudiées. Le modèle sans optimisation à tendance à prédire la date de débourement de façon trop précoce et ce systématiquement. A l'inverse, le modèle optimisé offre des prédictions beaucoup plus proche de la réalité de terrain, avec des résidus centrés autour de 0.

C. Modèle 2

Les variables d'entrée qui sont retenues sont celles qui sont à la fois statistiquement et biologiquement les plus correctes (cfr. Partie B. 2. Débourement).

Comme expliqué dans la partie théorique, pour réaliser ce modèle, la fonction « Stepwise forward selection and backward elimination » a été utilisée. Elle nous fournit les meilleures variables qui, mise ensemble permettent de créer un modèle statistiquement solide. Le modèle retenu est le 58^{ème} de la liste avec pour les deux régions : un R² moyen de 0,808 et un VIF de 1,15. Le modèle global a été choisi en analysant une période de 1984 à 2022.

Il comprend ce qui a déjà été décrit dans la partie théorique à savoir :

- Le nombre de jours sous les 0°C de Janvier à Avril (FD1-4)
- Les températures moyennes entre Mars et Avril (Tmoy3-4)
- Les températures moyennes entre Septembre et Novembre de l'année précédente (Tmax9-11).

Afin de calibrer ce modèle de prédiction de jour de débourement, la méthode de validation croisée « Leave-One-Year-Out » (LOYO) a été utilisée. Elle consiste à :

- Retirer une année du jeu de données
- Ajuster le modèle sur toutes les autres années restantes
- Prédire les valeurs de l'année exclue

L'opération est répétée pour chaque année entre 1984 et 2022, sur les deux localités (à la fois Remich et Grevenmacher). A l'issue de ce processus, les prédictions pour chaque année sont comparées aux valeurs observées, et les indicateurs globaux sont calculés.

Grace à ces indicateurs, on peut par la suite déterminer la meilleure équation qui est :

$$DOY^7 = 181,16 - (0,006.FD1 - 4) - (5,635.Tmoy3 - 4) - (1,316.Tmax9 - 11)$$

En analysant le modèle sur les données historiques, on peut remarquer que :

a) *Remich*

R ²	0,79
RMSE	3,54 jours
EF	0,788
Biais moyen	-0,08
p valeur	4.10 ⁻¹²
VIF	1,4
Normalité des résidus	0,038
Hétéroscédasticité	0,26
Cook's Distance	0,24

Tableau 9: Tableau récapitulatif des résultats statistiques du modèle 2 sur la région de Remich

⁷ « Day of year », correspondant à la date de débourement en jours julien

La normalité des résidus est un peu faible. Cela signifie que les résidus ne suivent pas parfaitement une loi normale. Cela peut provenir de valeurs extrêmes.

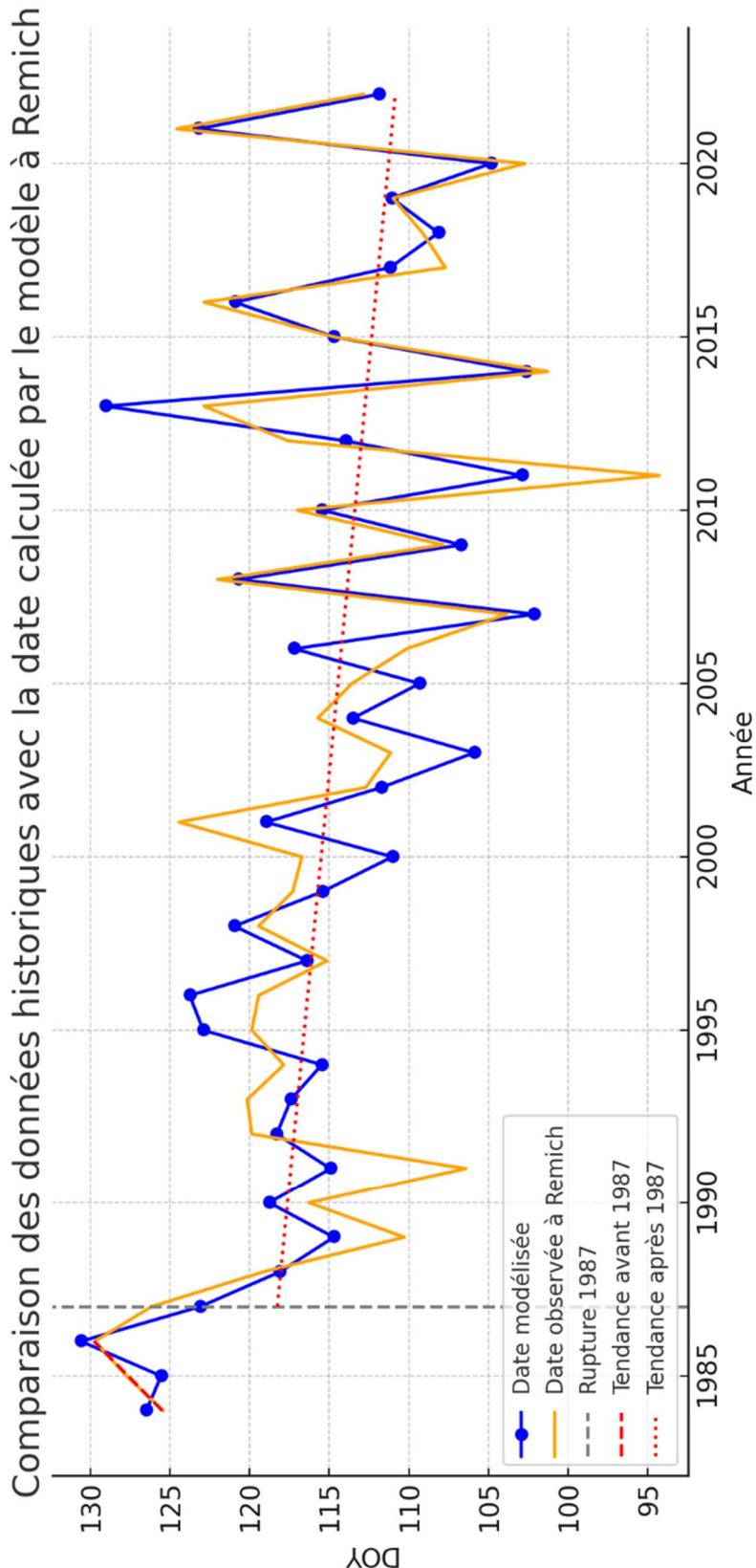


Figure 36: Comparaison entre le jour de débourrement moyen de tous les cépages simulés par la modélisation linéaire et les données de terrain à Remich avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.

La régression commence en 1984 car les données de températures maximales Tmax ne sont pas disponibles avant.

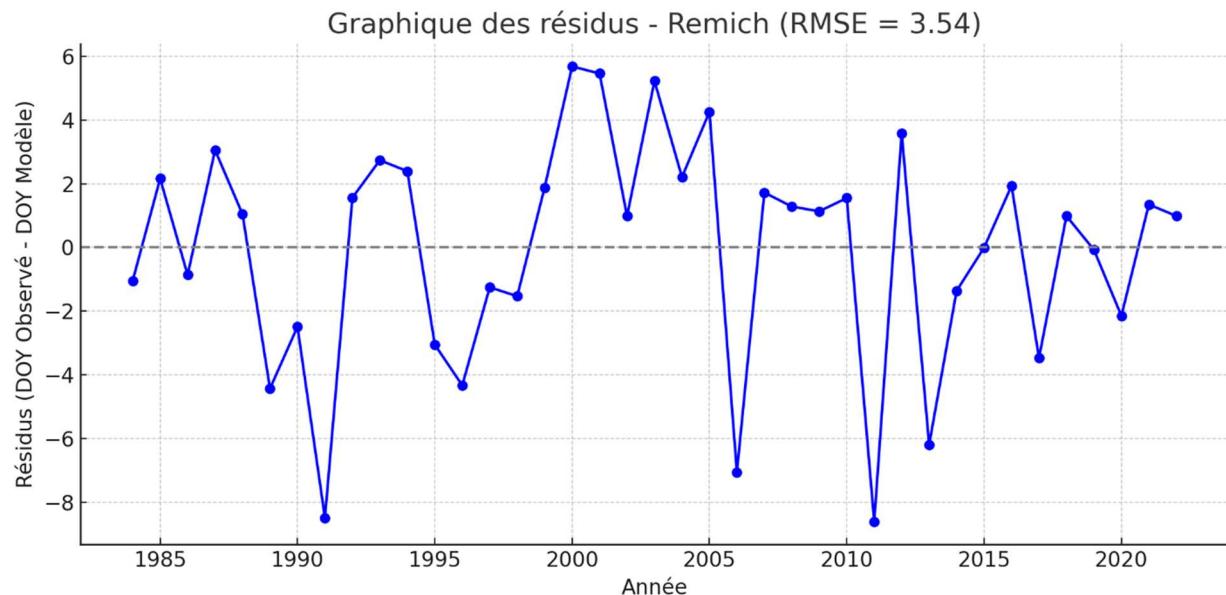


Figure 37: Résidus de la différence entre les valeurs prédites et observées entre 1966 et 2022 avec la modélisation linéaire dans la région de Remich avec un RMSE calculé de 4,31 jours. La ligne de résidus représentant le 0 est représentée en gris discontinu.

b) Grevenmacher

R ²	0,73
RMSE	4 jours
EF	0,729
Biais moyen	0,11 jours
p valeur	3,3.10 ⁻¹⁰
VIF	1,32
Normalité des résidus	0,31
Hétéroscédasticité	0,067
Cook's Distance	2,28

Tableau 10: Tableau récapitulatif des résultats statistiques du modèle 2 sur la région de Grevenmacher

La Cook's Distance étant élevée, cela peut indiquer au moins un point potentiellement influent sur les coefficient. Cela peut être dû à une année avec un comportement atypique.

Comparaison des données historiques avec la date calculée par le modèle à Grevenmacher

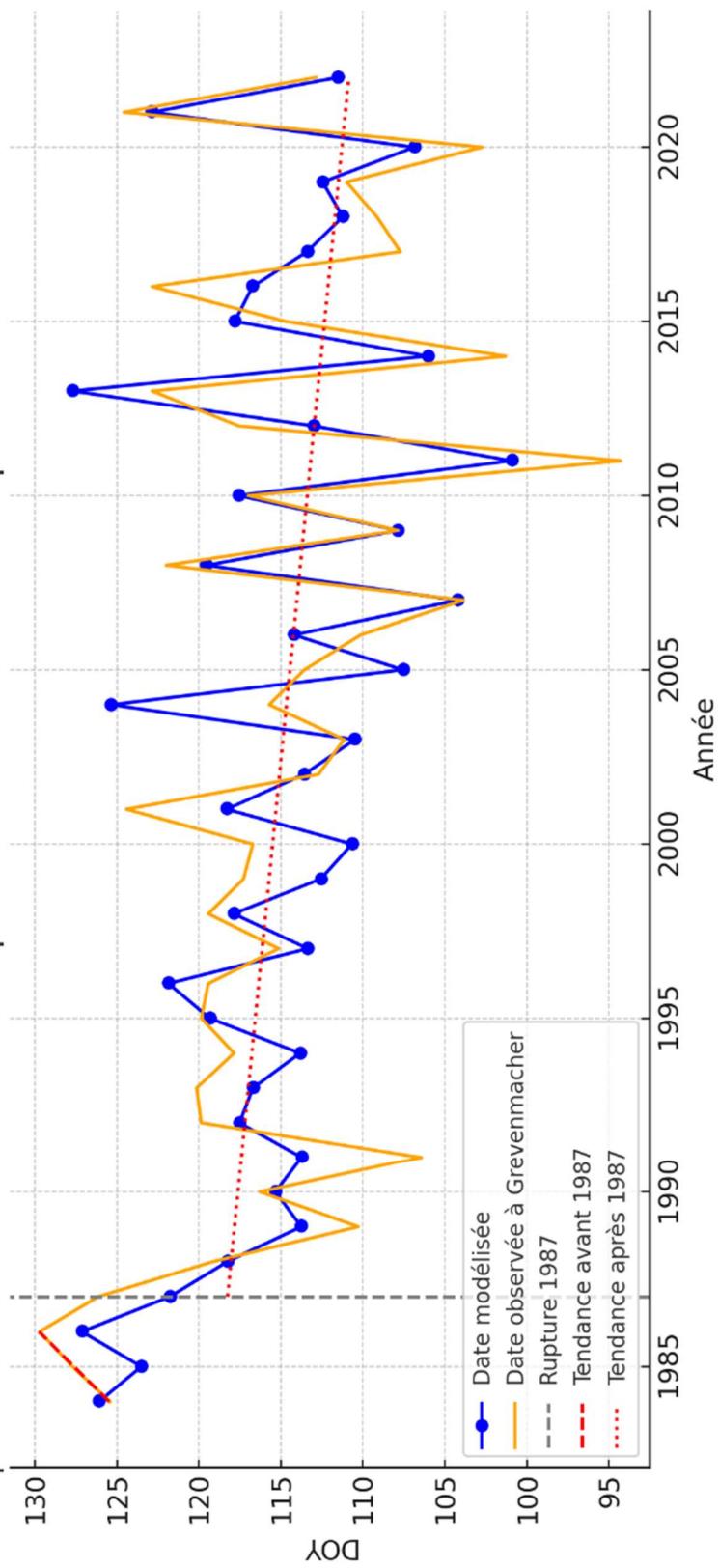


Figure 38: Comparaison entre le jour de débourrement moyen de tous les cépages simulés par la modélisation linéaire et les données de terrain à Grevenmacher avec rupture en 1987 représentée par une ligne noire discontinue.

Graphique des résidus - Grevenmacher (RMSE = 4.00)

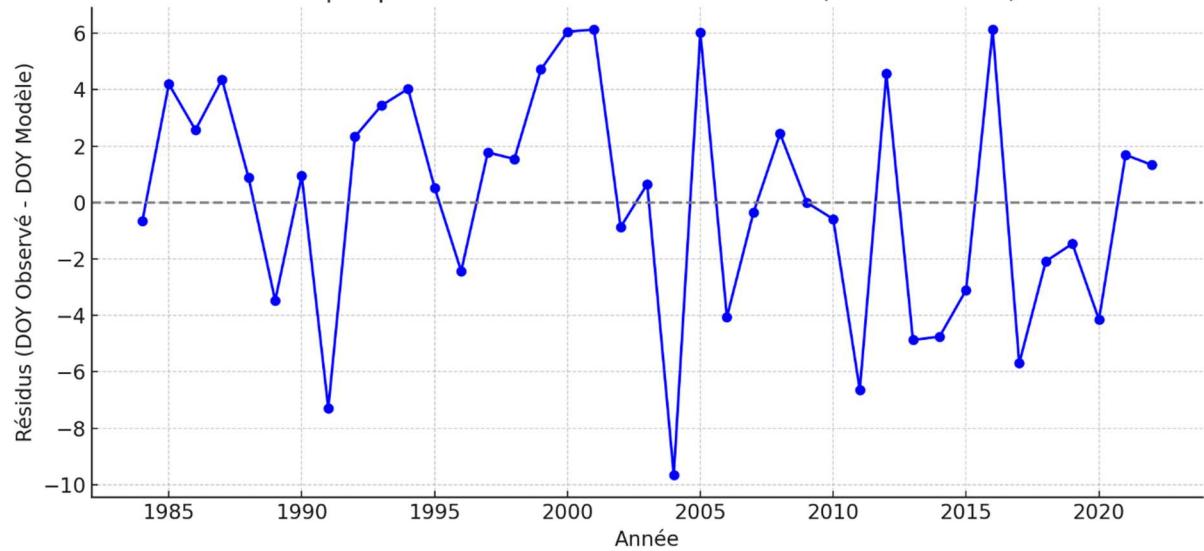


Figure 39: Résidus de la différence entre les valeurs prédites et observées entre 1966 et 2022 avec la modélisation linéaire dans la région de Grevenmacher avec un RMSE calculé de 4 jours. La ligne de résidus représentée le 0 est représentée en gris discontinu.

D. Gelées tardives

Concernant la période de gelées tardives la période étudiée est de 1979 à 2022. Il a été remarqué que les températures minimales subissent une rupture statistique en 2005.

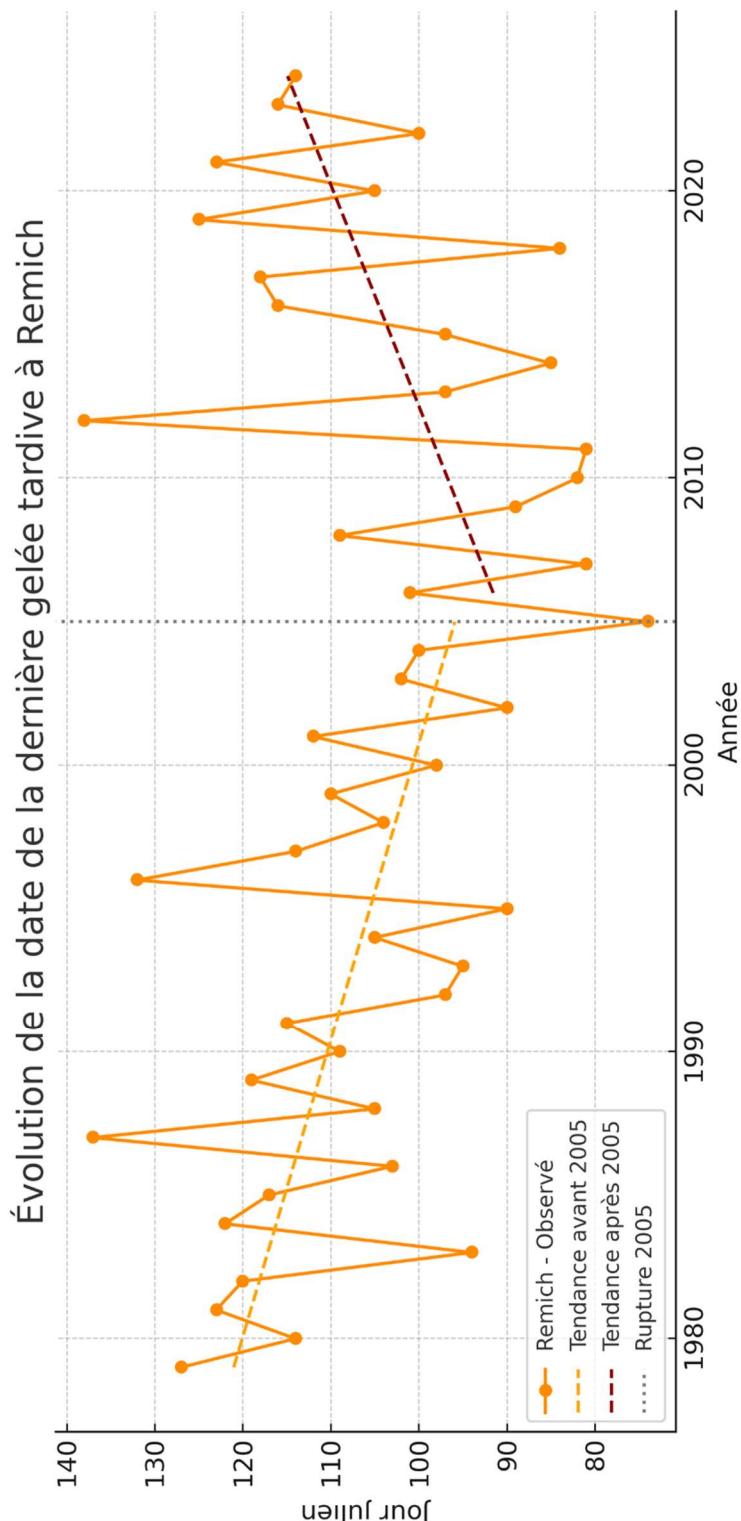


Figure 40: Evolution de la date de la dernière gelée tardive à Remich entre 1978 et 2022 avec rupture statistique en 2005. La p-valeur avant 2005 = 0,0036 et la pente = -0,97. La p-valeur après 2005 = 0,066 et la pente = 1,3.

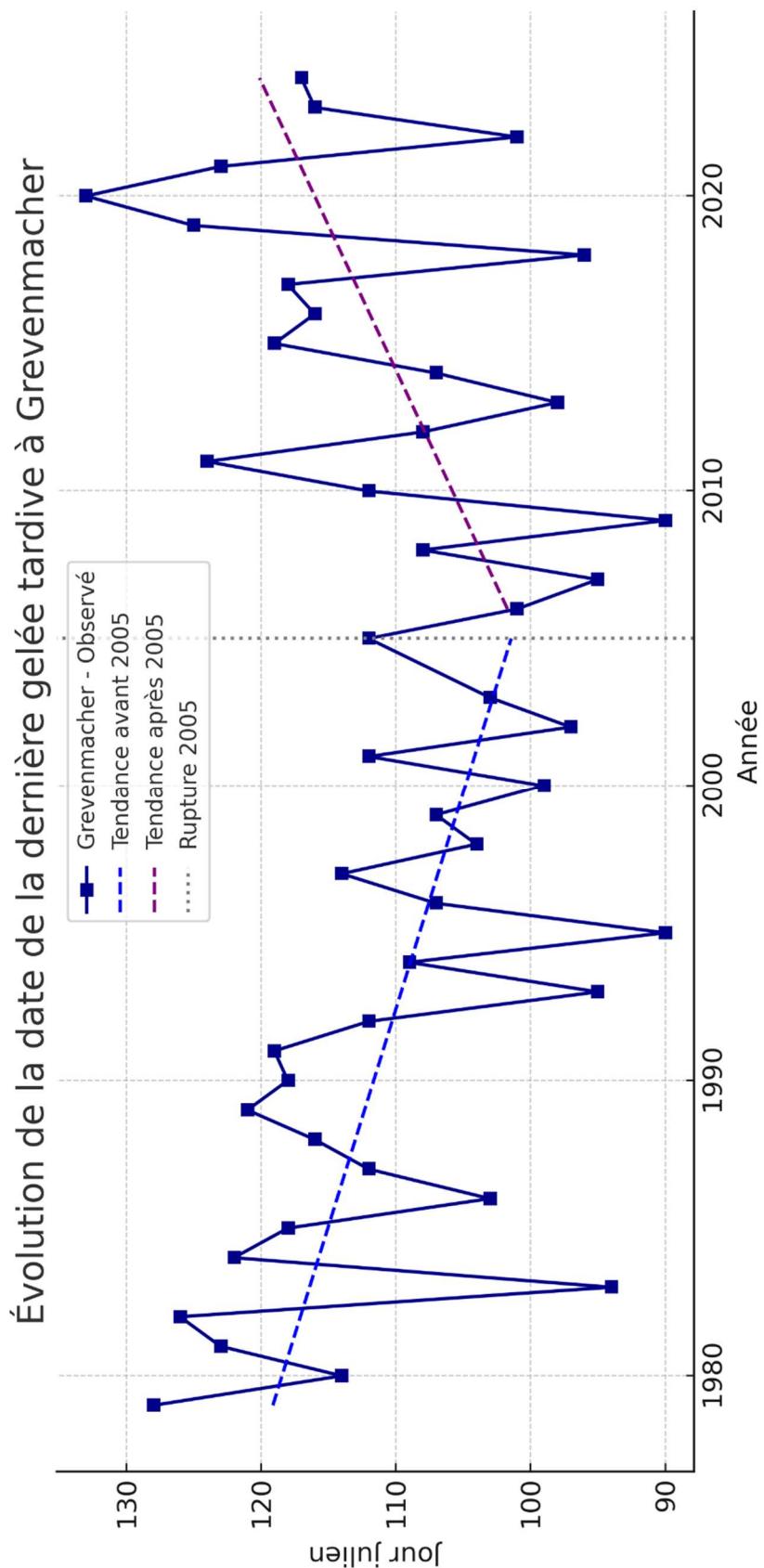


Figure 41: Evolution de la date de la dernière gelée tardive à Grevenmacher entre 1978 et 2022 avec rupture statistique en 2005. La p -valeur avant 2005 = 0,0074 et la pente = -0,68. La p -valeur après 2005 = 0,035 et la pente = 1,02.

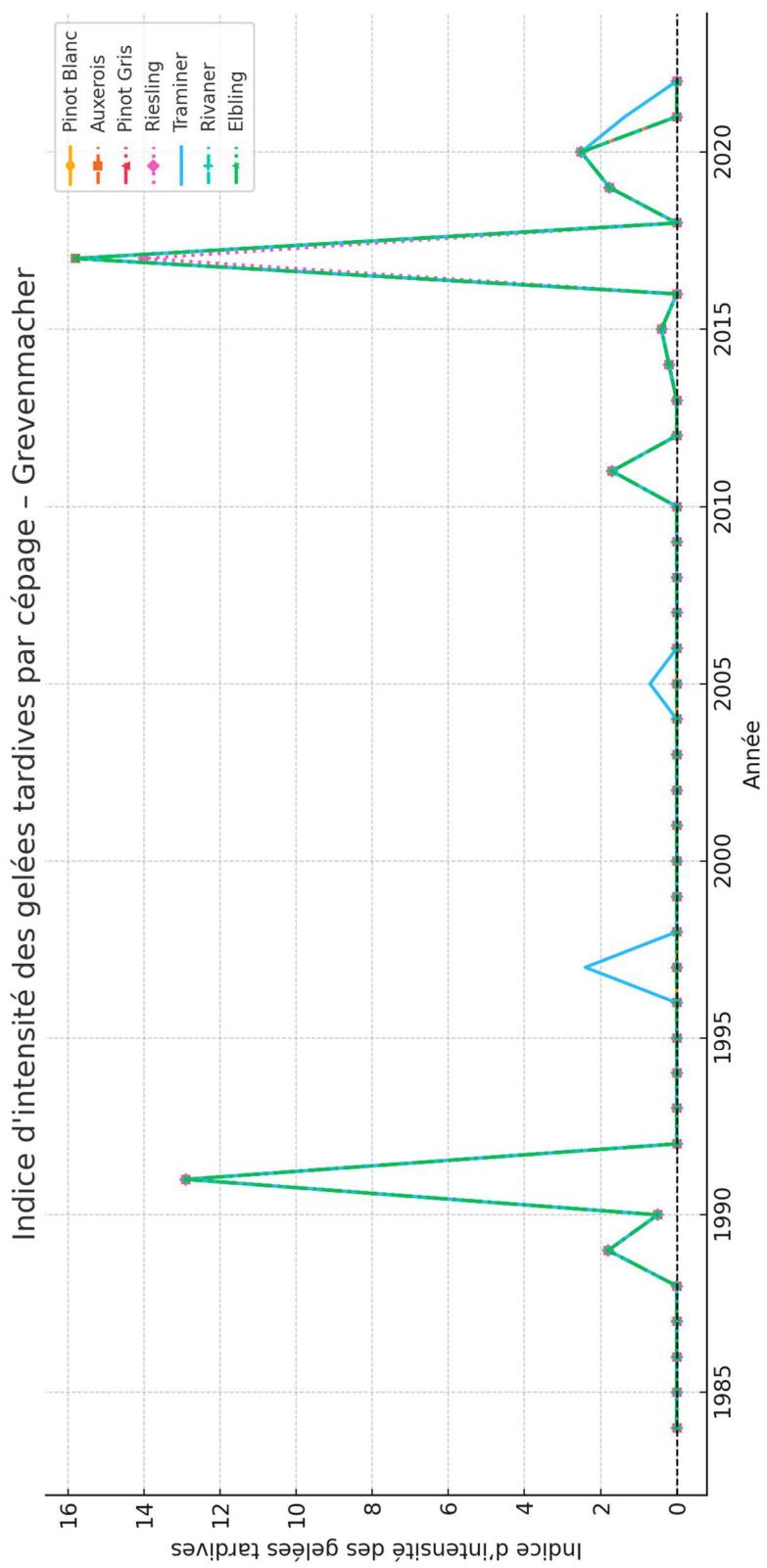


Figure 42: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement de tous les cépages jusqu'au 31 janvier de l'année en cours entre 1984 et 2022 à Grevenmacher.

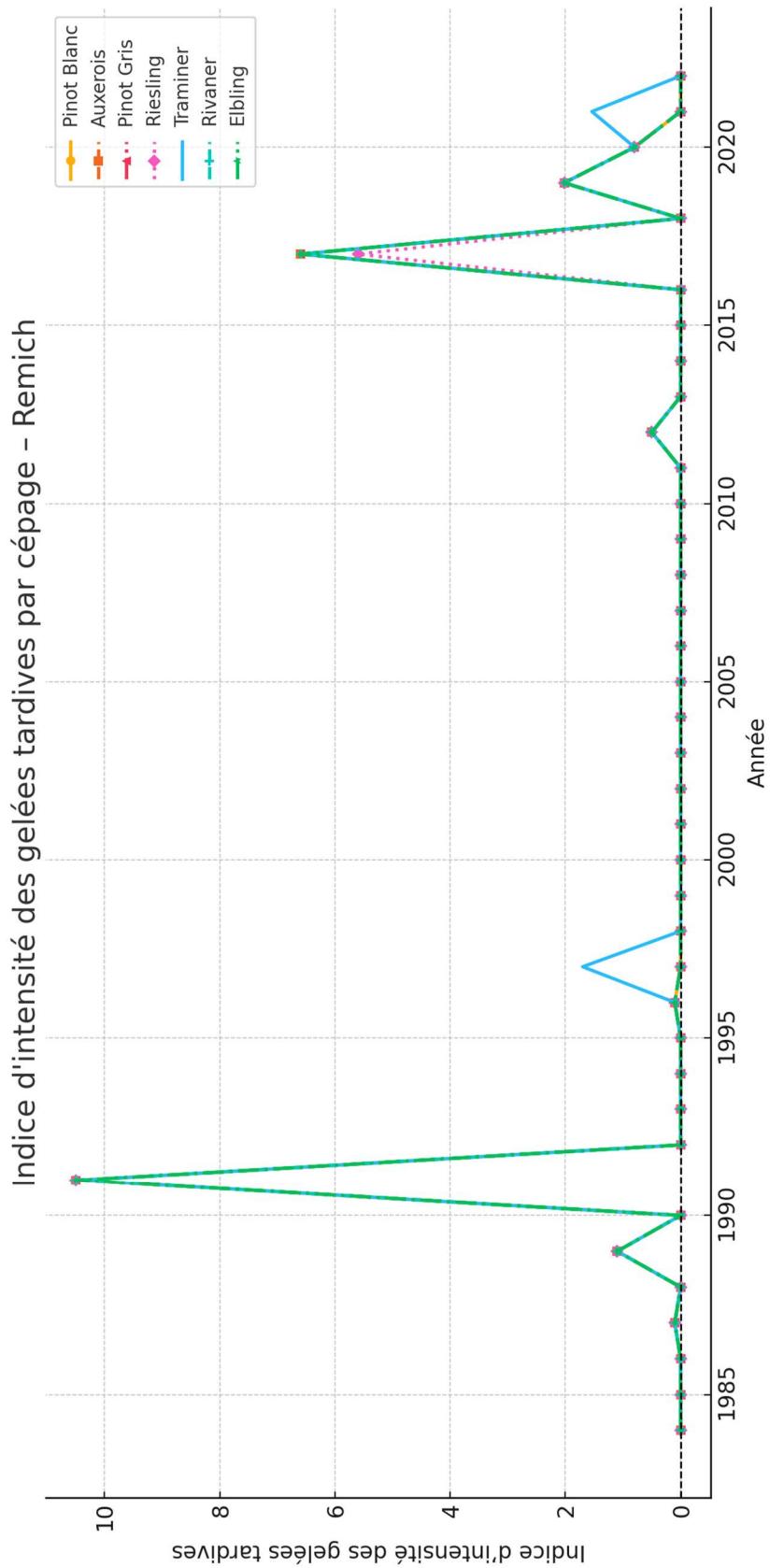


Figure 43: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement de tous les cépages jusqu'au 31 janvier de l'année en cours entre 1984 et 2022 à Remich.

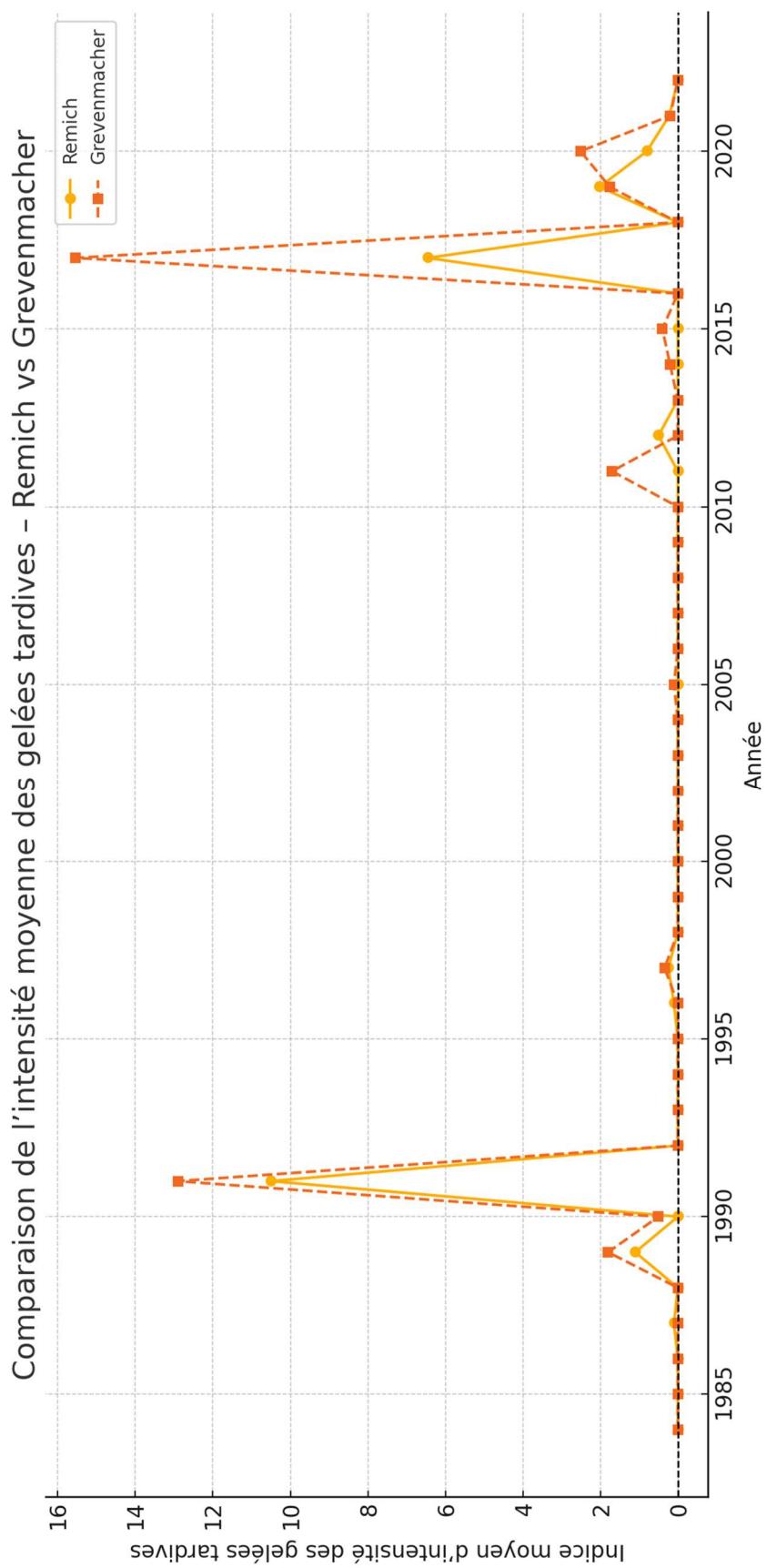


Figure 44: Comparaison entre Remich et Grevenmacher de l'évolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement de tous les cépages jusqu'au 31 janvier de l'année en cours entre 1984 et 2022.

Traminer - Gelée tardive vs Moût récolté

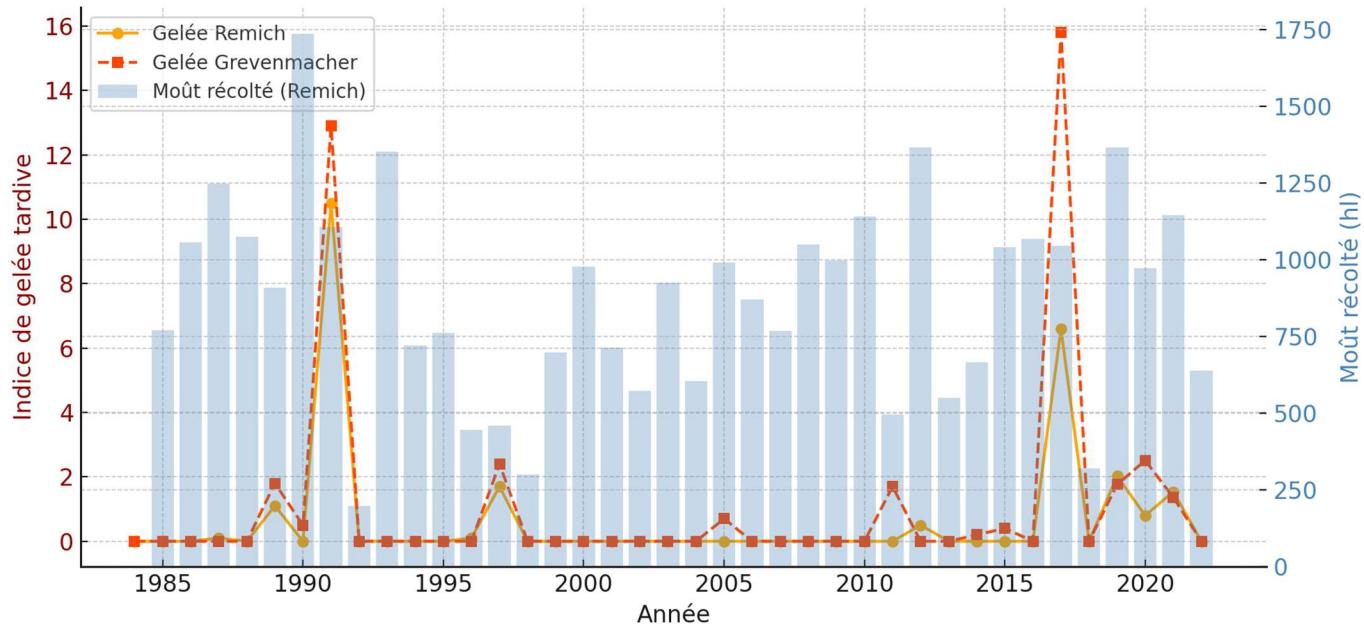


Figure 45: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Traminer jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Traminer dans la vallée de la Moselle.

Elbling - Gelée tardive vs Moût récolté

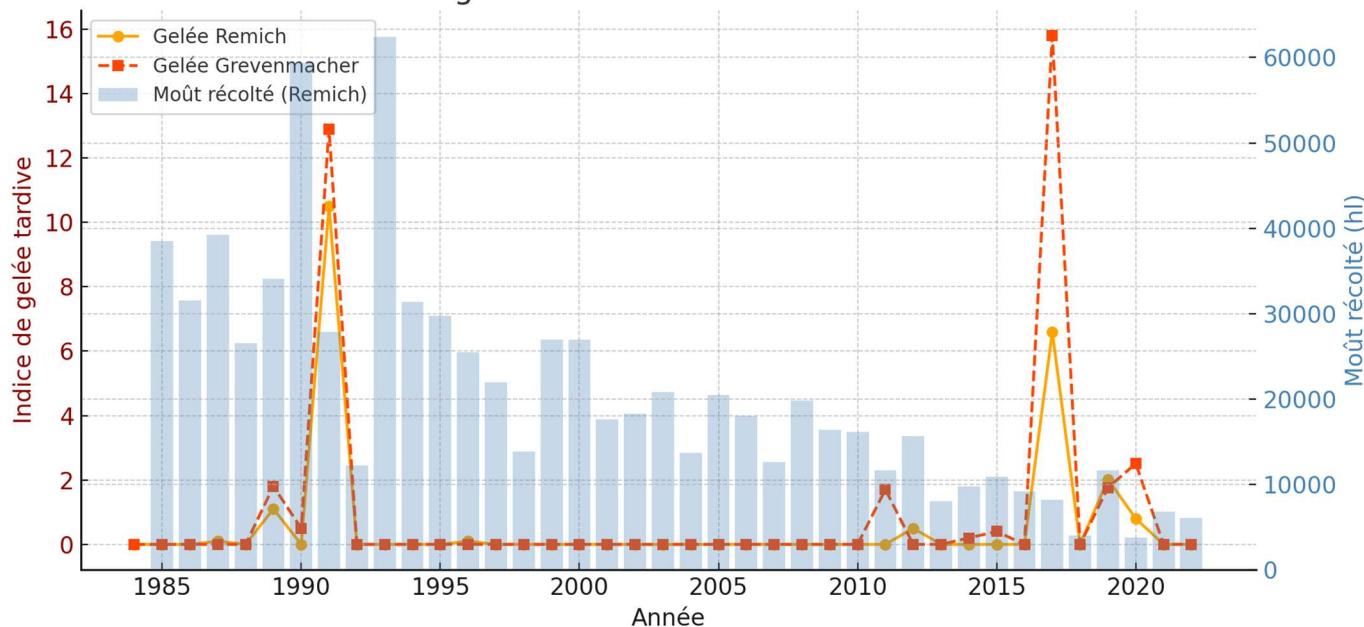


Figure 46: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Elbling jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Elbling dans la vallée de la Moselle.

Rivaner – Gelée tardive vs Moût récolté

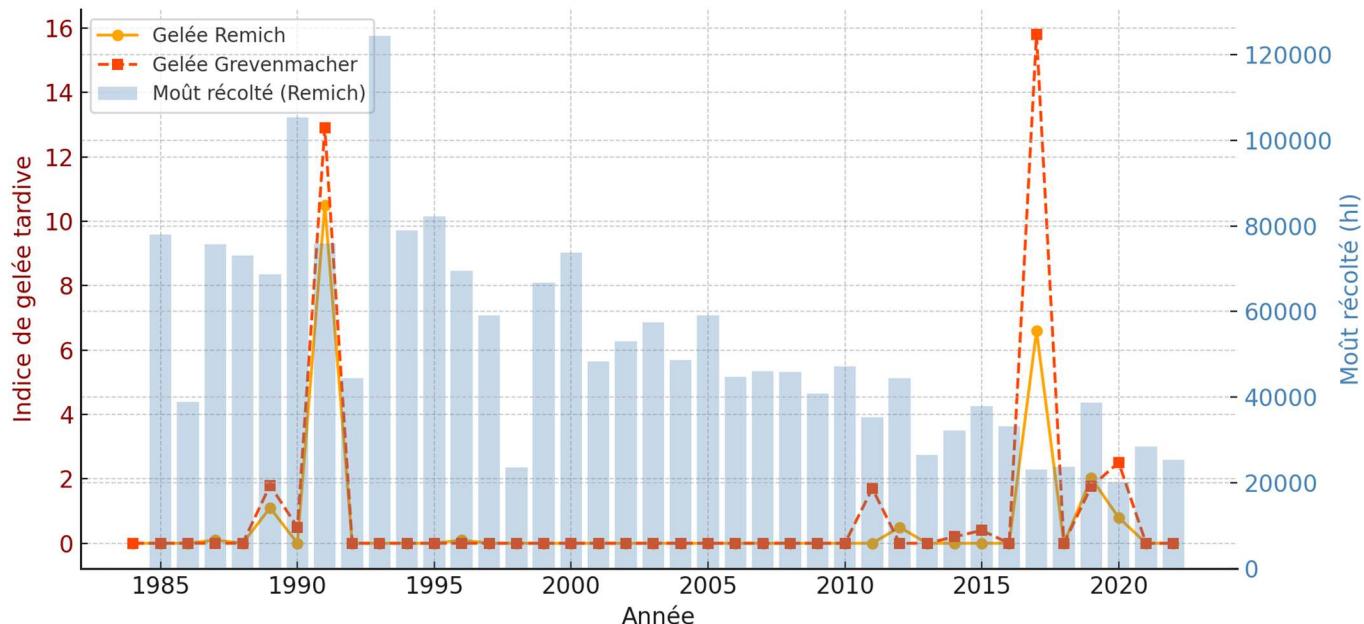


Figure 47: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Rivaner jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Rivaner dans la vallée de la Moselle.

Riesling – Gelée tardive vs Moût récolté

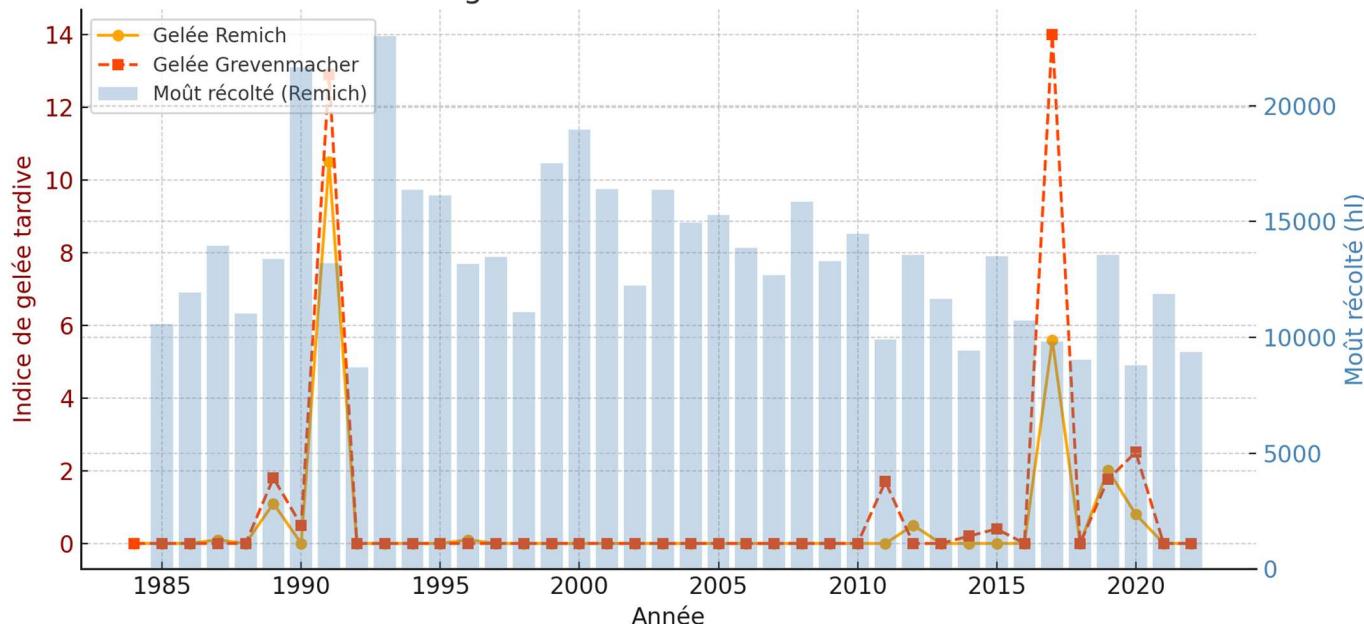


Figure 48: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Riesling jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Riesling dans la vallée de la Moselle.

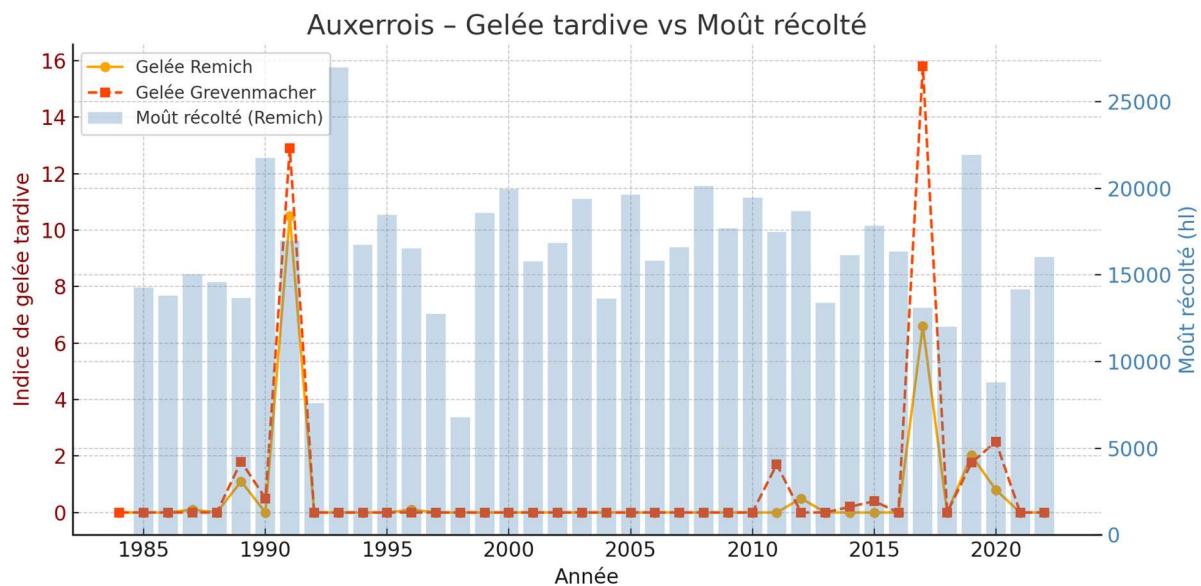


Figure 49: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Auxerrois jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Auxerrois dans la vallée de la Moselle

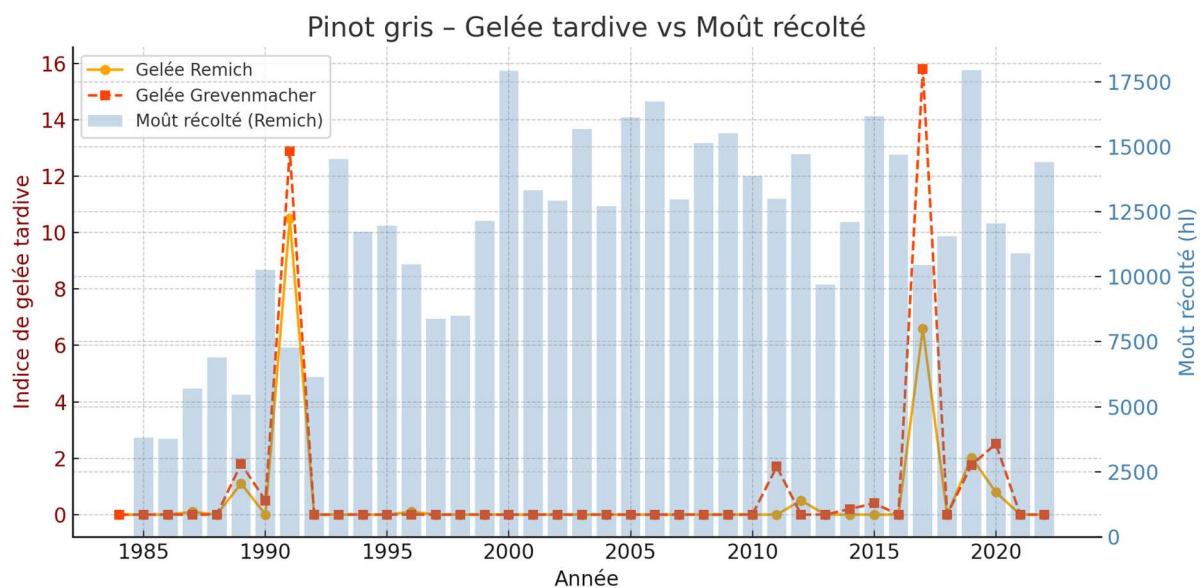


Figure 50: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Pinot Gris jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Pinot Gris dans la vallée de la Moselle

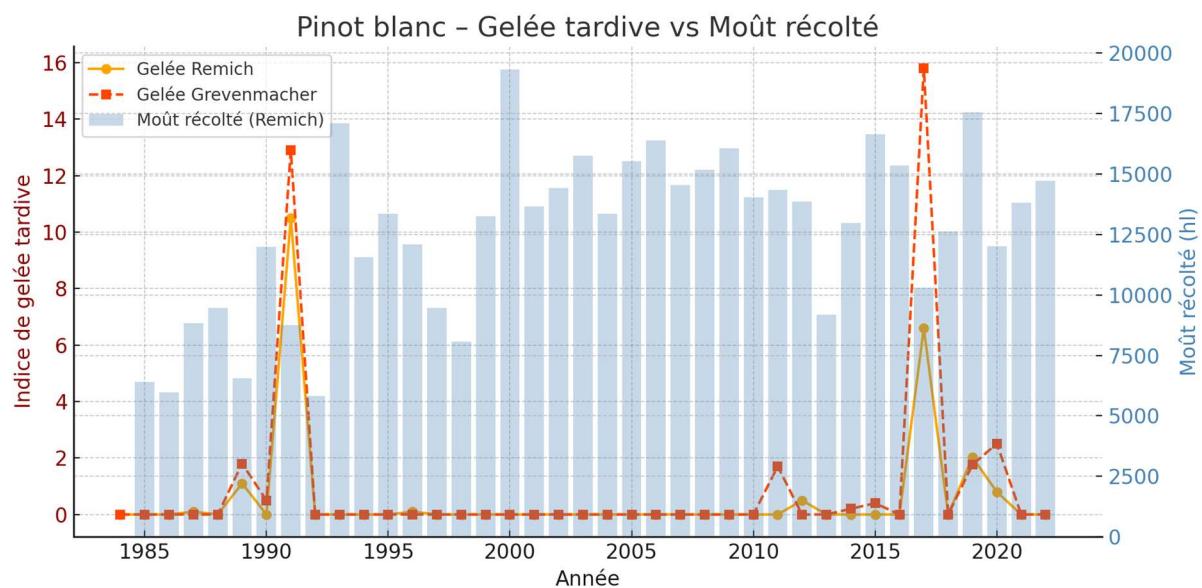


Figure 51: Evolution de l'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement du cépage Pinot Blanc jusqu'au 31 janvier de l'année en cours en comparaison avec la quantité de moût récolté en hectolitres pour le cépage Pinot Blanc dans la vallée de la Moselle

Comparaison de l'indice de gelée tardive à Remich et Grevenmacher avec le rendement

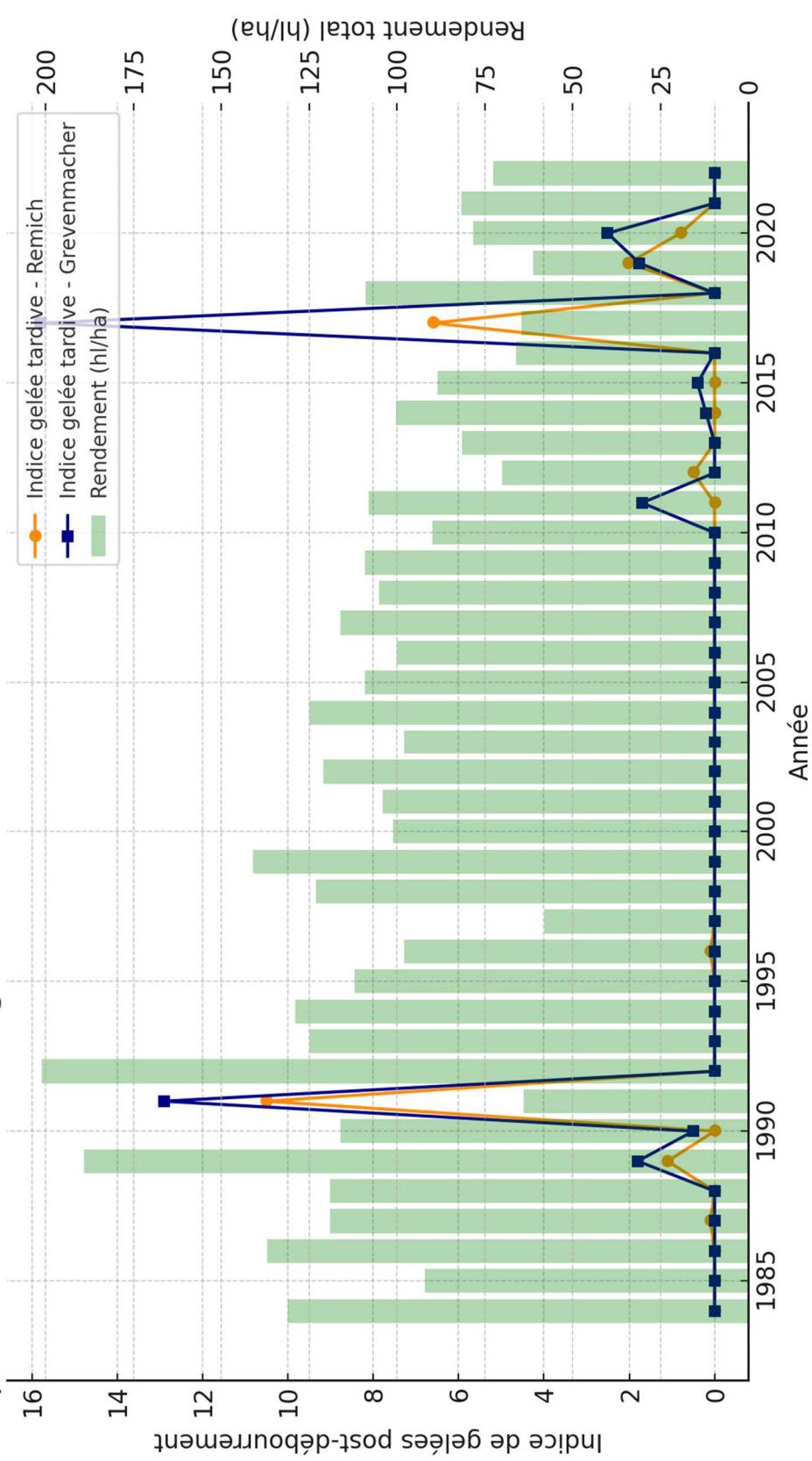


Figure 52: Comparaison entre l'indice de gelées tardives fait à partir de la moyenne des dates de débourrement de tous les cépages à Remich et Grevenmacher avec le rendement en hectolitres par hectares entre 1984 et 2022.

Cumul annuel des températures négatives pendant le cycle viticole (Remich vs Grevenmacher)

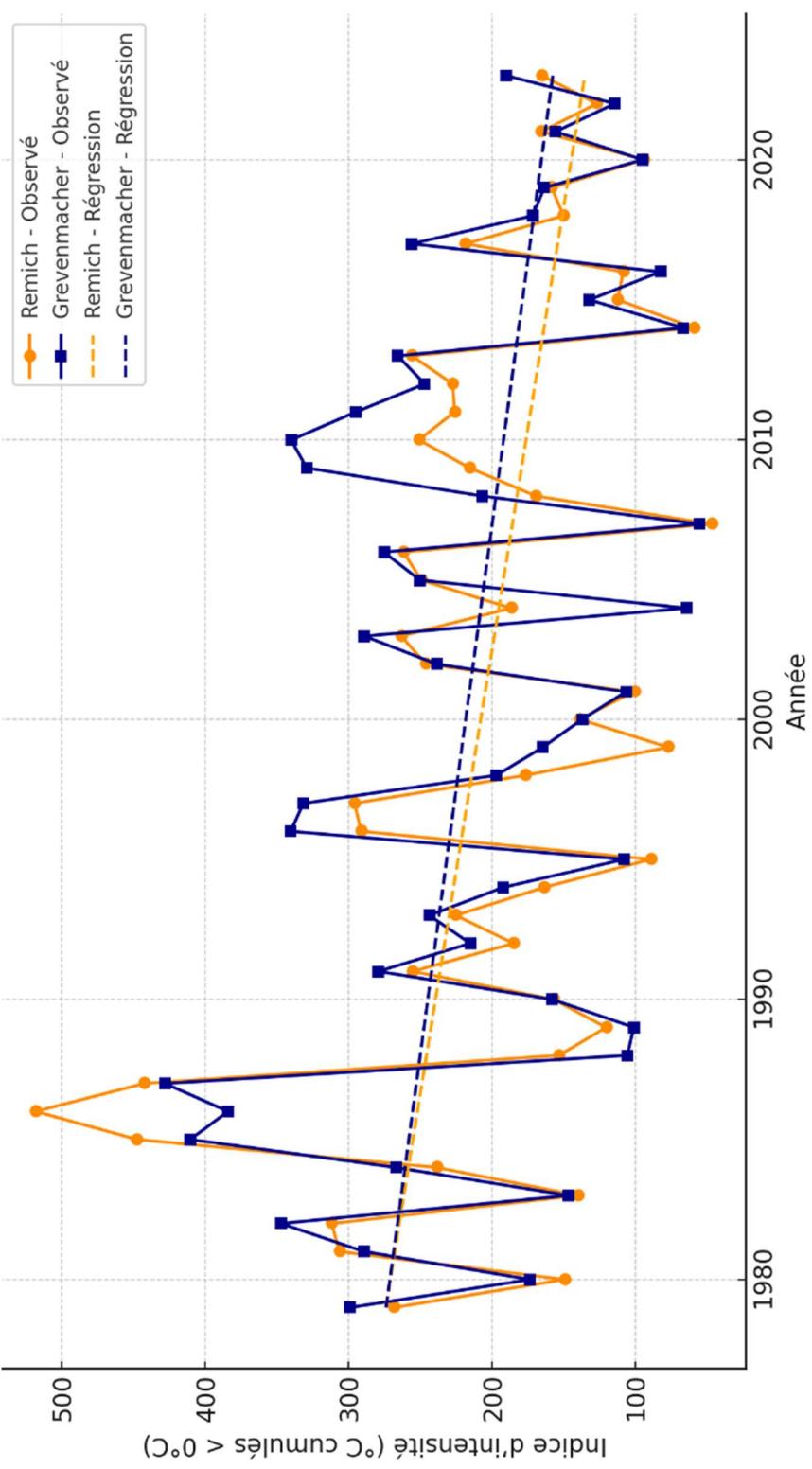


Figure 53: Cumul annuel des températures négatives pendant les cycles viticoles (entre le 31 juillet de l'année N jusqu'au 30 juillet de l'année N+1) à Remich et Grevenmacher entre 1984 et 2022. Pour Remich, p -valeur = 0,0044 et la pente est de -3,15. Pour Grevenmacher, p -valeur = 0,0175 et la pente est de -2,64.

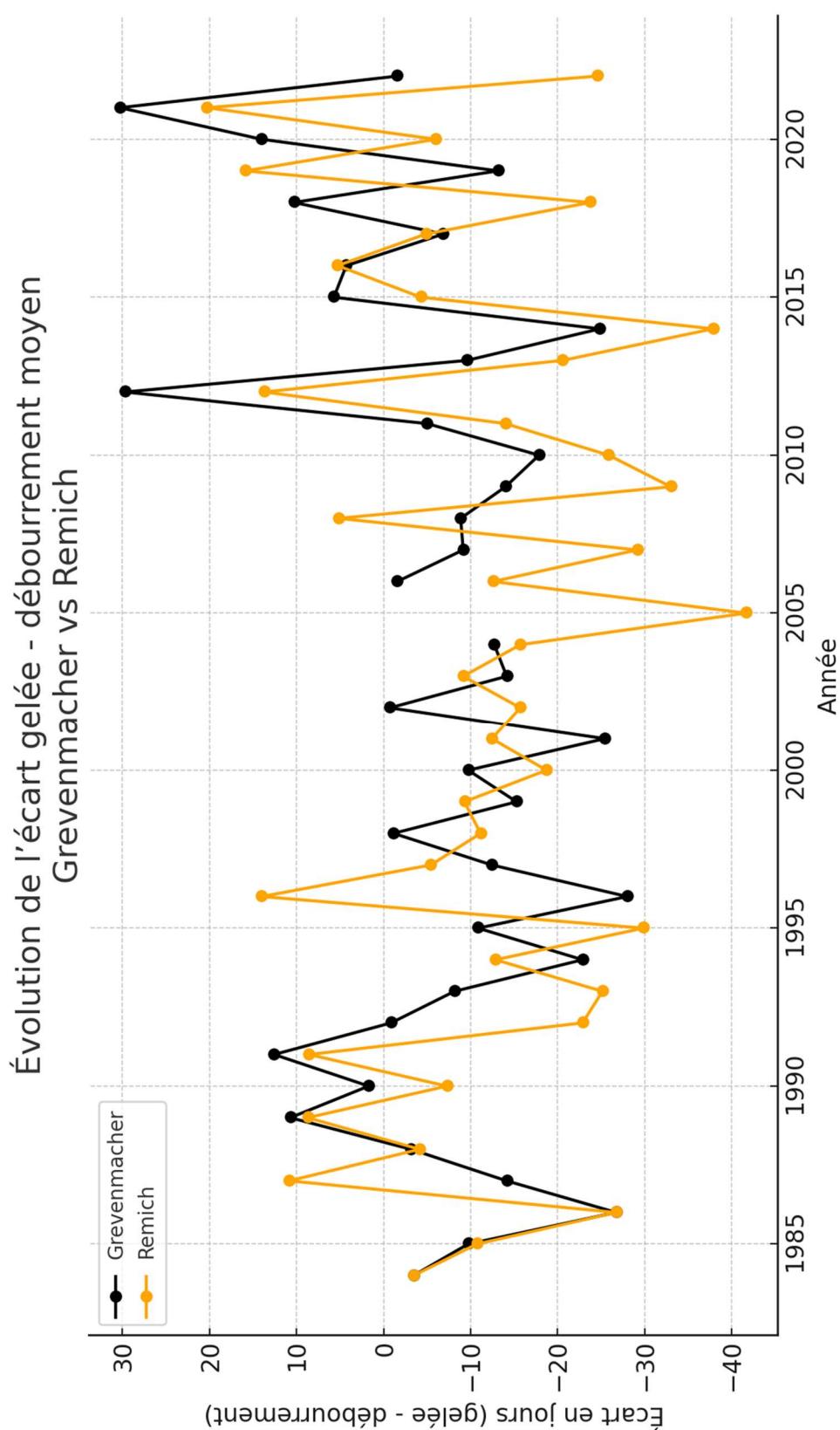


Figure 54: Comparaison de l'évolution de l'écart entre le jour de dernière gelée et le jour de débourement entre Remich et Grevenmacher entre 1984 et 2022. Une valeur positive montre une gelée survenue X jours après le débourement.

E. Comparaison entre la date de débourement et la date de dernière gelées

a) *Remich*

Dans un premier temps, il faut tester les conditions nécessaires à l'utilisation du test de Chow. Les hypothèses de test à vérifier sont :

- Normalité des erreurs : Les résidus doivent suivre une distribution normale. Le test de Shapiro-Wilk, basé sur la comparaison des quantiles observés et théoriques, donne une statistique $W = 0,99$ et une p-valeur = 0,89. On ne rejette pas l'hypothèse de normalité. Elle est respectée.
- Homoscedasticité : Les résidus doivent avoir une variance constante. Le test de Breusch-Pagan, qui compare la variance des résidus aux variables explicatives, donne une statistique = 2,22 et une p-valeur = 0,14. On ne rejette pas l'hypothèse d'homoscédasticité. Elle est respectée.
- Indépendance des erreurs : Les erreurs doivent être indépendantes dans le temps. Le test de Ljung-Box, qui mesure l'autocorrélation des résidus à différents retards, donne une statistique = 10,35 (lag = 10) et une p-valeur = 0,41. On ne rejette pas l'hypothèse d'indépendance. Elle est respectée.
- Linéarité : Le lien entre la variable dépendante (date de gelée) et le temps est supposé linéaire. L'examen visuel des résidus ne montre pas de structure particulière. L'hypothèse de linéarité est donc acceptable.

La date de 2005 montre bien une rupture selon le test de Chow.

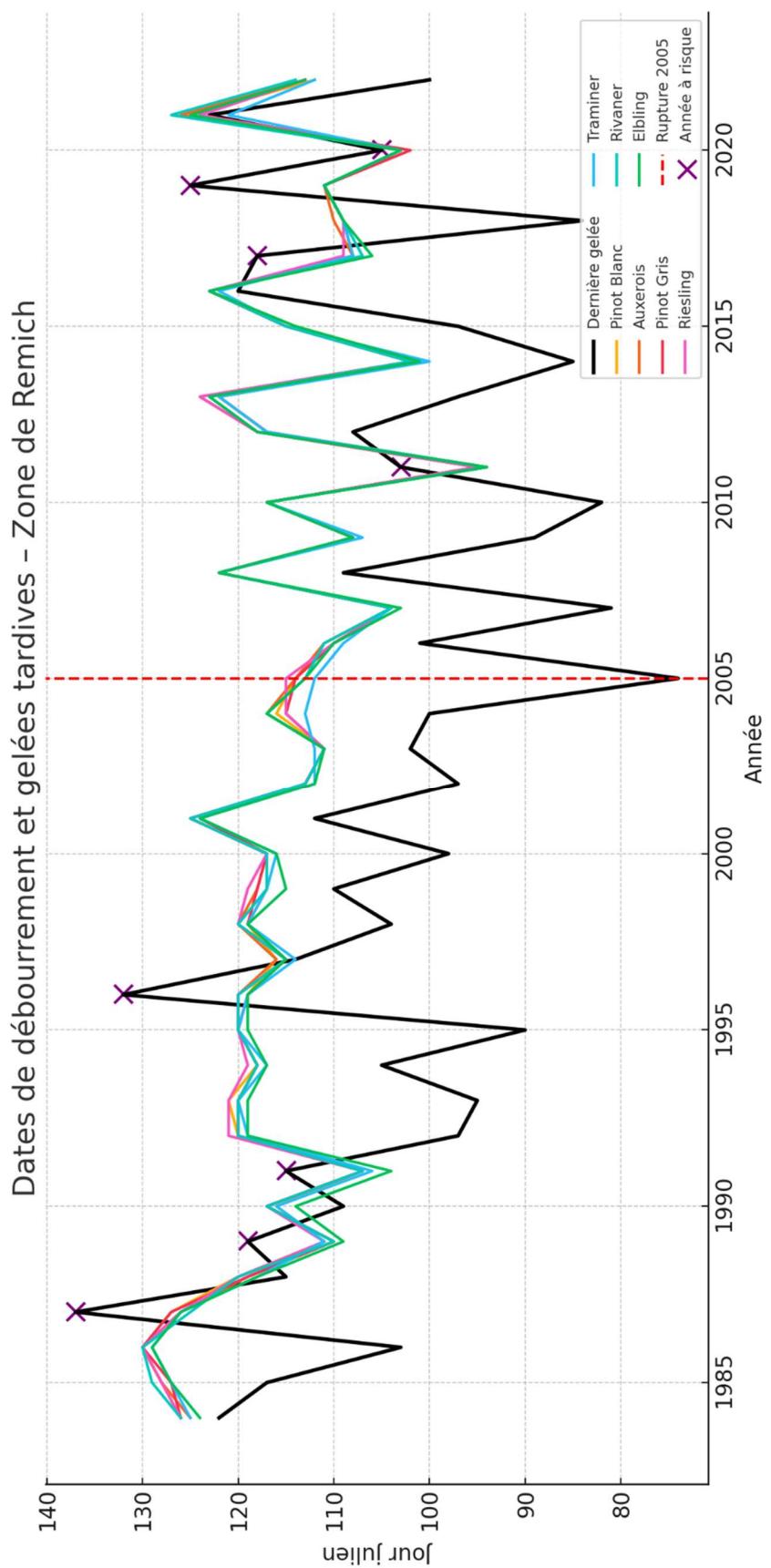


Figure 55: Comparaison entre la date de débourrement de chaque cépage et la date de dernière gelées entre 1983 et 2022 dans la zone de Remich

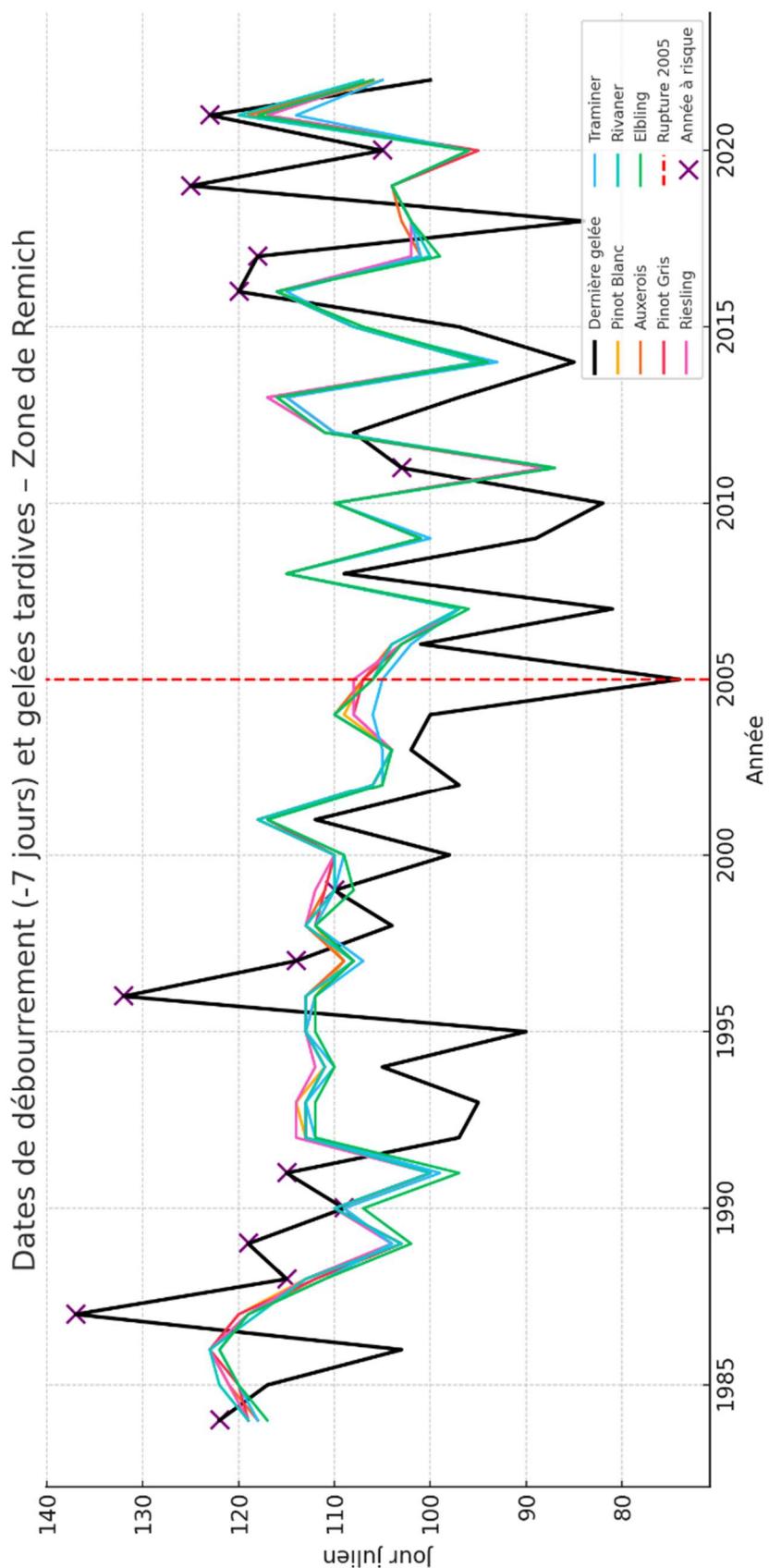


Figure 56: Comparaison entre la semaine avant la date de débourrement de chaque cépage et la date de dernière gelées entre 1983 et 2022 dans la zone de Remich

b) Grevenmacher

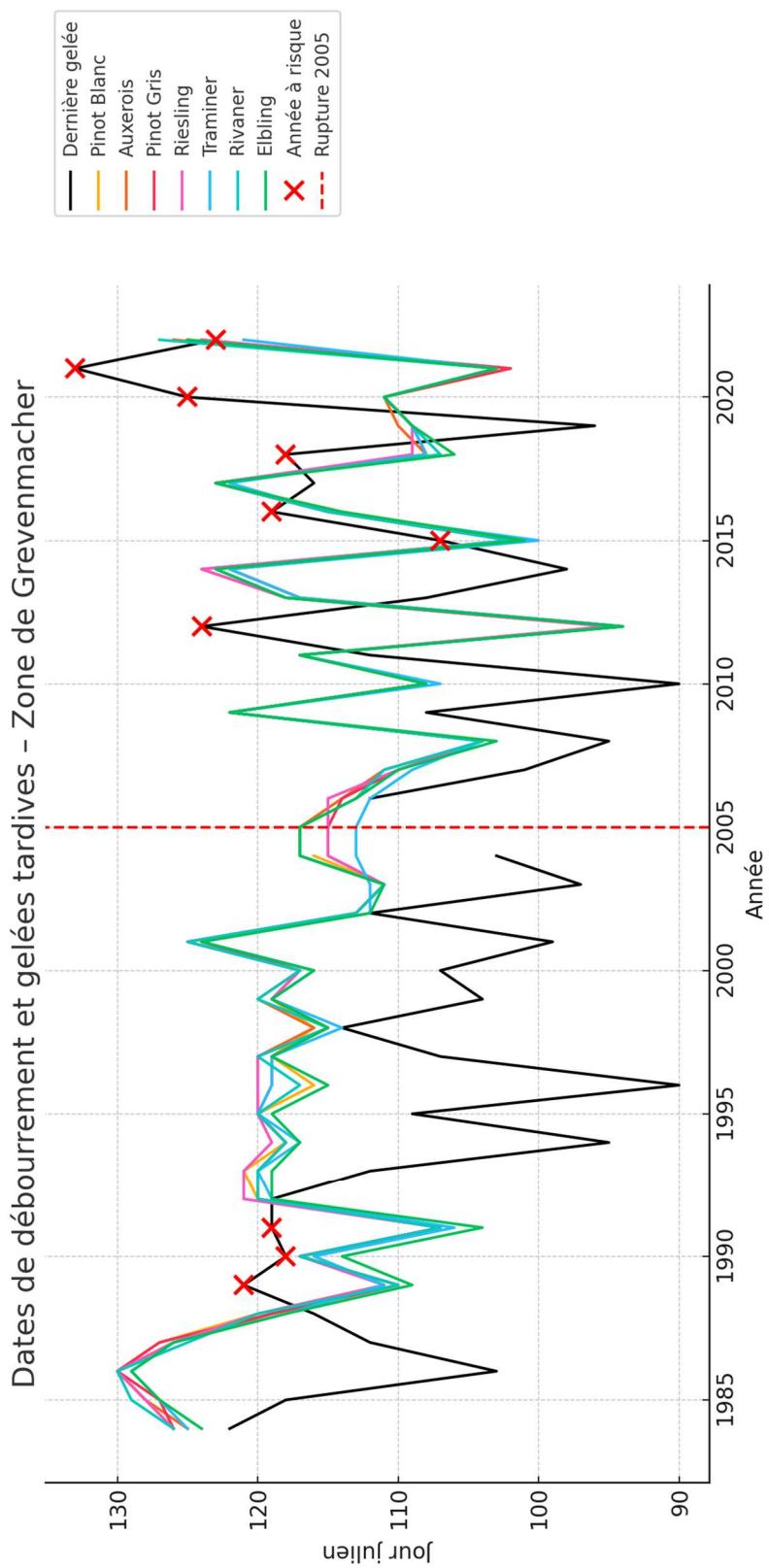


Figure 57: Comparaison entre la date de débourrement de chaque cépage et la date de dernière gelées entre 1983 et 2022 dans la zone de Grevenmacher

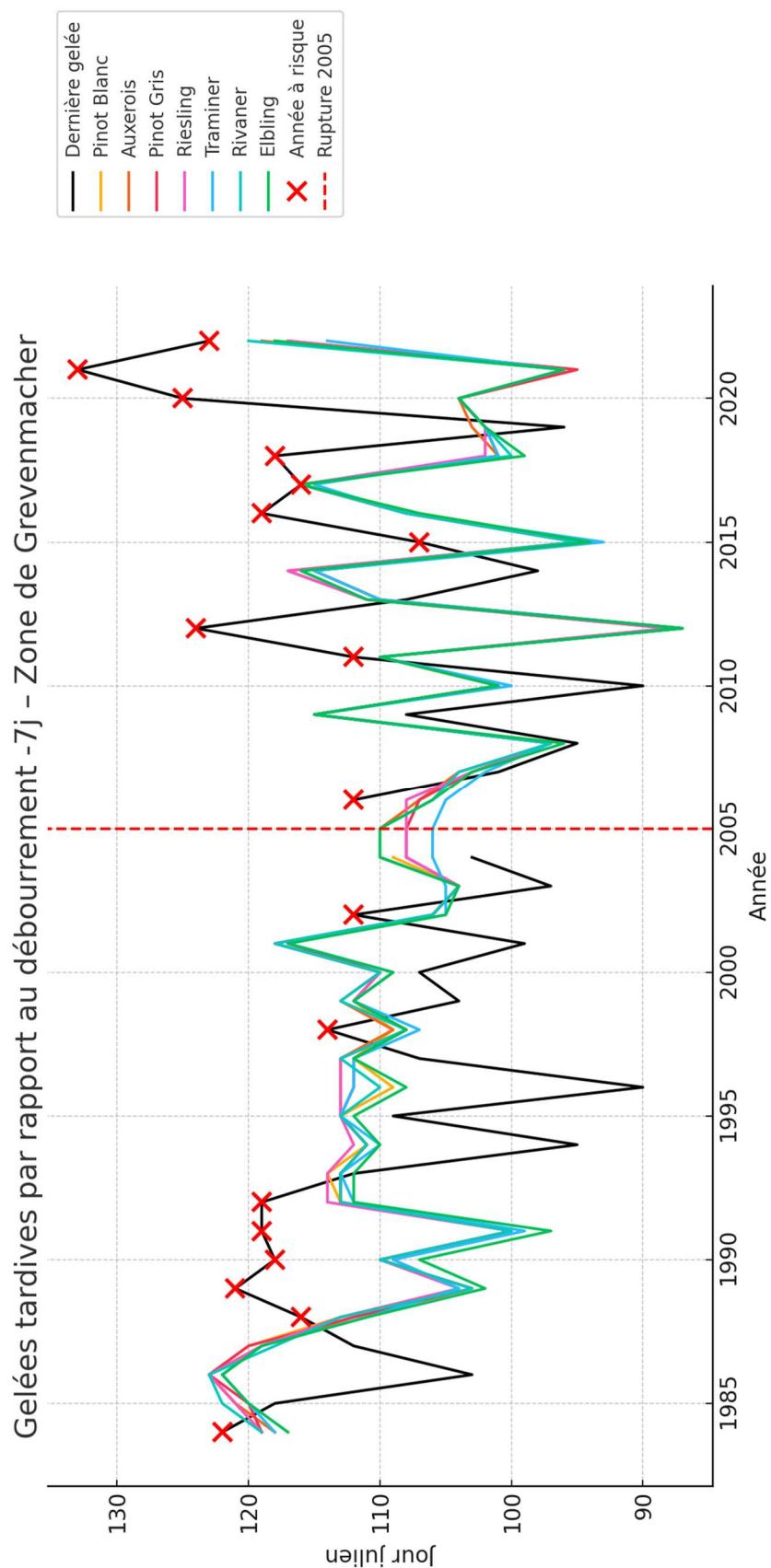


Figure 58: Comparaison entre la semaine avant la date de débourrement de chaque cépage et la date de dernière gelées entre 1983 et 2022 dans la zone de Grevenmacher

V. Discussions

A. Température

1. Tendance au réchauffement

L'analyse des données climatiques de la Moselle luxembourgeoise montre sur les figures 17 et 18, une augmentation significative de la température moyenne au fil des décennies, avec un point de rupture statistique détecté en 1987 (test de Pettitt montre une p-valeur supérieure à 5%).

Avant cette date, les températures annuelles ne présentaient pas de tendance notable (pente faible et statistiquement non significative). Cependant, après 1987, une tendance à la hausse claire apparaît. La température moyenne augmente respectivement de 0,0218 et 0,0214°C par an à Remich et à Grevenmacher soit 0,218 et 0,214°C par décennie.

Quant aux températures minimales, bien que n'étant pas statistiquement significatives à la fois pour Remich et Grevenmacher, elles subissent tout de même une tendance à la hausse lors des dernières années. Les températures les plus froides (les extrêmes de froid) sont de moins en moins froides au fil du temps.

2. Interprétation du changement climatique

La concordance de temps avec la rupture temporelle peut être liée au phénomène observé nommé « global dimming ». En français assombrissement global, c'est un phénomène qui a dans un premier temps permis de retarder le réchauffement climatique.

Jusque dans les années 1970 et début des années 1980, les aérosols et particules fines industrielles réduisaient la proportion de rayonnement solaire atteignant la surface de la terre, par diffusion et réflexion dans l'atmosphère, contribuant à une atténuation des effets de l'effet de serre anthropique (Wild, 2009). Cependant, à la fin des années 1980 (comme c'est le cas sur les figures 17 et 18, une inversion de cette tendance est observée. Cette phase est par opposition nommée phase de « brightening » (Wild, 2009). Cette transition est principalement due à une diminution des émissions d'aérosols, liée aux politiques de diminution de relargage et à l'amélioration des technologies industrielles. L'augmentation progressive du rayonnement solaire de surface, SSR (Surface Solar Radiation) mesurée dès cette période, notamment dans le réseau de stations climatiques isolées étudiée par Dutton et al. (2006). Le retrait de ce blocage atmosphérique a dès lors permis à l'effet de serre lié aux gaz ayant divers potentiels de réchauffement, d'exprimer pleinement le réchauffement en cours, contribuant à son accélération constaté mondialement à partir de 1980 (Wild, 2009).

3. Conséquences sur la vigne

La hausse des températures impacte directement la viticulture dans la région. D'une part, un climat plus chaud améliore le mûrissement des raisins. On observe depuis les années 1990 des vendanges plus précoces et une élévation des teneurs en sucre des raisins, se traduisant par des vins sensiblement moins acides et plus alcoolisés. Si la date de vendange ne changeait pas, certaines variétés atteindraient une surmaturité engendrant les conséquences déjà évoquées précédemment, peu compatible avec le style de vins locaux traditionnellement légers et acides. D'autre part, des températures plus douces risquent de favoriser certaines maladies cryptogamiques comme l'oïdium ou la pourriture grise dans la région viticole luxembourgeoise.

Cette augmentation impacte le cycle viticole tout entier et en particulier le débourrement. C'est sur ce sujet que la suite du mémoire s'est concentré.

B. Débourrement

1. Evolution des dates de débourrement

Suite au réchauffement, les données phénologiques indiquent aussi de gros changements concernant la date de débourrement de la vigne au cours des dernières décennies. Le test de Pettitt appliqué à la série temporelle de débourrement de tous les cépages montre ici encore cette rupture statistique en 1987, même année que pour les températures. Seuls la p-valeur des cépages Pinot Blanc, Pinot Gris, Riesling et Traminer montrent une significativité statistique. Pour le Pinot blanc, la pente est de -0,19. Le débourrement a lieu chaque année en moyenne 0,19 jours plus tôt. Cela représente 1,9 jours en 10 ans et même statistiquement 6,65 jours en moyenne sur la période de 35 ans que représente la période entre 1987 à 2022. C'est ce que montrent la figure 20 et le tableau 4.

Bien que les autres cépages ne suivent pas une pente significative au seuil de 5%, ils suivent cependant la même tendance générale. Bien que statistiquement non chiffrable, le débourrement a lieu de plus en plus tôt au fil des décennies. Globalement, ces régressions suivent un signal global cohérent bien que statistiquement encore fragile (R^2 faible sur les différents cépages). C'est ce qui peut motiver l'utilisation de modèles phénologiques plus complets afin d'affiner l'estimation des tendances futures.

Néanmoins, la cohérence des résultats à l'avance de débourrement est également vérifiée dans d'autres études en Europe. Par exemple, Jones et al. (2005) avaient trouvé dans le cas de l'Alsace un avancement de 0,24 jours par an au débourrement entre 1972 et 2004 et 0,11 jours par an en Bourgogne dans la même période.

2. Mécanismes biologiques

Comme décrit dans la partie traitant de la vigne, la température de l'air est l'un des principaux facteurs influençant la date de débourrement. Pour la plupart des cépages, il est estimé qu'il faut au moins 200 heures en dessous de 8°C pour satisfaire le besoin en froid en hiver et permettre aux bourgeons de devenir sensible au redoux de printemps. Pouget (1967), montre ainsi qu'entre 5°C et 25°C, la vitesse de débourrement augmente de façon logarithmique avec la température. Ainsi, la tendance aux printemps chauds se traduit mécaniquement par une avancée des stades phénologiques. La température moyenne augmente, les températures minimales sont de plus en plus élevées: la vigne accumule plus vite la somme de chaleur nécessaire à son débourrement, pouvant se traduire par une avancée générale de tous les stades phénologiques de son cycle. Pour le cas du débourrement, il faut cependant préciser que l'envers de la médaille est que les jeunes pousses ont un risque plus accru d'être exposées à des gelées printanières.

C. Gelées tardives

1. Phase de diminution des épisodes de gelées tardives jusqu'en 2005

L'analyse des gelées printanières (gelées tardives), définie par des températures en dessous de 0°C dans cette étude révèle une évolution en deux épisodes. Dans un premier temps, de 1978 à 2005, la date de gelées tardives a eu tendance à reculer dans l'année. La rupture statistique est détectée par le test de Chow, le test de Pettit ne détectant pas de rupture dans ce cas-ci. Celui-ci étant basé sur une approche non paramétrique, n'a pas mis en évidence de rupture significative dans la série des dates de dernière gelée, ce qui suggère l'absence de changement brutal dans la médiane. En revanche, le test de Chow a révélé une rupture structurelle significative dans la relation entre l'année et la date de gelée. Cette divergence s'explique par la nature des tests : tandis que Pettitt est sensible à des cassures nettes dans la tendance centrale, Chow détecte des évolutions plus progressives affectant la pente du modèle linéaire.

Avec une p-valeur de 0,0036 pour l'étude de la zone de Remich, l'analyse statistique a révélé une pente significative de -0,97. Cela signifie, que la date de gelée enregistrée recule significativement en moyenne d'une journée tous les ans. Entre 1978 et 2005 (27 ans), cela représente un recul d'un peu moins de 27 jours.

Pour la zone de Grevenmacher, avec une p-valeur de 0,0074, la pente est de -0,68. La date de dernière gelée enregistrée recule en moyenne de 0,68 jours par an.

Les deux tests étant statistiquement significatifs, il est possible d'affirmer que la date de la dernière gelée annuelle tend à s'avancer au fil des décennies. C'est ce qui est visible sur les figures 39 et 40 dans la première partie du graphique.

La figure 44 montre que dans la phase avant 2005 il n'y a eu qu'un seul gros indice d'intensité des gelées tardives après la date moyenne de débourrement de tous les cépages jusqu'au 31 juillet de l'année en cours. Cela signifie que durant l'année 1991 enregistrant un indice de 13 la vigne a connu des températures négatives importantes ou des périodes de gel post débourrement assez longues. Les figures de 46 à 51, montrent le moût récolté l'année en fonction de l'indice de gelée. Pour l'année 1991, il est possible de remarquer que la récolte se porte assez normalement. En revanche, l'année d'après comporte une perte assez importante de moût. L'explication la plus probable est que l'année où le moût est récolté est l'année N+1. L'année 1992 montre un profil faible en moût pour tous les cépages par rapport aux autres années.

La figure 52 montre que le rendement de 1991, en hectolitres par hectare sur la moyenne de la totalité des vignes est fortement diminué en concordance avec l'indice de gelées tardives.

La figure 53 permet de voir le cumul annuel des températures minimales pour les deux zones. Entre 1978 et 2005, l'intensité des températures négatives pendant le cycle végétatif reste relativement élevée, avec plusieurs années au-dessus de 300 voire 500 °C cumulés. Cela reflète un contexte climatique plus froid, propice aux hivers doux. Toutefois, une tendance décroissante s'amorce déjà, suggérant une transition progressive vers un climat plus doux, sans pour autant exclure des pics de froid ponctuels.

Dans la figure 54, montrant l'écart entre la date de dernières gelées et la date de débourrement, on peut remarquer que l'indice reste largement positif, témoignant d'une relative acclimatation phénologique de la vigne. Si certaines années comme 1991 ou 1997 montrent un recouvrement

partiel, les épisodes à risque restent ponctuels et sans tendance structurelle claire sur cette période.

Le tout montre que, sur la période allant de 1983 à 2005, la vigne apparaît comme une culture largement justifiée et adaptée au contexte climatique local, en particulier dans la région de Remich et Grevenmacher. Malgré la présence de températures négatives pendant le cycle végétatif, les écarts majoritairement positifs entre les gelées tardives et le débourrement garantissaient une fenêtre de développement relativement sécurisée, avec un risque de gel limité et irrégulier. La baisse progressive de l'intensité des froids au cours de cette période renforce cette stabilité apparente, offrant des conditions favorables au maintien et au développement de la viticulture dans la région luxembourgeoise à cette époque.

2. Phase d'augmentation des épisodes de gelées tardives après 2005

Après la rupture montrée par le test de Chow, la date de dernière gelée tardive a statistiquement eu tendance à changer et avancer dans l'année.

C'est ce que montrent la régression de la seconde partie des figures 39 et 40, avec une p-valeur de 0,066 pour Remich et 0,035. Etant statistiquement significatives, on peut dire que, en moyenne, la date de gelée enregistrée avance de 1,3 jours par an, représentant des gelées qui ont lieu de plus en plus tard dans l'année. Sachant que la pente était de +1 jour par an avant la rupture de 2005, on peut supposer un retour à l'état initial dans un premier temps puis des gelées qui risquent de se chevaucher avec la date de débourrement.

La figure 43 montre les indices de gelées post débourrement qui ont eu lieu ces dernières années. Les années 2017, 2019 et 2020 montrent des indices inquiétants. Pour l'année 2017, les gelées printanières ont, selon le rapport annuel de cette année-là, causé une baisse de volumes de production de presque 30%. Cette année connu en plus des épisodes de gelées, des épisodes de sécheresses (Ministère de l'Agriculture, la Viticulture et de la Protection des consommateurs, 2017).

En 2024, le rapport de l'IVV rapporte que certaines exploitations ont perdu jusqu'à 100% de leur récolte en raison des gelées tardives (IVV, 2024).

Les figures 45 à 51, ne montrent cependant une forte diminution du moût récolté à l'année N+1 que pour le Traminer à l'année 2016. Néanmoins, la relation entre gel et rendement reste complexe, car d'autres facteurs entrent en jeu, tels que la vigueur du cépage, les pratiques culturelles ou encore les conditions climatiques post-gel.

Sur la figure 52, on remarque dans un premier temps la baisse générale des rendements sur la côte mosellane. Cette baisse peut être expliquée par la mise en place de critères AOP, qui règlementent les niveaux de production viticole pour chaque cépage.

Les figures 55 et 57 permettent de mieux visualiser les années à risques. Lorsque la date de gelée tardive chevauche la date de débourrement, celle-ci est marquée d'une croix. La vigne présente un risque de subir des dégâts de gelées. Durant la période 2005-2022, la date de 2017 ressort une fois de plus ainsi que les années 2019 et 2020. Sur les figures qui montrent les épisodes de gelées une semaine avant le débourrement, il est possible de se rendre compte à quel point les vignes sont sensibles au gel juste avant de débourrer.

Ces figures illustrent clairement depuis la rupture détectée en 2005, que la fenêtre de vulnérabilité phénologique de la vigne s'élargit. L'avancement du débourrement combiné à la variabilité des gelées tardives conduit à une multiplication des années à risque, notamment en 2017, 2020 et 2024. Ces chevauchements confirment que le changement climatique n'entraîne pas une réduction linéaire du risque, mais plutôt un déplacement et une transformation de sa nature, rendant la viticulture plus exposée à des événements imprévus et dommageables.

3. Phénomènes explicatifs

Ces observations semblent aller à l'encontre des projections formulées en 2013 par Molitret al. (2014), qui estimaient que les dates et la fréquence des gelées de printemps devaient diminuer dans le futur, proportionnellement à l'avancement du débourement. Cependant, cette même étude soulignait déjà que les gelées tardives demeuraient des phénomènes très variables, et qu'elles ne pouvaient jamais être totalement exclues. L'écart entre ces projections passées et les observations actuelles s'explique par la complexité liée à la modélisation du climat futur, ainsi que par le manque de données historiques de qualité pour capturer pleinement les tendances à long terme. En effet, bien que les températures moyennes soient en augmentation, la fréquence des événements extrêmes, qu'ils soient froids ou chauds, est également susceptible d'évoluer. Une étude récente (Junk et al., 2024) démontre que, pour l'Europe, les changements dans les événements climatiques extrêmes sont influencés à parts égales par l'évolution de la moyenne climatique et par la variabilité naturelle du climat. Cette variabilité peut ainsi engendrer une augmentation du risque de gelées imprévues, même dans un contexte de réchauffement global.

a) *North Atlantic Oscillation*

Une des raisons pouvant expliquer ce changement est l'influence du « North Atlantic Oscillation » (ou NAO). La NAO est un phénomène climatique qui décrit la différence de pression entre l'Anticyclone des Açores et la basse pression de l'Islande. Ces deux zones de pression influencent les courants atmosphériques et, par conséquent, le climat en Europe.

En analysant les tendances climatiques liées à ce phénomène, les chercheurs ont observé une corrélation entre les phases positives et négatives de NAO et les extrêmes climatiques européens. Les phases négatives sont corrélées à des épisodes de froid.

- Phase positive: Lorsque la NAO est positive, les vents d'ouest soufflent plus fort, ce qui amène des hivers plus doux et plus humides dans la partie nord de l'Europe, avec des températures relativement modérées.
- Phase négative: Lorsque la NAO est négative, l'anticyclone des Açores est moins intense, ce qui laisse passer des vagues de froid provenant du nord ou du nord-est. Cela provoque des hivers plus froids et plus secs, avec des températures extrêmes, y compris des gelées tardives. (Folland et al., 2008) ; (Beniston, 2018)

La NAO influence donc fortement la trajectoire des dépressions atlantiques et la position du jet-stream, modifiant la répartition des températures et des précipitations saisonnières. Elle varie de façon quasi-aléatoire d'une année à l'autre, mais certaines tendances peuvent apparaître sur des périodes de quelques décennies. Des études récentes suggèrent que le réchauffement climatique pourrait modifier la fréquence et l'intensité des phases de la NAO, avec des effets encore incertains sur la stabilité climatique de l'Europe.

Cela signifierait alors que la viticulture dans beaucoup de zones serait mise à mal sur certaines périodes annuelles. Les pays du nord subiraient alors des phases de gelées tardives et les pays viticoles du sud des vagues de chaleurs et de sécheresse plus intenses.

b) Cut-off Lows

En complément, l'étude de (Mishra et al., 2024) sur l'augmentation des Cut-off Lows (COLs) apporte une explication supplémentaires à ces vagues de froid. Les COLs sont des gouttes froides d'altitude isolées du flux principal de circulation atmosphérique. Ces sont des courants de dépressions froides en altitude qui se détachent du courant-jet⁸ et peuvent provoquer des stagnations de masses d'air froides. Ceux-ci sont alors accompagnés de précipitations intenses et d'un refroidissement brutal en surface (Thompson et al., 2024). Historiquement fréquents en été, les COLs deviennent de plus en plus durables et intenses en printemps (surtout en Europe de l'Ouest), selon la modélisation réalisée par (Mishra et al. 2024). Ces phénomènes en intensification peuvent constituer un facteur aggravant pour le risque de gelées tardives, car ils peuvent entraîner des vagues d'air froid même dans un climat globalement plus chaud.

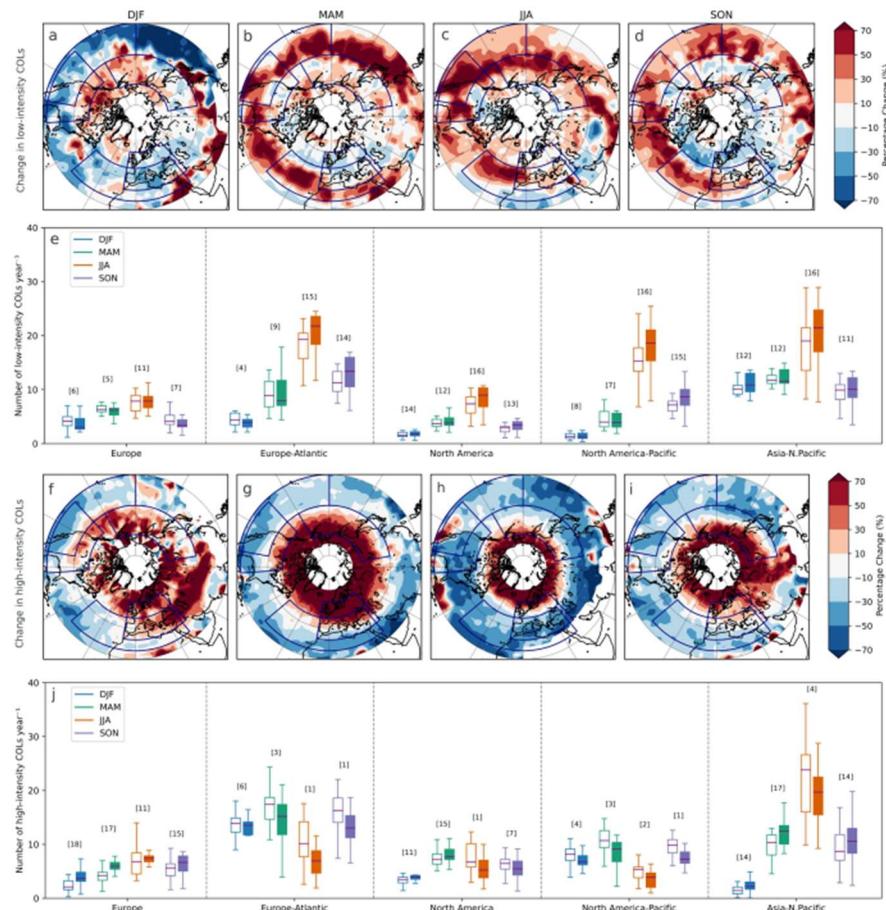


Figure 59: changements projetés de fréquence des Cut-Off Lows (COLs) selon leur intensité maximale, dans le scénario climatique SSP5-8.5 (période 2071-2100), comparée à la période historique de référence (1950-2014). Les sous-figures a à d montrent le changement en pourcentage de la fréquence des COLs de faible intensité ($\leq 10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), tandis que les sous-figures f à i illustrent la même évolution pour les COLs les plus intenses ($> 10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$). Les parties e et j présentent le nombre absolu de COLs identifiés par an dans les zones régionales définies, répartis par saison, avec une comparaison entre les simulations historiques (en blanc) et futures (en gris). Pour chaque boîte, le centre représente la médiane, les bords indiquent les 1er et 3e quartiles, et les moustaches s'étendent de P5 à P95. Les chiffres indiqués au-dessus des diagrammes en boîte correspondent au nombre de modèles climatiques projetant une augmentation significative du phénomène. Traduction littérale de (Mishra et al., 2024).

⁸ Le courant-jet (ou jet stream en anglais) est un axe de vent d'altitude très puissant circulant autour de la Terre d'ouest en est. C'est un « tube de vent » très fort, de 2 à 3 kilomètres d'épaisseur et de plusieurs milliers de km de long.

c) Réchauffement climatique

Comme le montre la figure 15, l'accumulation des unités de froid n'est pas exclusivement liée à des températures très basses : leur optimum se situe autour de 8 °C. Cela signifie que, paradoxalement, un réchauffement hivernal modéré peut favoriser une accumulation plus rapide de ces unités de froid optimales. En conséquence, la levée de dormance intervient plus précocement, et donc, indirectement, elle contribue aussi à avancer la date de débourrement.

La dernière explication repose donc sur l'avancée progressive de la date de débourrement observée au fil des années. Avec une pente moyenne estimée à -0,18 jour/an, le débourrement tend à survenir de plus en plus tôt. Si la date de la dernière gelée annuelle venait à rester relativement stable dans l'année, alors l'écart entre ces deux événements se réduirait. Autrement dit, même sans changement majeur dans la fréquence ou l'intensité des gelées, l'avancement du débourrement suffirait à rapprocher la vigne de cette période à risque, augmentant ainsi sa vulnérabilité.

Cependant, il est important de souligner que l'évolution future des gelées tardives reste difficile à prévoir. Leur apparition dépend de facteurs climatiques complexes, soumis à de fortes variabilités. Cette incertitude rend impossible la définition d'une tendance linéaire ou d'une pente d'évolution fiable. Ce que l'on peut affirmer, c'est que la fréquence des situations à risque pourrait augmenter dans un futur proche, notamment en raison du croisement entre un débourrement de plus en plus précoce et un climat encore ponctuellement sujet aux coups de froid printaniers imprévisibles.

d) Prélèvement des données

Une autre explication pourrait être une modification très localisée des flux autour des stations météo. Cependant, les deux stations ayant les même points de rupture, cela semble peu probable.

D. Comparaison des deux modèles

Pour aider les viticulteurs à la prise de décision d'installation de matériel permettant de limiter les dégâts des gelées printanières, il est nécessaire de pouvoir prévoir le débourement dans la région.

Pour ce faire, des modèles peuvent être créés. Dans cette étude de cas, le premier modèle adapté a été proposé par Morales-Castilla et al. (2020) et est basé sur une approche physiquement déterministe, issue d'une relation de cause à effet. Ce modèle se base sur la chaîne de modélisation SUWE. Le second, adapté de l'étude de Simmer (2009) est un modèle statistiquement basé, issu de données historiques mises en relation.

Ces deux approches pourront, dans des études futures, prévoir le comportement du débourement.

1. Evaluation statistique

a) Modèle 1

Remich (calibrage de 2006 à 2022)

R ²	0,62
P valeur	2,6.10 ⁻⁵
RMSE	5,1
EF	0,6
Biais moyen	2,3

Tableau 11: Tableau récapitulatif des résultats statistiques de la chaîne de modélisation SUWE sur la région de Remich

Grevenmacher (calibrage de 2006 à 2022)

R ²	0,63
P valeur	9,53.10 ⁻⁶
RMSE	5
EF	0,6
Biais moyen	2,6

Tableau 12: Tableau récapitulatif des résultats statistiques de la chaîne de modélisation SUWE sur la région de Remich

b) Modèle 2

Remich (validation croidée)

R ²	0,79
RMSE	3,54 jours
EF	0,788
Biais moyen	-0,08
p valeur	4.10 ⁻¹²
VIF	1,4
Normalité des résidus	0,038
Hétéroscédasticité	0,26
Cook's Distance	0,24

Tableau 13: Tableau récapitulatif des résultats statistiques du modèle 2 sur la région de Remich

Grevenmacher (validation croidée)

R ²	0,73
RMSE	4 jours
EF	0,729
Biais moyen	0,11 jours
p valeur	3,3.10 ⁻¹⁰
VIF	1,32
Normalité des résidus	0,31
Hétéroscédasticité	0,067
Cook's Distance	2,28

Tableau 14: Tableau récapitulatif des résultats statistiques du modèle 2 sur la région de Grevenmacher

D'un point de vue purement statistique, le modèle empirique est supérieur. Toutefois, la comparaison ne saurait se limiter à cela.

2. Pertinence biologique et applications

La comparaison des deux modèles se fera sur base des statistiques obtenues et sur des réalités biologiques.

D'un point de vue purement statistique pour le modèle 1,

Le point fort de ce modèle est qu'il repose sur des données physiologiques. Dans des conditions climatiques extrêmes faisant reculer l'avancée de la vigne, le modèle se montre très bon. Le modèle est fortement ajustable à différents cépages et surtout facilement ajustable à toutes les régions à condition d'avoir les dates de débourrement pour ce faire.

Pour le modèle 2,

Le point fort de ce modèle est sa simplicité. Il est simple à comprendre et à mettre en place et nécessite des moyennes plus basiques. Il est également très rapide à exécuter ce qui peut se montrer utile sur de grandes séries temporelles. Purement statistiquement, c'est ce modèle qui a le plus grand R² et le RMSE le plus petit. Il repose finalement sur des facteurs qui expliquent de façon biologique le débourrement. A savoir, le froid de début d'année, les températures de mars à avril, et finalement les températures de fin d'année précédente ayant une influence sur l'année en cours.

3. Pertinence

Le premier modèle est un calcul qui se base sur des données physiologiques de la vigne. Il est basé sur des accumulations de données et est appelé SUWE (Smoothed-Utah + Wang & Engel). Ces données cumulées sont dans un premier temps des unités de froid hivernal jusqu'à la levée de dormance puis des accumulations de chaleur jusqu'au débourrement. Le modèle est complexe et a pour avantage de prendre en compte les réponses non linéaires de la vigne. Il considère notamment les ralentissements de celle-ci lorsque les conditions sont extrêmes (trop chaud ou trop froid). C'est ce qui s'est passé pour les années 2017 et 2019 notamment où la chaîne de modélisation a trouvé un RMSE beaucoup plus poche de 0. Dans ce cas-ci, le modèle 2 s'est moyennement révélé être le plus précis des deux. Celui-ci est empirique et se montre beaucoup plus simple. Il suppose une réponse plus constante et peut manquer de fiabilité lors de données historiques extrêmes (hivers doux, vagues de chaleur...). En effet, il se base sur des moyennes de températures et de froid durant plusieurs périodes. Il reste cependant biologiquement correct.

En définitive, le modèle 2 est plus simple et permet une facilité à la fois d'utilisation et de compréhension. Cependant, étant moins précis dans les extrêmes climatiques, il est plus pertinent dans ce cas-ci de choisir le premier modèle. Dans le cadre de gelées tardives qui seraient enclines à changer dans un futur anticipé ainsi que l'augmentation imprévisible des températures, celui-ci se montrera plus précis à long terme. C'est également ce que défend Morales-Castilla et al. (2020) qui dit : « *Phenological models incorporating chilling and forcing are more resilient under climate change scenarios.* » .

VI. Limites et perspectives

Dans un premier temps, il est important de rappeler que les données phénologiques sont des données moyennées de toute la côte mosellane. Cette approche permet de dégager une tendance sur le débourrement de toute la région, mais ne prend pas en compte les variations locales. Afin d'améliorer nos analyses et prédictions, il aurait fallu avoir des données pour chaque ville étudiée ainsi que le débourrement. Cette segmentation d'analyse permettrait de mieux représenter la variabilité climatique ainsi que les effets de la localisation, les microclimats, les différents travaux agricoles ...

D'autre part, l'approche de ce travail pourrait renforcer la robustesse du modèle en capturant la variabilité des phénomènes phénologiques. En effet, le modèle étant construit sur des données hétérogènes, celui sera plus robuste et pourra mieux s'adapter à toutes les variations locales. Cette méthode est moins précise très localement, mais elle permet de mieux appréhender les tendances régionales.

Une approche mixant un modèle physiquement et statistiquement basé pourrait s'avérer la plus adéquat pour offrir des prévisions à la fois précises et généralisables.

Pour adapter la chaîne de modélisation SUWE à la région mosellane luxembourgeoise, la date de sortie de dormance n'était pas disponible. La fonction differential evolution calcule le meilleur « compromis » entre l'addition des unités faisant sortir la vigne de sa dormance et les unités faisant débourrer. L'ajout de la date exacte de sortie de dormance serait physiquement plus vérace et permettrait peut-être d'ajuster plus finement les dates de débourrement.

Les données météorologiques ne proviennent que de deux stations. Sur des vallées avec des coteaux très hétérogènes comme la Moselle, les conditions climatiques peuvent être très variables d'un endroit à l'autre. Pour affiner les modèles localement, il convient de ne pas augmenter que la précision des données phénologiques mais également d'affiner les résultats météorologiques.

La perspective future de ce travail sera de trouver des données météorologiques fiables à ce mémoire avec un scénario climatique RCP 2,6 (qui correspond à un forçage radiatif de 2,6 W.m²). Ce scénario simulerait les effet qu'aurait sur l'atmosphère puis sur la vigne une diminution de nos gaz à effet de serre tout au long du 21^{ème} siècle. L'autre scénario intéressant serait le RCP 8,5 qui correspond aussi au forçage radiatif, celui-ci dans un scénario d'inaction totale. Ce modèle est particulièrement intéressant car il mettrait en évidence les pires impacts sur les vignes afin d'y faire face correctement.

Ces perspectives doivent idéalement intégrer les phénomène de NAO et de gouttes froides afin de pouvoir y ajouter la périodicité des vagues de froid arrivant vers les vignobles mosellans.

VII. Conclusion

L'augmentation générale des températures due au changement climatique peut avoir de nombreuses répercussions sur la vigne. L'évaluation à la fois du réchauffement des températures, de l'évolution des gelées tardives et du débourrement de la vigne dans la vallée de la Moselle luxembourgeoise a permis de mieux comprendre les événements en cours dans la région viticole.

Les résultats obtenus montrent clairement un avancement général du débourrement depuis la fin des années 1980, conséquence directe de l'augmentation des températures hivernales et printanières. Ce phénomène, bien que favorable à certains aspects de la maturation des cépages, augmente la vulnérabilité de la vigne face aux gelées tardives. L'analyse croisée entre les dates de débourrement et les dernières gelées observées révèle un chevauchement croissant depuis la moitié des années 2000, renforçant ainsi les risques de pertes de rendement et de qualité.

Les deux modèles développés dans le cadre de ce mémoire se sont révélés pertinents pour simuler le comportement phénologique de la vigne, pouvant être une aide pour les viticulteurs, tout en apportant une aide à la projection des risques futurs. Si certaines incertitudes subsistent par rapport aux scénarios climatiques à long terme, les tendances identifiées confirment la nécessité d'adapter les pratiques viticoles à une nouvelle réalité climatique.

Ce travail met ainsi en lumière les défis auxquels devront faire face les acteurs du secteur viticole luxembourgeois. Il souligne également l'importance d'un suivi continu des paramètres agroclimatiques, d'un accompagnement scientifique et technique adapté, ainsi que d'un renforcement des stratégies d'adaptation, tant au niveau variétal que cultural.

VIII. Bibliographie

- AOP – Moselle Luxembourgeoise. (2025). Récupéré sur Sparkle and wine :
<https://sparkleandwine.ch/aop-luxembourgeois/>
- AOP. (2024, 05 06). *UN APERÇU DE LA VITICULTURE LUXEMBOURGEOISE*. Récupéré sur AOP:
<https://aop.public.lu/fr/vignobles.html>
- August Imports. (2021). *MAJOR SOIL TYPES*.
- Australian Wine Research Institute. (2010). Bud dormancy and budburst. *viti-notes*, pp. 1-2.
- Beniston, M. (2018). *Modulation of extreme temperatures in Europe under extreme values of the North Atlantic Oscillation Index*. Geneva. doi: <https://doi.org/10.1111/nyas.13636>
- Bonnefont, G. (2025). *Le manque d'eau est criant chaque été dans le sud de la France*.
- Bonnefoy, C., Quenol, H., . . . Barbeau, G. (2010). *Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique*.
doi:<https://doi.org/10.4000/echogeo.12146>
- Bookdown. (n.d.). *The Art of Regression Diagnostics*. Récupéré sur Bookdown:
<https://bookdown.org/ripberjt/qrmbook/the-art-of-regression-diagnostics.html?>
- Campos, I., Neale, C., & Calera, A. (2016). Is row orientation a determinant factor for radiation interception in row vineyards. Australie. doi:<https://doi.org/10.1111/ajgw.12246>
- Chambre d'Agriculture. (2023). *L'agriculture luxembourgeoise en chiffres*. Récupéré sur Chambre d'Agriculture: <https://www.lwk.lu/fr/consommateur/lagriculture-luxembourgeoise-en-chiffres#:~:text=Le%20vignoble%20luxembourgeois%2C%20situ%C3%A9%20sur,du%20total%20des%20exploitations%20agricoles.>
- Chaptal, J.-A. (1801). *Traité théorique et pratique sur la culture de la vigne. Tome 1 / , avec l'art de faire le vin, les eaux-de-vie, esprit de vin, vinaigres...* Paris: Imprimerie de Marchant.
Consulté le 2025
- Choueiry, G. (2025). *Understand Forward and Backward Stepwise Regression*. Récupéré sur QUANTIFYING HEALTH: <https://quantifyinghealth.com/stepwise-selection/>
- Chow, G. (1960). *Tests of Equality Between Sets of Coefficients in Two Linear Regressions*. Econometrica.
- Delahaut, A. (2019). Cours de "Biostatistiques bloc 1". Liège: HEPL.
- Delmas, A. (2024, Avril). *Gelées tardives : «On est à un degré près, s'il fait -1°C, ça craint»*. Récupéré sur VERT: <https://vert.eco/articles/gelees-tardives-on-est-a-un-degre-pres-sil-fait-1c-ca-craint>
- Droulia, F., & Charalampopoulos, I. (2021). *Future Climate Change Impacts on European Viticulture: A Review on Recent Scientific Advances*. atmosphère.
doi:<https://doi.org/10.3390/atmos12040495>

- Dutton, E. G., Nelson, D. W., . . . Wendell, J. (2006). Decadal variations in surface solar irradiance as observed in a globally remote network. *The Journal of Geophysics (J. Geophys.)*. doi:<https://doi.org/10.1029/2005JD006901>
- Fagot, L. (2019). *Cours de "Pédologie"*. Liège: HEPL.
- Folland, C. K., Knight, J., . . . Hurrell, J. W. (2008). The Summer North Atlantic Oscillation: Past, Present, and Future. Dans *Journal of climate - Volume 22* (pp. 1082-1103). doi:<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2459.1>
- Goergen, K., Beersma, J., . . . Junk, J. (2012). *ENSEMBLES-based assessment of regional climate effects in Luxembourg and their impact on vegetation*. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0756-x>
- Huglin, P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *l'Académie d'Agriculture de France*, 64, pp. 1117-1126.
- INRA Bordeaux, Colmar. (1992). *Agrométéorologie de la vigne en France*. Luxembourg: Centre commun de recherche.
- IVBSA. (2025). *Focus sur la viticulture luxembourgeoise*. Récupéré sur IVBSA: <https://www.ivbsa.lu/focus-sur-la-viticulture-luxembourgeoise/#:~:text=Les%20vignes%20sont%20en%20grande,vigne%20a%20baiss%C3%A9e%20de%203.6%20%25>.
- IVV. (2010). *Das Weinjahr 2010 und seine Ernteergebnisse*. Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg.
- IVV. (2019). *Das Weinjahr und seine Ernteergebnisse*. Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg.
- IVV. (2020). *Das Weinjahr und seine Ernteergebnisse*. Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg.
- IVV. (2022). *Das Weinjahr 2022 und seine Ernteergebnisse*. Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg.
- IVV. (2024). *DAS JAHR 2024 IM LUXEMBURGER WEINBAU*. Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg.
- Jones, G. (2007). *Climate Change: Observations, Projections, and General Implications for Viticulture and Wine Production*. Oregon.
- Jones, G. V., Duchêne, E., . . . Guimberteau, G. (2005). *VERÄNDERUNGEN IN DER REBENPHÄNOLOGIE INNERHALB EUROPAS IM VERHÄLTNIS ZUM KLIMA*. Geisenheim.
- Junk, J., Görzen, K., . . . Hoffmann, L. (2011). *Possible climate change impacts on agriculture and viticulture in Luxembourg – the benefit of ensemble-based regional climate change projections. Forecasting the weather*.
- Junk, J., Sulis, M., . . . Torres-Matallana, J. A. (2024). *Evaluating the Present and Future Heat Stress Conditions in the Grand Duchy of Luxembourg*. atmosphère. doi:<https://doi.org/10.3390/atmos15010112>

- Kipsang, K. (2023). *Feature Selection; Stepwise Regression (Forward Selection and Backward Elimination) with Python*. Récupéré sur Medium: <https://medium.com/@kelvinsang97/feature-selection-stepwise-regression-forward-selection-and-backward-elimination-with-python-d53230be995c>
- Koch, B., & Oehl, F. (2018). *Climate Change Favors Grapevine Production in Temperate Zones*. Scientific Research Publishing. doi:10.4236/as.2018.93019
- Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg. (s.d.). Geoportal Luxembourg. Luxembourg.
- Leeuwen, C. v. (2010). *Managing Wine Quality (Second Edition)*. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102067-8.00005-1>
- Leeuwen, C. v., Barbe, J.-C., . . . Marchand, S. (2023, Février). Comment le terroir façonne la typicité aromatique des raisins et des vins (Partie I). *IVES technical reviews*, pp. 1-2. doi:<https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2023.7351>
- Leeuwen, C. v., Sgubin, G., . . . Gambetta, G. A. (2024). *Climate change impacts and adaptations of wine production*. nature reviews earth & environment. doi:<https://doi.org/10.1038/s43017-024-00521-5>
- lelivrescolaire. (2019). *manuel enseignement scientifique - terminale*. Hachette.
- Louvieaux, J., Rollinat, A., . . . Mahieu, O. (2021, 04 30). Quel comportement de développement adoptent les rameaux de la vigne après une gelée printanière? *Le sillon belge*.
- May, P. (1964). *OBER DIE KNOSPEN-UND INFLORESZENZ- ENTWICKLUNG DER REBE*. Zürich.
- Michaux, J. F. (2018). *Cours de "Botanique, Tome 1"*. Liège: HEPL.
- Migliavacca, M., Sonnentag, O., . . . Richardson, A. (2012). *On the uncertainty of phenological responses to climate change, and implications for a terrestrial biosphere model*. doi:<https://doi.org/10.5194/bg-9-2063-2012>
- Ministère de l'Agriculture, la Viticulture et de la Protection des consommateurs. (2017). *Rapport d'activité 2017*. Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg.
- Mishra, A. N., Maraun, D., . . . Zappa, G. (2024). *Long-lasting intense Cut-off Lows to become more*. doi:<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3982488/v1>
- Molitor, D., & Junk, J. (2019). *Climate change is implicating a two-fold impact on air temperature increase in the ripening period under the conditions of the Luxembourgish grapegrowing region*. Luxembourg: Oeno One. doi:<https://doi.org/10.20870/eno-one.2019.53.3.2329>
- Molitor, D., Caffara, A., . . . Junk, J. (2014). *Late frost damage risk for viticulture under future climate conditions: a case study for the Luxembourgish winegrowing region*. Australian Journal of Grape and Wine Research. doi:<https://doi.org/10.1111/ajgw.12059>
- Molitor, D., Junk, J., & Schultz, M. (2022). *Klimawandel im Luxemburger Weinbau - Teil 2*.
- Molitor, D., Schultz, M., . . . Beyer, M. (2019, Avril 2). *Semi-Minimal Pruned Hedge: A Potential Climate Change Adaptation Strategy in Viticulture*.
- Molitor, D., Udelhoven, T., . . . Pfister, L. (2016). *Historical vintage descriptions from Luxembourg - an indicator for the climatic conditions in the past*. doi:<https://doi.org/10.5073/vitis.2016.55.23-30>

- Montgomery, D., Peck, E., & Vining, G. (2012). *Introduction to linear regression analysis*. Wiley.
- Morales-Castilla, I., Cortazar-Atauri, I. G., . . . Wolkovich, E. M. (2020). Cultivar diversity buffers winegrowing regions from climate change losses.
doi:<https://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1906731117/-/DCSupplemental.y>
- Neethling, E., Barbeau, G., . . . Bonnefoy, C. (2011). Évolution du climat et de la composition des raisins des principaux cépages cultivés dans le Val de Loire. Val de Loire.
- Nonet, E. (2023, Avril 02). Vignes au Luxembourg : le risque de gel est surveillé de près. *Le Quotidien*.
- OIV. (2023). *STATE OF THE WORLD VINE AND WINE SECTOR IN 2023*.
- Oosalo, A. A., Naseri, L., . . . Ebrahimi, S. N. (2024). Exogenous phenylalanine application effects on phytochemicals, antioxidant activity, HPLC profiling, and PAL and CHS genes expression in table grapes (*Vitis vinifera* cv. 'Qzl Ouzum').
doi:<https://doi.org/10.1186/s12870-024-05934-4>
- Paturel, J., Boubacar, I., & L'Aour, A. (2004). *EVOLUTION DE LA PLUVIOMÉTRIE ANNUELLE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET CENTRALE AU XXÈME SIÈCLE*.
- Pellegrino, A., Rogiers, S., & Deloire, A. (2020, Mai). Dormance des bourgeons latents de la vigne et développement des rameaux. *IVES Technical Reviews*.
- Pettitt, A. (1979). *A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem*. Journal of the Royal Statistical Society.
- Peyrot des Gachons, C. (2002). Recherches sur le potentiel aromatique des raisins de *Vitis vinifera* L.cv Sauvignon blanc. Bourgogne.
- Pollès, G. L. (2024). *En huit ans, le vignoble britannique a plus que doublé !* Récupéré sur La revue du vin de France: <https://www.larvf.com/le-vignoble-britannique-a-double-en-huit-ans,4846030.asp>
- Pouget, R. (1967). Méthode d'appréciation de l'évolution physiologique des bourgeons pendant la phase de pré-débourrement: Application à l'étude comparée du débourrement de la vigne. Gironde: INRA.
- Reynier, A. (2016). *Manuel de viticulture : Guide technique du viticulteur*. Paris: Tec & Doc.
- Richardson, E. A., Seeley, S. D., & Walker, D. R. (1974). *A Model for Estimating the Completion of Rest for 'Redhaven' and 'Elberta' Peach Trees*.
doi:<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.9.4.331>
- Interview de Schneider, R. (2013).
- Seguin, G. (1986). *'Terroirs' and pedology of wine growing*.
- Simmer, S. U. (2009). *Climatic conditions and their impact on viticulture in the Upper Moselle region*.
- Stafne, E. (2019, 06 20). *Vineyard Site Selection*. Récupéré sur GOrapes:
<https://grapes.extension.org/vineyard-site-selection/>

- STATEC. (2018). *L'agriculture Luxembourgeoise en chiffres*.
- Thompson, V., Coumou, D., . . . Wiel, K. v. (2024). *Changing dynamics of Western European summertime cut-off lows: A case study of the July 2021 flood event*. doi:10.1002/asl.1260
- Tscholl, S., Candiago, S., . . . Vigl, L. E. (2024). *Climate resilience of European wine regions*. nature communications. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-024-50549-w>
- Urhausen, S., Brienen, S., . . . Simmer, C. (2009). *Climatic conditions and their impact on viticulture in the Upper Moselle region*. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0059-z>
- Wang, E., & Engel, T. (1998). *Simulation of phenological development of wheat crops*. doi:[https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(98\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(98)00028-6)
- Wanjing Li, Q. X. (2021). *Comparisons of numerical phenology models and machine learning methods on predicting the spring onset of natural vegetation across the Northern Hemisphere*.
- White, H. G. (1919). *The Mosella of Ausonius*.
- Wild, M. (2009). Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. doi: <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>
- Zalom, F., Wilson, T., & Goodel, P. (1983). *Degree-Days: The Calculation and Use of Heat Units in Pest Management*.
- Zito, S., Leeuwen, C. v., & Bois, B. (2024). *Impact of training system, soil management and soil water holding capacity on vine water status in a changing climate over 60 years in the Cognac production area*. doi:10.20870/oeno-one.2024.58.4.8198
- Zufferey, V., Gindro, K., . . . Viret, O. (2023). *Anatomie et physiologie de la vigne*. Udine.

IX. Annexes

A. AOP



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Agriculture,
de la Viticulture et de la
Protection des consommateurs

Projet de règlement grand-ducal fixant certaines modalités d'application du règlement (CEE) n° 607/2009 de la Commission du 14 juillet 2009 fixant certaines modalités d'application du règlement (CE) n° 479/2008 du Conseil en ce qui concerne les appellations d'origine protégées et les indications géographiques protégées, les mentions traditionnelles, l'étiquetage et la présentation de certains produits du secteur vitivinicole et portant création de l'Office national des appellations d'origine protégées.

Vu le règlement (UE) n° 1308/2013 du Parlement européen et du Conseil du 17 décembre 2013 portant organisation commune des marchés des produits agricoles et abrogeant les règlements (CEE) n° 922/72, (CEE) n° 234/79, (CE) n° 1037/2001 et (CE) n° 1234/2007 du Conseil ;

Vu le règlement (CE) n° 607/2009 de la Commission du 14 juillet 2009 fixant certaines modalités d'application du règlement (CE) n° 479/2008 du Conseil en ce qui concerne les appellations d'origine protégées et les indications géographiques protégées, les mentions traditionnelles, l'étiquetage et la présentation de certains produits du secteur vitivinicole ;

Vu le règlement (CE) n° 1234/2007 du Conseil du 22 octobre 2007 portant organisation commune des marchés dans le secteur agricole et dispositions spécifiques en ce qui concerne certains produits de ce secteur ;

Vu la loi modifiée du 23 avril 1965 portant création d'un Fonds de solidarité viticole ;

Vu la loi du 21 janvier 1993 relative au rendement des vignobles ;

Vu la loi modifiée du 12 août 2003 portant réorganisation de l'Institut viti-vinicole ;

Vu l'avis de la Chambre d'Agriculture ;

Vu l'avis de la Chambre de Commerce ;

Vu l'article 2, paragraphe (1), de la loi modifiée du 12 juillet 1996 portant réforme du Conseil d'Etat et considérant qu'il y a urgence ;

Sur le rapport de Notre Ministre de l'Agriculture, de la Viticulture et de la Protection des consommateurs et après délibération du Gouvernement en conseil ;

A r r ê t o n s :

Art. 1. L'étiquetage n'est pas obligatoire pour :

- a) Les vins et moûts transportés entre deux ou plusieurs installations de vinifications ou entre les vignes et les installations précitées d'une même entreprise située dans la même unité administrative ou les unités administratives limitrophes ;
- b) Les quantités de moûts de raisins et de vins ne dépassant pas 30 litres par lot et non destinés à la vente ;
- c) Les quantités de moûts de raisins et de vins destinés à la consommation familiale du producteur et de ses employés.

Art. 2. Pour pouvoir obtenir l'agrément en AOP-Moselle luxembourgeoise, le vin doit être soumis à un contrôle administratif portant sur le respect des conditions du cahier de charges établi par les groupements viticoles réunis dans l'AOP et des examens analytiques et organoleptiques.

L'exécution du contrôle administratif et des examens analytiques est confiée à l'Institut viti-vinicole et celle des examens organoleptiques à une commission de dégustation.

Art. 3. (1) La gestion financière, administrative et technique de la commission de dégustation est confiée à une commission de gérance dénommée Office national des appellations d'origine protégées (O.N.A.O.P.), désigné ci-après «Office».

L'Office exerce sa mission sous l'autorité de l'Institut viti-vinicole. Toute décision prise par l'Office doit être soumise pour approbation au ministre ayant dans ses attributions la viticulture, désigné ci-après par « ministre ».

(2) Les membres de l'Office sont nommés par le ministre qui fixe également la durée de leur mandat.

L'Office comprend :

a) six membres avec voix délibérative, dont :

- deux délégués des caves coopératives des vignerons groupées dans la société coopérative Les Domaines de Vinsmoselle, à nommer sur proposition de celle-ci ;
- un délégué de l'organisation professionnelle des vignerons indépendants, à nommer sur proposition de celle-ci ;
- un délégué des négociants en vin, à nommer sur proposition de l'organisation représentative des négociants en vin ;
- deux fonctionnaires de l'Etat, dont au moins un représentant de l'Institut vitivinicole.

b) deux membres avec voix consultative, dont :

- un délégué à nommer sur proposition de l'organisation représentative des consommateurs ;
- un délégué à nommer sur proposition de l'organisation représentative des hôteliers, restaurateurs et cafetiers.

Il est désigné suivant la même procédure un suppléant pour chaque membre de l'Office.

Le Ministre désigne le président parmi les membres fonctionnaires de celle-ci.

L'Office établit son règlement d'ordre intérieur qui a pour objet de déterminer le fonctionnement de la Commission de dégustation et des séances de dégustation ainsi que l'organisation du service technique et administratif. Il est soumis à l'approbation du Ministre.

(3) En vue des examens organoleptiques, le ministre désigne vingt-et-un candidats pouvant siéger dans la commission de dégustation. La durée du mandat de ces candidats est fixée par le ministre.

Parmi ces candidats figurent des représentants des vignerons de la société coopératives « Les Domaines de Vinsmoselle », des représentants de l'organisation professionnelle des vignerons indépendants, des représentants des négociants en vin, des représentants des consommateurs, des représentants de l'organisation

représentative des hôteliers, restaurateurs et cafetiers et des représentants du ministre choisis parmi les fonctionnaires d'Etat de l'Institut vitivinicole.

Les examens organoleptiques sont effectués par la commission de dégustation composée de sept membres à choisir aléatoirement parmi les vingt-et-un candidats nommés par le ministre. Chaque groupement figurant à l'alinéa précédent doit être représenté au sein de la commission de dégustation.

La commission de dégustation est présidée par un représentant du ministre.

Ne peuvent être candidats pour la commission de dégustation que les personnes ayant suivi une formation de dégustateur, organisée par l'Institut viti-vinicole ou ayant suivi une formation en œnologie ou qui ont été membres de l'ancienne commission de la marque nationale du vin luxembourgeois.

Un vin refusé de façon non unanime par la commission de dégustation peut être réévalué sur demande écrite du producteur par une commission d'appel. La décision de cette commission d'appel est définitive. La commission d'appel est composée de trois agents de l'Institut viti-vinicole, lesquels n'étaient pas présents lors de la dégustation dudit vin par la commission de dégustation.

Art. 4. Le produit qui a obtenu l'agrément en AOP-Moselle luxembourgeoise ne peut être commercialisé qu'en bouteille ou en récipient agréé par le Ministre. Le Ministre peut fixer la contenance des bouteilles et des récipients.

Art. 5. Le produit qui a obtenu l'agrément en AOP reçoit un numéro de contrôle établi par l'Institut viti-vinicole. Ce numéro de contrôle doit être indiqué sur l'étiquette du producteur, de manière bien séparée de toute autre indication, précédé par l'indication « AOP/L- ». Le numéro de contrôle peut également servir de numéro de lot.

Art. 6. Le produit qui a obtenu l'agrément en AOP doit porter le certificat d'agrément en AOP. Ce certificat est caractérisé par une étiquette rectangulaire à apposer sous forme de contre-étiquette sur les bouteilles ou les récipients. La partie centrale porte l'inscription AOP Moselle luxembourgeoise contrôlée par l'état. Le modèle de l'étiquette est reproduit en annexe I et la mise en place des étiquettes est reproduite en annexe V.

Art. 7. Tout produit portant le certificat d'agrément en AOP doit présenter sur l'étiquette comportant les indications obligatoires les termes « Appellation d'origine protégée – Moselle luxembourgeoise », de manière qu'ils se distinguent nettement de l'ensemble des autres indications. Ils doivent être indiqués en caractère de même type et de même dimension.

Le vin agréé en AOP avec ou sans mention traditionnelle doit porter sur l'étiquette du producteur le nom du cépage et l'année de récolte, à l'exception du vin commercialisé sans indication de cépage et, le cas échéant, sans indication de l'année de récolte. Toute autre présentation est considérée comme abusive.

Art. 8. L'utilisation du nom de la section de commune, de la commune ou du canton est réservé à tout vin de l'AOP-Moselle Luxembourgeoise avec indication du cépage et du millésime ainsi qu'à tout assemblage de l'AOP-Moselle Luxembourgeoise avec indication du millésime qui respecte un rendement de base non supérieur à 100 hl/ha sauf pour les variétés Elbling et Rivaner le rendement de base est fixé à 115 hl/ha. Si moins de 85% des raisins à partir desquels le vin a été produit ne proviennent que d'un seul canton l'indication « Moselle Luxembourgeoise » peut être utilisée en tant qu'unité géographique.

Art. 9. L'indication « Coteaux de » suivie du nom de la section de commune ou du nom de la commune ou du nom canton est réservé à tout vin de l'AOP-Moselle Luxembourgeoise avec indication du cépage et du millésime ainsi qu'à tout assemblage de l'AOP-Moselle Luxembourgeoise avec indication du millésime qui respecte un rendement de base non supérieur à 75 hl/ha et les raisins sont vendangés à la main.

Art. 10. L'indication du nom d'un lieu-dit précédée du nom de la section de commune est réservé à tout vin de l'AOP-Moselle Luxembourgeoise avec indication du cépage et du millésime et qui respecte un rendement de base non supérieur à 75 hl/ha et les raisins sont vendangés à la main.

Les vins vinifiés en rosé ou gris n'ont pas droit à l'indication du nom d'un lieu-dit.

Art. 11. Les seuls mentions traditionnelles pouvant être utilisées pour désigner les vins de l'AOP-Moselle luxembourgeoise sont : premier cru, grand premier cru, vendanges tardives, vin de paille, vin de glace et Crémant de Luxembourg. Pour les vins présentés sous l'AOP, l'indication simultanée de deux ou plusieurs mentions traditionnelles pour l'étiquetage est interdite.

Art. 12. Pour bénéficier de la mention traditionnelle premier cru, les rendements de base sont fixés à 85 hl de vin par hectare de vignoble en production et le vin doit être issu des cépages mentionnés en annexe II.

Art. 13. Pour bénéficier de la mention traditionnelle grand premier cru, les rendements de base sont fixés à 75 hl de vin par hectare de vignoble en production, le vin doit être issu des cépages mentionnés en annexe III et les raisins sont vendangés à la main.

Art. 14. Toutefois chaque année un rendement butoir peut être fixé par le Fonds de solidarité viticole afin de tenir compte de la qualité et de la quantité de chaque récolte, variables notamment selon les conditions climatiques.

Les rendements butoirs sont listés à l'annexe IV.

Art. 15. L'indication « Crémant de Luxembourg » doit être inscrit en caractères très apparents sur l'étiquette du producteur et les bouteilles doivent être fermées à l'aide d'un bouchon portant les mots «Crémant de Luxembourg» sur la partie contenue dans le col de la bouteille.

Art. 16. Les indications concernant l'embouteilleur et le lieu d'embouteillage, ou le cas échéant de l'importateur, peuvent être faites à l'aide d'un code agréé par l'Institut viti-vinicole.

Art. 17. La dénomination « Pinot » peut être utilisée pour désigner les vins bénéficiant de l'appellation d'origine protégée – Moselle luxembourgeoise provenant de l'assemblage de vins issus des variétés Auxerrois, Pinot blanc et Pinot gris.

Art. 18. L'indication « vieilles vignes » est réservée à tout vin issu de l'AOP Moselle Luxembourgeoise avec indication du cépage et du millésime à condition que le vin soit issu des raisins provenant d'une vigne qui a au moins 35 ans d'âge et dont l'année de plantation est déclarée au casier viticole.

Art. 19. Le vin auquel l'agrément en AOP avec ou sans mention traditionnelle a été conférée doit être embouteillé ou soutiré en récipients dans un délai de 9 mois, à

défaut de quoi, le droit de porter l'étiquette certifiant l'agrément en AOP avec ou sans mention traditionnelle est retiré.

Art. 20. Les agents de la section s'occupant « de la surveillance et du contrôle de l'exécution des prescriptions légales et réglementaires concernant les produits viticoles » de l'Institut viti-vinicole exercent un contrôle quant à l'utilisation de l'AOP.

En vue de faciliter ce contrôle, les bénéficiaires de l'AOP doivent permettre l'accès de leurs locaux aux agents de l'Office. Ces agents peuvent prélever des échantillons de vin et prendre inspection des livres et registres de mouvement des vins.

Art. 21. Les membres de l'Office et les membres de la commission de dégustation sont soumis au secret professionnel en ce qui concerne les données matérielles et personnelles recueillies en exécution de leur mission.

Art. 22. Il est interdit :

1. d'employer l'étiquette certifiant l'agrément en AOP sur des papiers d'affaires, enveloppes et entêtes de lettres ;
2. de changer ou d'altérer d'une façon quelconque cette étiquette ;
3. de fabriquer et d'employer des étiquettes ou des collerettes d'un arrangement semblable à celui de l'AOP dans le but trompeur ;
4. de faire croire aux acheteurs qu'il s'agit de ladite AOP.

Art. 23. L'institut viti-vinicole est désigné comme instance de contrôle pour surveiller l'application des dispositions des règlements (CE) n° 1234/2007 et 607/2009 précités, du règlement (UE) n° 1308/2013 précité et du présent règlement.

Art. 24. Le règlement grand-ducal du 15 décembre 1978 fixant certaines modalités d'exécution du règlement (CEE) ° 2133/74 du conseil établissant les règles générales pour la désignation et la présentation des vins et des moûts de raisins est abrogé.

L'article 1^{er} du règlement grand-ducal du 15 septembre 1993 portant exécution de la loi du 21 janvier 1993 relative au rendement des vignobles est abrogé.

Le règlement grand-ducal modifié du 30 janvier 2001 portant réglementation de la marque nationale du vin et fixant les conditions d'attribution de cette marque est abrogé.

Art. 25. Les annexes font partie intégrante du présent règlement grand-ducal.

Art. 26. Notre Ministre de l'Agriculture, de la Viticulture et de la Protection des consommateurs est chargé de l'exécution du présent règlement, lequel sera publié au Mémorial.

Annexes

Annexe I

Reproduction du certificat. Le certificat est disponible en trois formats :

Largeur : 45 mm

Hauteur : 20 mm

Largeur : 60 mm

Hauteur : 25 mm

Largeur : 70 mm

Hauteur 30 mm

Couleurs



Pantone 426 M (20%)



Pantone 426 M (70%)



Pantone 426 M



Pantone 485 M



Pantone 871 M



Annexe II

Cépages ayant droit de porter la mention traditionnelle Premier cru

Rivaner, Sylvaner, Auxerrois, Pinot Blanc, Pinot Gris, Riesling, Chardonnay, Muscat-Ottonel et Gewürztraminer

Annexe III

Cépages ayant droit de porter la mention traditionnelle Grand premier cru

Sylvaner, Auxerrois, Pinot Blanc, Pinot Gris, Riesling, Chardonnay, Muscat-Ottonel et Gewürztraminer

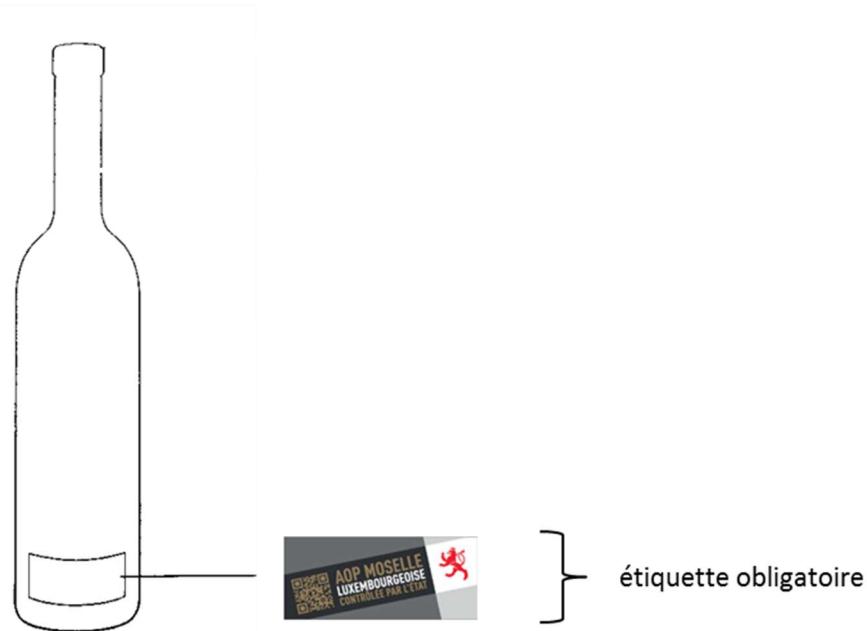
Annexe IV

Augmentation des rendements de base aux rendements butoirs

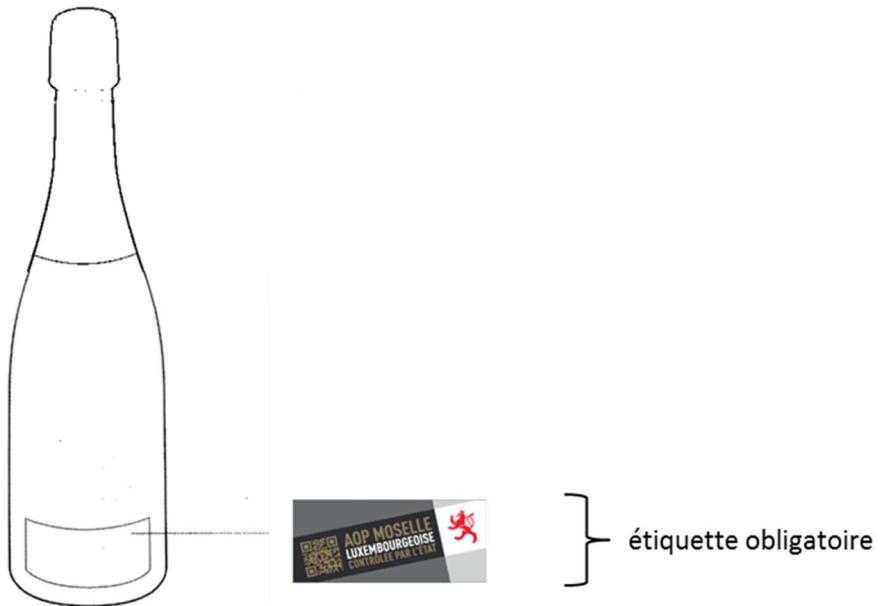
Rendement de base [hl/ha]	Rendement butoir [hl/ha]
115	140
100	120
85	100
75	90

Annexe V Mise en place des étiquettes obligatoires et facultatives

Vin tranquille :



Vins mousseux de qualité :



Annexe VI

Cahier des charges de l'AOP-Moselle luxembourgeoise

Commentaire des articles

Ad article 1^{er}. Le présent article définit pour quelle catégorie de vins et moûts l'étiquetage visé par le présent projet de règlement grand-ducal n'est pas obligatoire.

Ad article 2. Cet article indique à quels contrôles doivent se soumettre les vins afin de pouvoir bénéficier de l'agrément en AOP Moselle luxembourgeoise. Le second alinéa de l'article précise que le contrôle administratif et les examens analytiques seront effectués par l'Institut viti-vinicole.

Ad article 3. Par le premier paragraphe de l'article en question est créé l'Office national des appellations d'origine protégées (O.N.A.O.P.), lequel est sera en charge de la gestion financière, administrative et technique de la commission de dégustation.

Le second paragraphe fixe la composition et le fonctionnement de l’O.N.A.O.P. . Le troisième paragraphe fixe la composition et le fonctionnement de la commission de dégustation et prévoit aussi un voie d’appel sur demande du producteur pour un vin refusé de façon non unanime par la commission de dégustation.

Ad article 4. Les dispositions du présent article fixent que les vins en AOP-Moselle luxembourgeoise doivent être commercialisés dans une bouteille agréée par le Ministre.

Ad article 5. Cet article indique qu’un numéro de contrôle est attribué à chaque produit agréé en AOP permettant ainsi de retracer le vin.

Ad article 6. Le présent article requiert que sur chaque bouteille ou récipient contenant un produit agréé en AOP-Moselle luxembourgeoise doit figurer l’étiquette rectangulaire reproduite à l’annexe I du présent projet de règlement grand-ducal.

Ad article 7. Les dispositions du présent article précisent les mentions devant figurer sur l’étiquette principale du producteur.

Ad articles 8 à 10. Ces articles précisent dans le cadre de l’étiquetage les conditions d’utilisation du nom de la section de commune, de la commune ou du canton ainsi que de l’indication « Coteaux de » et du lieu-dit.

Ad articles 11 à 13. Les dispositions de ces articles précisent les conditions d’utilisation des mentions traditionnelles.

Ad article 14. Cet article attribue au Fonds de solidarité viticole la possibilité de fixer annuellement un rendement butoir dans les limites de l’annexe IV du présent projet de règlement grand-ducal.

Ad article 15. Cet article vise l’étiquetage des produits « Crémant ».

Ad article 16. Les présentes dispositions concernent les indications concernant l’embouteilleur et le lieu d’embouteillage ou l’importateur.

Ad article 17. Le présent article régit l’utilisation de la dénomination « Pinot ».

Ad article 18. Cet article régir l'utilisation de l'indication « vieilles vignes ».

Ad article 19. Les présentes dispositions fixent que le vin doit être embouteillé ou soutiré dans un délai de 9 mois à compter de l'obtention du de l'agrément en AOP.

Ad article 20. Le présent article vise les contrôles pouvant être effectués dans le cadre du présent projet de règlement grand-ducal.

Ad article 21. Cet article précise que les membres de l'Office et de la commission de dégustation sont soumis au secret professionnel.

Ad article 22. Le présent article indique les cas où l'utilisation ou la fabrication du certificat d'agrément ou d'un arrangement semblable sont prohibées.

Ad article 23. Cet article désigne l'Institut viti-vinicole comme organisme compétent pour surveiller l'application des dispositions de la législation communautaire visée et du présent projet de règlement grand-ducal.

Ad article 24. Dispositions abrogatoires se rapportant à trois règlements grand-ducaux.

Exposé des motifs et résumé

Le présent projet de règlement grand-ducal a pour but de mettre en œuvre les dispositions nécessaires pour l'application de l'« Appellation d'Origine Protégée – Moselle Luxembourgeoise », ci-après désigné par « AOP » et de créer l'Office national des appellations d'origine protégées (O.N.A.O.P.), ci-après désigné par « ONAOP ».

Le principal caractère de l'AOP est d'être axé sur le principe d'origine internationalement reconnu et se fondant essentiellement sur la législation communautaire. Jusque-là, c'est le système de la Marque Nationale qui était appliqué aux vins luxembourgeois. Ce système a été créé en 1935 et attestait depuis lors l'origine et la qualité du produit.

Dès le départ, la Marque Nationale a poursuivi deux buts :

encourager les viticulteurs à produire des vins de qualité, afin d'en tirer un meilleur prix,
et,

permettre au consommateur de se rendre compte, grâce au label Marque Nationale, qu'il achète un produit de qualité.

Les objectifs de la nouvelle AOP sont les mêmes, mais la voie pour y parvenir est différente. La « qualité dans le verre » est remplacée par le principe d'origine. Depuis l'existence de la Marque Nationale, les vins sont évalués selon le principe de la « qualité dans le verre ». Ce principe a tout à fait sa raison d'être, mais ne correspond plus à la situation actuelle. Ceci est amplement démontré par les vins des trois différentes chartes privées qui se sont créées durant les dernières décennies. Les responsables de ces trois initiatives se sont rendu compte du rôle déterminant du rendement pour obtenir un produit final de qualité.

L'introduction de l'AOP, laquelle remplace la « Marque Nationale – Appellation contrôlée », est non seulement le résultat de la mise en œuvre des prescriptions de l'UE, mais constitue également une réponse aux exigences plus pointues des amateurs de vin actuels. Le cadre primordial de l'AOP est l'attestation de qualité basée sur l'origine géographique du produit.

D'où dans un premier temps les groupements viticoles ont établi un cahier des charges conformément à la réglementation communautaire, lequel a été transmis à la Commission européenne en vue de l'enregistrement de l'AOP.

Dans un second temps le présent projet de règlement grand-ducal vise donc plus particulièrement la mise en œuvre de la certification de la qualité de cette AOP par l'Etat. Car les vins commercialisés sous l'AOP doivent remplir les clauses du cahier de charges et se soumettre à une analyse chimique et sensorielle. Ce n'est que sous ces conditions que les vins en question pourront porter l'AOP. D'après les dispositions du projet sous examen le contrôle administratif et les examens analytiques reviennent à l'Institut viti-vinicole, lequel est aussi l'autorité compétente dans le cadre de la mise en œuvre des dispositions communautaires relatives aux appellations d'origine protégées, tandis que l'examen organoleptique revient à une commission de dégustation

dépendant de l'Office national des appellations d'origine protégées (ancien Office national de l'appellation d'origine contrôlée «Moselle luxembourgeoise»). Cet office exerce sa mission sous l'autorité de l'Institut viti-vinicole.

Au niveau des dégustations un nouveau système de panel est mis en place. A travers le présent projet de règlement grand-ducal il est créé un pool de candidats pouvant potentiellement siéger dans la commission de dégustation, qui elle est sera uniquement composée de sept personnes. De ce fait, un tirage au sort aura lieu pour chaque commission de dégustation. Toutefois il faudra veiller à ce que chaque groupement pouvant siéger dans cette commission y soit représenté par au moins un représentant.

Comme dans chaque situation de vie où une est prise, il n'est pas à exclure qu'une erreur d'appréciation ait eu lieu et dans cet état d'esprit, le projet de règlement grand-ducal introduit dans le système de dégustation une commission d'appel composée uniquement d'agents de l'Institut viti-vinicole. Toutefois la possibilité de saisine de cette commission est rattachée à deux conditions. D'un côté, le producteur doit saisir la commission par écrit et de l'autre côté, le vin doit être refusé de façon non unanime.

Ce n'est qu'après avoir passé avec succès les trois contrôles que le vin en question peut prétendre au certificat de l'Etat attestant que les conditions de l'AOP sont remplies.

De même, le projet de règlement grand-ducal réglemente les conditions d'utilisation des différentes mentions traditionnelles et indications de qualité, telles que « Côtes de », « Coteaux de » ou le « Lieu-dit ». Ces indications de qualité qui sont des indications d'origine constituent le contrepoids à tous les vins sans origine précise, provenant du monde entier et souvent techniquement impeccables, mais dépourvus d'âme. D'où, plus l'indicateur d'origine se trouve au sommet de la pyramide de qualité, plus le terroir doit être perceptible.

Comme le consommateur souhaite une structuration de l'offre, ses attentes divergent selon qu'il se décide pour un produit standard de type « Côtes de », un produit de grande qualité de type « Coteaux de » ou un produit exceptionnel de type « lieu-dit » (les différents lieux-dits sont fixés dans le cadre du cahier de charges établi par la profession). Afin de donner la possibilité au consommateur de faire facilement la différence entre un vin standard et un vin de grande qualité ou un vin d'exception, le projet de règlement grand-ducal réglemente ces différents niveaux de qualité. Ainsi, les vins avec un rendement maximum de 75 hectolitres par hectare peuvent être étiquetés avec les indications d'origine « Coteaux de » ou « lieu-dit ». Ce sont les « Grands premiers

cru »s (la mention traditionnelle réglementée par la présent projet de règlement grand-ducal et pouvant être utilisé pour ces vins) de la « Moselle luxembourgeoise ». Le projet de règlement grand-ducal exige aussi que les raisins de ces vins soient vendangés à la main.

Les vins avec un rendement à la production situé entre 75 et 100 hectolitres par hectare, peuvent recevoir l'appellation « Côtes de ».

A côté de la mention traditionnelle « Grand premier cru » le projet sous examen réglemente également la mention « Premier cru », laquelle est destinée aux vins dont le rendement de base est fixé à 85 hectolitres par hectare.

De même que pour les indications de qualité, le projet de règlement grand-ducal fixe les conditions pour l'indication « vieilles vignes » et la dénomination « Pinot ».

Pour finir, le projet de règlement grand-ducal sous examen contient également un certain nombre de dispositions relatives à l'étiquetage des produits.

B. Variables du modèle 2

Nom de la variable ou plage	Description
Année	Année de référence pour les données climatiques.
Tmoy1 à Tmoy12	Températures moyennes mensuelles de janvier (Tmoy1) à décembre (Tmoy12) de l'année N.
Tmin1 à Tmin12	Températures minimales mensuelles de janvier à décembre de l'année N.
Tmax1 à Tmax12	Températures maximales mensuelles de janvier à décembre de l'année N.
Sol1 à Sol12	Durée d'ensoleillement mensuelle (en heures ou en jours, selon la source) de janvier à décembre.
DDi1 à DDi12	Degrés-jours de croissance mensuels (indice de chaleur accumulée) de janvier à décembre.
Tmoy1-2 à Tmoy11-12	Moyennes glissantes des températures moyennes entre mois consécutifs (ex : Tmoy1-2 = moyenne entre janvier et février).
Tmoy1-3, Tmoy1-4, etc.	Moyennes glissantes des températures de janvier à mars, avril, etc. Ces indicateurs permettent de caractériser l'accumulation thermique.
Tmin1-2 à Tmin11-12	Mêmes calculs que Tmoy, mais appliqués aux températures minimales mensuelles.
Tmax1-2 à Tmax11-12	Mêmes calculs que Tmoy, mais appliqués aux températures maximales mensuelles.
Sol1-2 à Sol11-12	Moyennes d'ensoleillement sur plusieurs mois. Par exemple, Sol1-3 = moyenne d'ensoleillement de janvier à mars.
DDi1-2 à DDi11-12	Moyennes ou cumuls de degrés-jours sur plusieurs mois.
FD8N-12N	Nombre de jours de gel (Freeze Days) pour août à décembre de l'année N-1. Sert à évaluer les stress hivernaux précoces.
Tmin8N-12N	Températures minimales mensuelles de août à décembre de l'année N-1. Utilisées pour évaluer l'entrée en dormance de la vigne.

D. Résultats bruts de la fonction « differential evolution »

Remich

```
== Résultats d'optimisation ==
    Cépage  C_star  F_star  Erreur_totale
0    DOYAuxerois  189.44  17.59      41.0
1    DOYElbling  191.67  17.07      40.0
2  DOYPinot_Blan 189.77  17.62      41.0
3  DOYPinot_Gris 191.67  17.16      44.0
4    DOYRiesling  187.13  18.13      45.0
5    DOYRivaner  189.69  17.62      41.0
6    DOYTraminer  196.54  16.48      44.0
7  DOYTraminer.1 196.54  16.48      44.0
```

Grevenmacher

```
== Résultats d'optimisation ==
    Cépage  C_star  F_star  Erreur_totale
0    DOYAuxerois  195.67  17.80      57.0
1    DOYElbling  201.38  16.02      49.0
2  DOYPinot_Blan 195.08  17.87      55.0
3  DOYPinot_Gris 198.70  16.81      57.0
4    DOYRiesling  196.91  17.48      63.0
5    DOYRivaner  198.67  16.81      53.0
6    DOYTraminer  198.65  16.82      53.0
7  DOYTraminer.1 198.65  16.82      53.0
```

Remich et Greven

	Cépage	C_star	F_star	Erreur_totale
3	DOYAuxerois	196.29	16.94	109.0
1	DOYElbling	196.99	16.49	102.0
4	DOYPinot_Blan	196.98	16.96	112.0
5	DOYPinot_Gris	195.89	16.84	111.0
6	DOYRiesling	198.71	16.72	121.0
2	DOYRivaner	198.68	16.72	106.0
0	DOYTraminer	197.16	16.47	106.0

	Cépage	Site	R ²	p-valeur	RMSE	EF	Biais
0	DOYAuxerois	Remich	0.77	3.5e-06	4.88	0.66	2.76
1	DOYAuxerois	Grevenmacher	0.75	7.4e-06	5.26	0.61	3.00
2	DOYElbling	Remich	0.74	8.2e-06	5.11	0.64	2.71
3	DOYElbling	Grevenmacher	0.70	2.7e-05	5.56	0.58	2.82
4	DOYPinot_Blan	Remich	0.75	6.4e-06	5.50	0.57	3.59
5	DOYPinot_Blan	Grevenmacher	0.74	1.1e-05	6.00	0.49	4.06
6	DOYPinot_Gris	Remich	0.70	2.6e-05	5.41	0.58	2.88
7	DOYPinot_Gris	Grevenmacher	0.68	5.2e-05	5.70	0.53	3.12
8	DOYRiesling	Remich	0.75	7.5e-06	5.27	0.59	3.24
9	DOYRiesling	Grevenmacher	0.77	3.5e-06	5.25	0.59	3.35
10	DOYRivaner	Remich	0.77	3.4e-06	5.19	0.64	3.18
11	DOYRivaner	Grevenmacher	0.79	2.1e-06	5.34	0.62	3.29

E. Meilleures variables pour le second modèle

Variables	R_squared	Max_VIF
['Tmoy3-4', 'Tmax9-11', 'Tmin4-6']	0,829674012	1,306901266
['Tmin4-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,829674012	1,306901266
['Tmax9-11', 'Tmoy3-4', 'Tmin4-6']	0,829674012	1,306901266
['Tmin3-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,827463086	1,692428175
['Tmin5', 'Tmoy3-4', 'Tmax10-12']	0,82722179	1,078434297
['Tmax10-12', 'Tmoy3-4', 'Tmin5']	0,82722179	1,078434297
['Tmax9-12', 'Tmoy3-4', 'Tmin4-6']	0,826942236	1,322457253
['Tmax11', 'Tmoy3-4', 'Tmin11']	0,826504498	4,093208207
['Tmin11', 'Tmoy3-4', 'Tmax11']	0,826504498	4,093208207
['Tmin5-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,824863535	1,140760649
['Tmax10-11', 'Tmoy3-4', 'Tmin5']	0,823231634	1,046559707
['Tmin4-5', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,822885781	1,252011693
['Tmin4-8', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,82238481	1,457006933
['Tmoy3-5', 'Tmin5', 'Tmax10-12']	0,821778088	1,594739989
['Tmin4-7', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,821612154	1,285597891
['Tmin3-5', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,820318199	1,634078185
['Sol3-4', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,82015743	1,387280434
['Tmoy9-11', 'Tmoy3-4', 'Tmin4-11']	0,819834952	2,434964345
['Tmin4-11', 'Tmoy3-4', 'Tmoy9-11']	0,819834952	2,434964345
['Tmin3-11', 'Tmoy3-4', 'Tmoy9-11']	0,818839437	2,312787914
['Tmoy4-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,818372552	1,867609028
['Tmin3-7', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,818357708	1,44636414
['Tmin4-9', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,817942155	1,50941414
['Tmin3-8', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,817091304	1,569728609
['Tmoy3-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,816892523	3,082766621
['Tmoy9', 'Tmoy3-4', 'Tmax10-11']	0,816862325	1,076819663
['Tmin5-7', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,816120814	1,183228172
['Tmin5-11', 'Tmoy3-4', 'Tmoy9-11']	0,814334737	2,447733266
['Tmin3-9', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,81431024	1,60596409
['Tmin5-8', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,813460049	1,245846609
['Ddi9-11', 'Tmoy3-4', 'Tmax11']	0,812878423	1,192129672
['Sol1-5', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,81282796	1,349857979
['Sol2-5', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,812731526	1,35402474
['Tmin3-12', 'Tmoy3-4', 'Tmoy9-11']	0,812356842	2,205099721
['Tmoy9-10', 'Tmoy3-4', 'Tmax11']	0,812149782	1,108768305
['Ddi9-10', 'Tmoy3-4', 'Tmax11']	0,812039247	1,123384932
['DDi9', 'Tmoy3-4', 'Tmax10-11']	0,811889136	1,085938415
['Tmin4-12', 'Tmoy3-4', 'Tmoy9-11']	0,811869324	2,246800764
['Tmin5-9', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,811625697	1,340468164
['Ddi9-12', 'Tmoy3-4', 'Tmax11']	0,811604469	1,202680084
['Tmax4-12', 'Tmoy3-4', 'Tmin5-6']	0,810660701	1,400651891
['Ddi3-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,81063208	2,143253137
['Ddi4-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,810546292	1,934444063
['Ddi2-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,810330244	2,124651936
['Tmax5-12', 'Tmoy3-4', 'Tmin3-6']	0,81024176	1,702929788

['Sol3-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,8101573	1,307510522
['Ddi1-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,810009379	2,13099025
['Tmin2-6', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,809793854	1,820550423
['Tmax4-11', 'Tmoy3-4', 'Tmoy4-8']	0,809730244	2,829465614
['Tmoy4-8', 'Tmoy3-4', 'Tmax4-11']	0,809730244	2,829465614
['Tmax5-11', 'Tmoy3-4', 'Tmin3-6']	0,809674487	1,694870693
['Sol1-4', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,809644988	1,325282179
['Ddi5-12', 'Tmoy3-4', 'Tmoy5-8']	0,80949281	4,083660557
['Tmin4-10', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,809133816	1,433502662
['Tmin9-11', 'Tmoy3-4', 'Tmoy9-11']	0,809015641	3,625708556
['Sol2-4', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,808986348	1,323428228
['FD1-4', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,808421671	1,153111387
['Tmoy4-7', 'Tmoy3-4', 'Tmax9-11']	0,808412136	1,778174693
['Tmin2-11', 'Tmoy3-4', 'Tmoy9-11']	0,807958337	2,140963715

F. Date de débourrement

Elbling	Rivaner	Pinot blanc
1966	121	1966
1967	124	1967
1968	115	1968
1969	126	1969
1970	131	1970
1971	108	1971
1972	123	1972
1973	131	1973
1974	100	1974
1975	122	1975
1976	121	1976
1977	124	1977
1982	125	1982
1984	124	1984
1985	127	1985
1986	129	1986
1987	126	1987
1988	118	1988
1989	109	1989
1990	114	1990
1991	104	1991
1992	119	1992
1993	119	1993
1994	117	1994
1995	119	1995
1996	119	1996
1997	115	1997
1998	119	1998
1999	115	1999
2000	116	2000
2001	124	2001
2002	112	2002
2003	111	2003
2004	117	2004
2005	113	2005
2006	110	2006
2007	103	2007
2008	122	2008
2009	108	2009
2010	117	2010
2011	94	2011
2012	118	2012
2013	123	2013
2014	101	2014
2015	114	2015

2016	123	2016	123	2016	123
2017	106	2017	107	2017	108
2018	109	2018	109	2018	109
2019	111	2019	111	2019	111
2020	103	2020	103	2020	102
2021	125	2021	127	2021	125
2022	113	2022	114	2022	112

Auxerois		Pinot gris		Riesling	
1966	122	1966	124	1966	124
1967	124	1967	122	1967	123
1968	115	1968	115	1968	117
1969	127	1969	126	1969	128
1970	130	1970	130	1970	132
1971	109	1971	109	1971	111
1972	124	1972	123	1972	125
1973	131	1973	133	1973	134
1974	103	1974	105	1974	104
1975	123	1975	123	1975	123
1976	122	1976	122	1976	123
1977	125	1977	125	1977	126
1982	128	1982	128	1982	126
1984	125	1984	126	1984	126
1985	128	1985	127	1985	128
1986	130	1986	130	1986	130
1987	126	1987	127	1987	126
1988	119	1988	119	1988	120
1989	110	1989	110	1989	111
1990	117	1990	117	1990	117
1991	107	1991	107	1991	107
1992	120	1992	120	1992	121
1993	120	1993	120	1993	121
1994	118	1994	118	1994	119
1995	120	1995	120	1995	120
1996	120	1996	119	1996	120
1997	116	1997	115	1997	115
1998	120	1998	119	1998	120
1999	118	1999	118	1999	119
2000	117	2000	117	2000	117
2001	125	2001	124	2001	125
2002	113	2002	113	2002	113
2003	111	2003	111	2003	111
2004	117	2004	115	2004	115
2005	114	2005	114	2005	115
2006	111	2006	110	2006	110
2007	104	2007	104	2007	104
2008	122	2008	122	2008	122
2009	108	2009	108	2009	108

2010	117	2010	117	2010	117
2011	95	2011	94	2011	95
2012	118	2012	117	2012	118
2013	124	2013	122	2013	124
2014	102	2014	101	2014	102
2015	115	2015	115	2015	115
2016	123	2016	123	2016	123
2017	108	2017	108	2017	109
2018	110	2018	109	2018	109
2019	111	2019	111	2019	111
2020	103	2020	102	2020	103
2021	126	2021	124	2021	124
2022	113	2022	113	2022	113

Traminer

1966	122
1967	121
1968	114
1969	127
1970	129
1971	109
1972	123
1973	133
1974	103
1975	122
1976	121
1977	124
1982	126
1984	125
1985	127
1986	129
1987	126
1988	118
1989	111
1990	116
1991	106
1992	119
1993	120
1994	117
1995	120
1996	119
1997	114
1998	119
1999	117
2000	116
2001	124
2002	112
2003	112

2004	113
2005	112
2006	109
2007	104
2008	122
2009	107
2010	117
2011	94
2012	117
2013	122
2014	100
2015	115
2016	122
2017	108
2018	109
2019	111
2020	103
2021	121
2022	112