

Faculté des sciences

Modélisation de l'impact des gelées tardives sur les vignes en Belgique.

Auteur : Loïc Delsinne

Promoteur : **Hugues Goosse**

Lecteurs : **Michel Crucifix, Marie-Laurence De Keersmaecker**

Année académique 2023-2024

Master [120] en sciences géographiques, orientation climatologie

Remerciements

Les remerciements occupent une place particulière dans ce mémoire, offrant une occasion précieuse d'exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation. Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien, les encouragements, et les connaissances partagées par un grand nombre d'individus dévoués. Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à tous ceux qui ont généreusement apporté leur aide et leur soutien tout au long de ce parcours académique.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon promoteur, Monsieur Goosse, pour son accompagnement au cours de cette dernière année. Sa présence, sa rigueur, sa disponibilité, et son suivi attentif ont été des atouts essentiels, tout comme ses conseils éclairés, qui m'ont permis de progresser efficacement dans ce projet.

Ensuite, j'aimerais exprimer ma sincère reconnaissance envers le doctorant Quentin Delaiden pour son suivi attentif, sa générosité de temps, ses précieux conseils, sa disponibilité sans faille, et son aide indispensable. Sa contribution active à ce projet a été d'une importance capitale.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude à ma famille pour leur confiance indéfectible et leur présence. Leur soutien, tant sur le plan émotionnel que matériel, a été une source d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours.

Enfin, je tiens à remercier Macha et mes amis pour le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de ce parcours académique ainsi que pour la réalisation de ce travail.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Revue de la littérature	3
2.1	La vigne et sa phénologie	3
2.2	Changement climatique et vignes	5
2.3	Les gelées tardives	5
2.4	Mesures de protection des vignobles et de la production	7
2.5	Objectifs et hypothèses	8
3	Matériels	10
3.1	Zone d'étude	10
3.2	Données : Température et phénologie	12
4	Méthodologie	13
4.1	Modèles phénologiques	13
4.1.1	Modèle Growing Degree Days (GDD)	13
4.1.2	Modèle de Bidabe et Richardson (BRIN)	13
4.2	Calcul des indices de gelées tardives	14
4.3	Qualité de la prédiction et incertitude	15
4.3.1	La Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP)	15
4.3.2	L'écart type des résidus	15
4.3.3	Test de Wilcoxon	16
4.4	Recalibration et validation des modèles	16
4.4.1	Modèle 1 (GDD)	16
4.4.2	Modèle 2 (BRIN)	17
4.4.3	Adaptation des valeurs des paramètres pour la Belgique	17
4.4.4	Cas d'étude pour validation en Belgique (Feluy)	17
5	Résultats et discussion	19
5.1	Calibration et validation des modèles en France	19
5.1.1	Validation des Modèles en Belgique : Cas d'Étude de Feluy	22
5.2	Analyse spatiale des dates de débourrement en Belgique.	22
5.3	Analyse spatiale de la dernière date de gel à 0°C et -2°C en Belgique.	27
5.3.1	Comparaison des données ERA5 avec les données d'observation IRM	29
5.3.2	Evolution de la fréquence de gel en Belgique depuis 1950.	31
5.4	Analyse spatiale de l'évolution du risque de gelées tardives en Belgique depuis 1950	33

5.4.1	Analyse de l'avancement de la date de débourrement prédit par le modele 1 et 2 entre 1950 et 2022	33
5.4.2	Analyse de l'avancement de la date de dernier gel à 0°C et -2°C entre 1950 et 2022	37
5.4.3	Comparaison des périodes de sécurité en Belgique entre 1950-1986 et 1987-2022	41
6	Conclusion	47
	Annexes	53
	Autobiographie	54

Chapitre 1

Introduction

La Belgique a toujours été une terre de vin. En effet, le vin y est cultivé depuis le 9^e siècle. La viticulture s'est étendue et a connu son apogée aux 14^e et 15^e siècles. Cependant, dès le 16^e siècle, cette discipline a décliné jusqu'à disparaître totalement, en raison du développement des routes et voies d'eau, facilitant les échanges commerciaux et menant à l'importation de vins français et italiens moins chers. Le climat a également changé, notamment avec le « petit âge glaciaire », période où les températures moyennes étaient plus basses qu'aujourd'hui, entraînant des hivers plus rigoureux et des étés plus frais (« Petit âge glaciaire », 2024). Ce climat n'était plus propice au développement des vignes (L'histoire de la viticulture en Belgique – Vin de Liège, domaine viticole, 2017).

Après des siècles de déclin, la viticulture belge a connu une renaissance au 20^e siècle, particulièrement à partir des années 1990, où l'activité a commencé à réellement se développer en Belgique. Le 21^e siècle est marqué par la professionnalisation de cette activité (Costes et al., 2023). Depuis les années 1990, la viticulture belge connaît un renouveau significatif. En 2023, la production de vin en Belgique a atteint un record de 3.434.604 litres (voir Figure 1.1), marquant une augmentation de près de 13 % par rapport à l'année précédente. Cette croissance est accompagnée d'une augmentation notable du nombre de viticulteurs, passant de 259 en 2022 à 290 en 2023, et de l'extension des vignobles, avec 891 hectares cultivés en 2023 contre 801 en 2022. Ces chiffres, illustrant l'essor continu et la professionnalisation croissante de la viticulture en Belgique au 21^e siècle, témoignent du dynamisme de ce secteur en pleine expansion (SPF Economie, 2023).

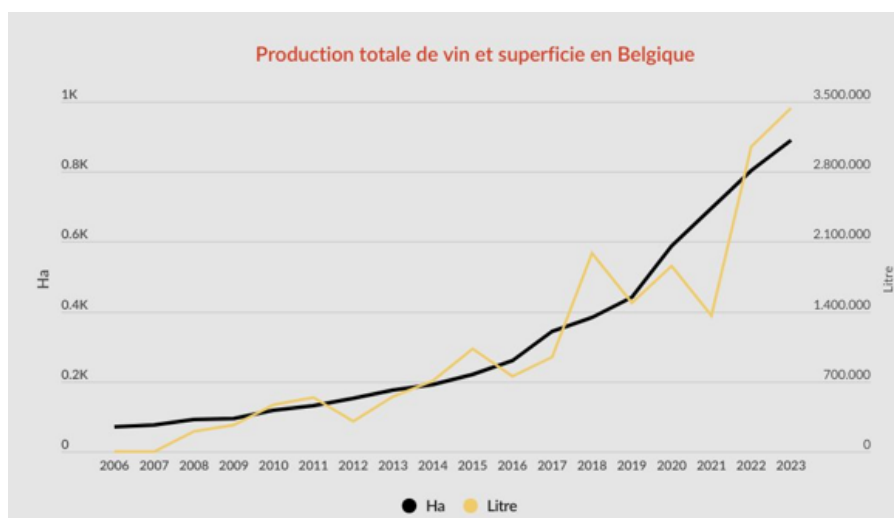


FIGURE 1.1 – Évolution temporelle de la production de vin belge en 2023 (SPF Economie, 2023).

Bien que la viticulture belge soit en pleine croissance, ce secteur doit faire face à des défis qui peuvent affecter la production annuelle. Un exemple concret est le gel tardif au printemps, un événement météorologique qui peut sévèrement diminuer les récoltes. En 2017, le vignoble des Agaises a, par exemple, perdu près de la moitié de ses récoltes à cause de ces gelées tardives (Vanel, 2021). De même, en grande partie à cause du gel tardif, en 2021 et malgré une augmentation de 20 % du nombre d'hectares cultivés et du nombre de viticulteurs, la production de vin a été l'une des plus faibles des dernières années (SPF Economie, 2023). De plus, selon le témoignage de Thomas Cordier, viticulteur belge situé à Feluy, les gelées tardives de la nuit du 23-24 avril 2024 ont causé la perte de 75 % des bourgeons de son vignoble.

En effet, les gelées tardives sont particulièrement problématiques pour les bourgeons des vignes, car ceux-ci, après avoir commencé à éclore, perdent leur protection naturelle et deviennent plus sensibles aux températures froides. Les effets des gelées varient en fonction des températures minimales enregistrées, un sujet encore largement discuté dans la littérature scientifique. Dès -2°C , on observe des impacts négatifs sur la production de raisin (Perry, 1998 ; Poling, 2008).

Le réchauffement climatique engendre un paradoxe intéressant : celui des chaleurs précoces et des gelées tardives (Combe, 2021). En effet, le réchauffement a des effets mixtes sur le risque de gelées tardives. D'une part, les jours de gel deviennent moins fréquents en raison de l'augmentation générale des températures. Cependant, le réchauffement global entraîne également un avancement du débourrement des vignes, augmentant potentiellement la période pendant laquelle les jeunes bourgeons sont exposés aux risques de gel tardif (Combe, 2021). Ce paradoxe souligne la complexité des défis climatiques auxquels la viticulture belge doit faire face, malgré sa croissance et la professionnalisation continue du secteur viticole.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer si le risque de gelées tardives en Belgique a augmenté, diminué ou est resté stable depuis 1950. Pour cela, il est essentiel d'examiner dans quelle hypothèse nous nous situons en évaluant trois hypothèses basées sur l'avancement relatif du débourrement par rapport aux dernières gelées : le risque de gelées tardives augmente, diminue ou reste stable. Cette analyse repose sur la prédiction des dates de débourrement à l'aide de modèles phénologiques, qui sont des outils permettant de prédire les phases de développement des plantes en fonction des conditions climatiques.

Par ailleurs, des objectifs secondaires seront également abordés. Ces objectifs visent à évaluer la capacité des modèles utilisés en France à prédire les dates de débourrement et à les calibrer et valider pour les conditions spécifiques de la Belgique.

Chapitre 2

Revue de la littérature

2.1 La vigne et sa phénologie

La vigne est une plante vivace, qui est une liane comprenant plusieurs éléments : un système racinaire puissant, un tronc frêle et flexible, des feuilles et des bourgeons se développant à partir des nœuds du tronc, et des fruits sous forme de grappes. Elle appartient à la famille des vitacées qui est divisée en différents genres, dont le genre *Vitis*, qui est cultivé dans l'hémisphère Nord (Europe, Amérique du Nord) (Madelin, 2004). L'espèce la plus cultivée est la *Vitis Vinifera*. Elle se compose d'une multitude de cépages. Le cépage est composé d'un ensemble de clones suffisamment apparentés les uns aux autres pour être confondus sous un même nom, dont le nombre est variable et/ou indéterminé (This & Boursiquot, 1999). En d'autres termes, c'est une variété de plant de vigne cultivée (cépage - Définitions, synonymes, prononciation, exemples | Dico en ligne Le Robert, s. d.). . Trois facteurs sont primordiaux pour la croissance des plantes (Choisnel, 2002). En effet, il y a la lumière solaire qui est essentielle à la réalisation de la photosynthèse. La température, en tant que facteur majeur de limitation, exerce une influence primordiale. Les seuils de température influençant les vignes varient selon les saisons, engendrant ainsi des conséquences diverses. En été, des températures trop élevées (supérieures à 42°C) peuvent endommager la grappe, tandis qu'en hiver des températures trop faibles (inférieures à -15°C) peuvent causer des lésions aux tissus des plantes. Enfin, au printemps, une température inférieure ou égale à -2,2°C peut entraîner le gel du bourgeon, mais cela sera détaillé plus amplement dans la section sur les gelées tardives. Enfin, l'eau participe à des réactions biochimiques spécifiques et à l'approvisionnement des plantes en éléments minéraux essentiels extraits du sol, indispensables à leur développement et à leur croissance (Pérarnaud, V., & Raynal, N, 1991).

La vie d'une vigne suit un rythme cyclique annuel, avec deux cycles distincts comme indiqué dans la figure 2.1. Durant la période hivernale, qui s'étend de mi-novembre à mars, la vigne entre en phase de repos, marquée par une absence d'activité physiologique. En revanche, le cycle végétatif, actif de mars à mi-novembre (Reynier, 2011), est caractérisé par une activité physiologique soutenue. La transition entre le repos hivernal et le cycle végétatif marque la sortie de la dormance de la plante, état durant lequel la croissance est suspendue mais les activités physiologiques se poursuivent (Madelin, 2004). Ce moment clé est défini par les stades repères de Baggiolini et Eichhorn et Lorentz (Reynier, 2011). Baggiolini a établi son système en 1952, classant les stades en lettres, tandis qu'Eichhorn et Lorentz ont développé un système plus détaillé, numérotant les stades de 01 à 50, offrant une plus grande précision avec des stades intermédiaires supplémentaires (Reynier, 2011). Pour définir le débourrement, la plupart des chercheurs recommandent l'utilisation du stade B selon l'échelle de Baggiolini ou du stade 03 selon l'échelle de Combe, bien que certains préfèrent le stade C ou 05 selon l'échelle utilisée. Dans

leur recherche sur la "qualité prédictive des modèles de débournement végétatif dans la vigne (*Vitis vinifera*)", Iñaki García de Cortázar Atauri, Nadine Brisson et Jean Pierre Gaudillere ont utilisé le stade de débournement tel que défini par Galet (1976). Ce stade est décrit comme le moment où 50 % des bourgeons d'une vigne donnée ont éclo. Ils soulignent toutefois les difficultés à s'accorder sur une définition commune du stade, ce qui peut entraîner des variations d'observation sur plusieurs jours. Dans leur étude, ils ont opté pour le stade C selon l'échelle de Baggiolini (équivalent au stade 4 sur l'échelle de Combe).

Par ailleurs, dans l'étude de C. Riou intitulée "L'impact du climat sur la maturation du raisin : application au zonage de la teneur en sucre dans la communauté européenne", le critère retenu pour le débournement était également le moment où 50 % des bourgeons ont éclo, marquant la transition entre la fin du stade B de Baggiolini et le début du stade C.

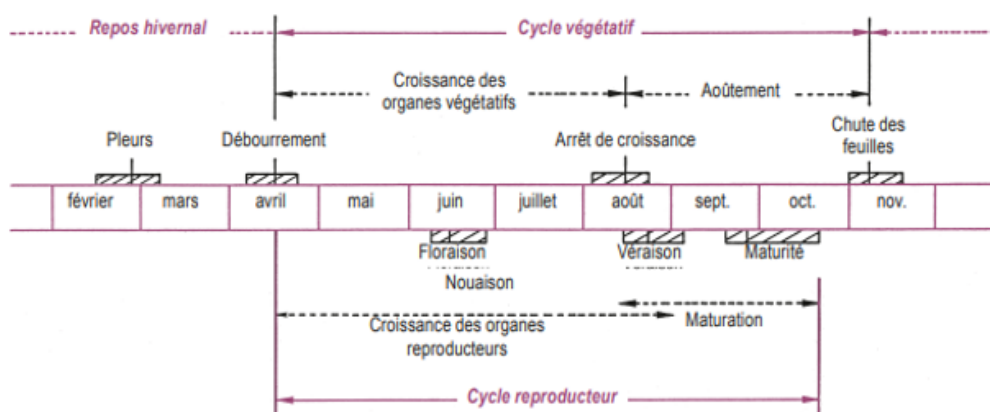


FIGURE 2.1 – Cycle de la vie d'une vigne (Reynier, 2011)

Le débournement commence bien avant d'être visible et s'accélère fin février-mars, entraînant le gonflement de l'œil latent, l'ouverture des écailles et l'apparition de la bourre. Bien que le bourgeon semble inactif pendant l'hiver, il reste physiologiquement actif. La croissance débute lorsque la température ambiante atteint un certain seuil. On distingue deux types de seuils : le seuil de croissance réelle (4-5 °C) et le seuil de croissance apparente (8-12 °C, généralement 10 °C), également appelé "zéro de végétation" (Reynier, 2011). Les autres stades phénologiques importants sont la floraison, qui se déroule généralement durant le mois de juin. Ensuite vient la véraison et enfin la maturité. Cependant, dans le cadre de cette étude, uniquement la prédiction de la date de débournement sera étudiée.

Le cépage joue un rôle important dans le débournement. Chaque cépage de vigne se caractérise par une période de débournement qui peut être soit précoce, soit tardive. Les cépages à débournement précoce, comme le Chasselas et le Pinot Noir, démarrent leur croissance plus tôt dans la saison. Ils sont sensibles aux températures modérées du printemps et de l'été, ce qui les rend particulièrement vulnérables aux variations climatiques. En revanche, les cépages à débournement tardif, tels que le Grenache et le Mourvèdre, nécessitent une période de maturation plus longue. Ces variétés sont mieux adaptées aux climats chauds, car elles tolèrent bien les températures élevées et les périodes de sécheresse (Bosshart, 2020).

2.2 Changement climatique et vignes

Les preuves du changement climatique, largement attribuable aux activités humaines, sont désormais incontestables. Les émissions de gaz à effet de serre depuis l'époque préindustrielle ont entraîné un déséquilibre radiatif dans le système climatique. Ce dernier a contribué à une augmentation de la température (Ipcc, 2023).

En Belgique, les projections climatiques indiquent des augmentations significatives des températures annuelles d'ici 2100. Selon les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre présentés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC) et corroborés par l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), la température moyenne en hiver pourrait augmenter de 1,5 à 4,4 °C et la température moyenne en été 2,4 à 7,2 °C. Les pics de température en août pourraient atteindre jusqu'à +8,9 °C dans le scénario le plus pessimiste si les émissions ne sont pas réduites (RMI - Climate Projections, s. d.). Ces projections de températures, si elles sont atteintes, auraient des conséquences sur les vignes. En effet, le développement et la préservation de la vigne dans une région dépendent souvent de trois facteurs principaux : le sol, le climat et l'intervention humaine (Madelin, 2004). Effectivement, la température est un élément clé dans le développement des plantes et leurs cycles phénologiques (Parker et al., 2013).

Les effets du changement climatique sur la viticulture sont variés. Une revue récente souligne que les hausses de température et la fréquence accrue des sécheresses impactent la phénologie de la vigne et la composition des raisins, accélérant les événements phénologiques et la maturation des baies (van Leeuwen et al., 2019). Un autre effet potentiel est que le débourrement anticipé, dû au réchauffement climatique, peut accroître la vulnérabilité des vignes aux gelées tardives. C'est cet effet-là qui sera étudié tout au long de cette étude.

En Californie, l'augmentation des températures avance la période de débourrement, modifiant ainsi le calendrier viticole et augmentant le risque de gelées printanières. Une étude de l'Université de Californie à Davis a démontré que des températures plus élevées peuvent provoquer un débourrement plus précoce, exposant ainsi les jeunes pousses au risque de gelées tardives. Cependant, les pratiques agricoles peuvent être adaptées pour réduire ce risque. Ces jeunes pousses étant très sensibles au gel, cela peut entraîner des pertes de rendement importantes (Poni et al., 2022).

En France, une étude de Sgubin et al. (2018) s'est concentrée sur les gelées tardives dans le contexte du changement climatique. Elle révèle que le réchauffement climatique avance la date de débourrement des vignes, augmentant ainsi les risques de dommages dus aux gelées tardives. Cependant, l'étude indique également que certaines années pourraient voir une diminution du risque en raison de conditions météorologiques variées. Les modèles climatiques de l'étude prévoient une augmentation des températures en France, ce qui entraîne des dates de dernière gelée et de débourrement plus précoces. Cependant, les projections varient considérablement selon les modèles phénologiques utilisés, rendant l'évaluation des risques incertaine. Les régions telles que l'Alsace, la Bourgogne et la Champagne sont particulièrement vulnérables, mais elles peuvent aussi bénéficier de conditions favorables certaines années. Ainsi, bien que les risques soient accrus, ils ne sont pas uniformes et dépendent de nombreux facteurs (Sgubin et al., 2018).

2.3 Les gelées tardives

Pour l'Institut Royal Météorologique, un jour de gel est défini lorsque la température minimale atteint un niveau inférieur à 0°C au cours d'une journée (Institut Royal Météorologique, s. d.). Cela

provoque la cristallisation/congélation de l'eau contenu dans les organes de la plante (Clément, 1981). En effet, le gel peut se former dans divers compartiments des plantes : entre les cellules, autour des cellules, ou à l'intérieur même des cellules. L'eau dans ces zones contient des substances dissoutes qui abaissent la température à laquelle elle gèle, souvent en dessous de 0°C (Pérarnaud & Raynal, 1991). Les espaces entre les cellules sont les premiers à geler, ce qui augmente la concentration des solutés et crée un déséquilibre osmotique. Ce déséquilibre pousse l'eau à migrer des cellules vers les espaces intercellulaires. Une perte d'eau importante peut perturber les fonctions cellulaires, entraîner la rupture des membranes et finalement la mort des cellules. Les cristaux de glace peuvent également endommager les cellules par leur action mécanique (Clément, 1981 ; Madelin, 2004). La différence entre les températures critiques, définies comme celles qui peuvent entraîner la destruction d'organes (Chapuis & Mille, 2001, cité dans Madelin, 2004), en hiver et au printemps dépend de la quantité d'eau dans les plantes. En hiver, les plantes sont en dormance, et leurs cellules sont plus petites. Au printemps, les cellules sont actives et plus grandes. Ainsi, la température critique varie selon le stade de développement de la plante (Madelin, 2004).

Dans le cadre de ce mémoire, l'étude portera spécifiquement sur les gelées printanières. Ces gelées se manifestent généralement durant les mois d'avril et de mai dans notre hémisphère (Vinispi, s. d.). Elles posent un risque considérable pour les bourgeons des vignes, qui, après avoir commencé à éclore, deviennent plus sensibles aux températures froides en raison de la perte de leur protection naturelle. Les effets des gelées varient en fonction des températures minimales enregistrées, un sujet encore largement discuté dans la littérature scientifique. Dès -2°C, on observe des impacts négatifs sur la production de raisin. Durant la phase de débourrement, une température de -2,2°C peut tuer 50 % des bourgeons (Perry, 1998). De plus, même des températures proches de 0°C peuvent endommager les jeunes tissus de la vigne (Poling, 2008). Entre -3°C et -5°C, les gelées blanches peuvent gravement affecter les jeunes pousses, causant des dommages importants à la récolte, même si les vignes ne meurent pas. Enfin, des températures comprises entre -7°C et -9°C, appelées gelées noires, présentent un risque élevé de mortalité pour les vignes (IFV, s.d.).

Le réchauffement climatique engendre un paradoxe. Le paradoxe des chaleurs précoces et des gelées tardives (Combe, 2021). Ce changement induit un réchauffement moyen à l'échelle globale mais modifie également les caractéristiques des événements extrêmes (Ipcc, 2023). Et cela, a des effets mixtes sur le risque de gelées tardives. D'une part, les jours de gel deviennent moins fréquents en raison de l'augmentation générale des températures. Cependant, le réchauffement global entraîne également un avancement du débourrement des vignes, augmentant ainsi la période pendant laquelle les jeunes bourgeons sont exposés aux risques de gel tardif. Des études récentes montrent un avancement des dates de débourrement des vignes d'environ 13 à 19 jours dans certaines régions d'Europe, notamment dans la région de la Vénétie en Italie. Cette tendance est attribuée à l'augmentation des températures liée au changement climatique, ce qui accentue le risque de gelées printanières pour les jeunes pousses (Tomasi et al., 2011). Bien que les jours de gel deviennent moins fréquents, le risque de gelées tardives peut augmenter car les bourgeons débourrent plus tôt, avant que les risques de gelées ne soient complètement passés. Cette situation est particulièrement critique dans les régions continentales comme l'Alsace, la Bourgogne et la Champagne (Unterberger et al., 2018). En Suisse, par exemple, le risque de gelées tardives dans la vallée du Rhône suisse pourrait soit diminuer, soit augmenter, selon les projections climatiques et la région spécifique. À Sion, un site plus chaud, le risque pourrait diminuer légèrement, tandis qu'à Aigle, un site plus frais, le risque pourrait augmenter (Meier et al., 2018). En France, les vignes en Bourgogne et Franche-Comté ont une date de débourrement qui a tendance à avancer plus rapidement que la date de dernier gel pour toutes les sous-régions, années et MCG's (Modèles

climatiques globaux) pour la période 1980-2005 et 2020-2050. En effet, l'étude réalisée par Catinca Gavrilescu et al. (2019) examine le risque de gel pour la viticulture en Bourgogne-Franche-Comté. Elle révèle que quatre sous-régions, à savoir la Côte de Nuits, la Côte de Beaune, la Côte Chalonnaise, et le Mâconnais, présentent une augmentation du risque de gel d'ici 2050. Il est intéressant de noter que de nombreuses recherches révèlent des résultats divergents sur l'incidence des gelées tardives sur les cultures, avec parfois une augmentation du risque et d'autres fois une diminution, selon la localisation géographique.

Cette diversité observée dans la fréquence des gelées peut être attribuée à de nombreux facteurs environnementaux locaux tels que l'altitude, la topographie et la proximité des masses d'eau. Les travaux de Scheifinger et ses collaborateurs, publiés en 2003, offrent un approfondissement sur ce sujet en examinant la distribution spatio-temporelle des gelées tardives. Leur étude met en évidence une grande disparité dans la répartition de ces événements climatiques à travers l'Europe centrale, soulignant la rareté des observations systématiques des dommages causés par le gel. Cette variabilité significative confirme l'importance de prendre en compte les conditions locales lors de l'évaluation des impacts des gelées tardives sur les cultures. Selon l'IRM, les normales du nombre de jours de gel et de gel sévère en Belgique affichent une distribution relativement uniforme en basse et moyenne Belgique, alors que les variations deviennent plus marquées en haute Belgique, notamment dans les Hautes Fagnes. Cette distribution hétérogène des gelées tardives dans le temps et l'espace est illustrée dans la figure 2.2 de l'Atlas climatique. Ces observations sont cruciales pour comprendre et anticiper les risques associés aux gelées tardives dans des contextes agricoles diversifiés.

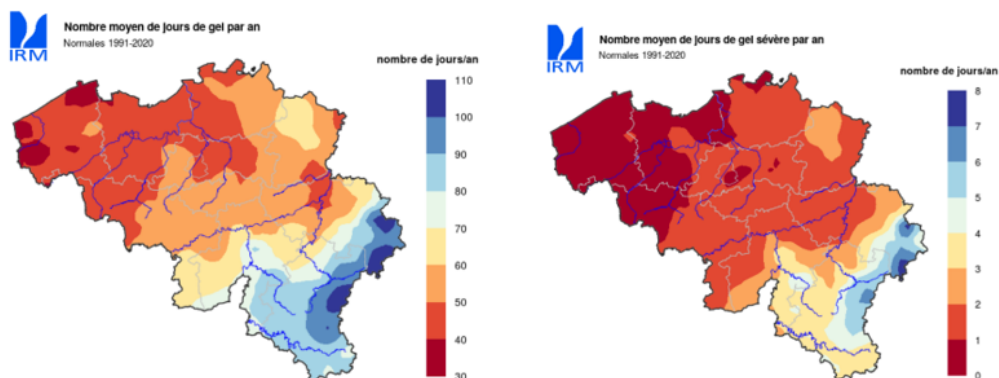


FIGURE 2.2 – Cartes du nombre moyen de jours de gel par an en Belgique pour les périodes 1991-2020. Carte A (à gauche) : Normales de gel pour 1991 à 2020. Carte B (à droite) : Variation du nombre de jours de gel entre les années 1991 et 2020 (IRM, 2020).

2.4 Mesures de protection des vignobles et de la production

Le réchauffement climatique engendre une avancée du cycle phénologique des vignes (Cantat et al., 2019). Cela peut engendrer au printemps une période de risque. En effet, avec l'avancement de la date de débourrement, le risque de gels pour les vignes augmente. C'est une période charnière avec des enjeux majeurs pour le bon fonctionnement du vignoble. Des mesures peuvent être adoptées afin de limiter les dégâts liés aux températures négatives. Elles peuvent être préventives ou curatives.

Comme évoqué dans la section précédente, les vignes sont résistantes aux températures très basses durant le repos végétatif, supportant des températures inférieures à -10°C . Durant le printemps, les températures sont plus douces mais la plante est plus sensible. La tolérance varie également en fonction

de l'hygrométrie. En effet, plus l'air est sec, plus la plante pourra résister. Entre -4°C et -5°C pour l'air sec et dans les fonds de vallées, cela résiste uniquement à -2°C à -3°C étant donné que l'air y est plus humide (Vinispi, s. d.).

La première mesure préventive serait le choix de la parcelle. En effet, certaines parcelles sont situées dans des zones où l'air froid peut s'accumuler (Rochard et al., 2019). Il y a également les pratiques culturales, comme le retard de la taille jusqu'au début avril, permettant de retarder le débourrement (Vinispi, s. d.). Selon Cornelis Van Leeuwen, il est également conseillé d'utiliser les porte-greffes, les cultivars et les clones les plus adaptés aux conditions climatiques du lieu de plantation du vignoble (van Leeuwen et al., 2019). Un choix de cépages ayant un débourrement plus tardif est également recommandé (Vinispi, (s. d.).

Les méthodes dites curatives sont des mesures de protection directe mises en place lors d'un événement de gel tardif (Vinispi, (s. d.). La première méthode est le principe du brassage de l'air. L'air froid, plus dense, se retrouve au niveau des bourgeons des vignes. Le brassage d'air a pour but d'homogénéiser l'air chaud situé quelques mètres au-dessus du sol avec l'air froid. Pour réaliser cela, il existe différentes possibilités comme les tours de gel, qui peuvent être fixes ou mobiles. Il est également possible de réaliser ce brassage grâce à un hélicoptère (Rochard et al., 2019).

Selon la gravité du gel, certaines méthodes sont plus adaptées que d'autres. Par exemple, l'utilisation de bougies et de chaufferettes est efficace uniquement si les températures ne sont pas inférieures à -4°C à -5°C . Cependant, cette méthode est controversée en raison des fumées polluantes qu'elle dégage et de la main-d'œuvre nécessaire pour l'allumage (Vinispi, (s. d.). Une autre méthode serait l'aspersion d'eau. L'apport continu d'eau permet de maintenir la température autour du bourgeon à environ 0°C . C'est une méthode efficace qui peut être utilisée lorsque les températures atteignent -7°C à -9°C (Rochard et al., 2019). Ces méthodes ne sont pas uniquement utilisées en Europe ; les viticulteurs californiens utilisent également les machines à vent pour réchauffer l'air autour des vignes (Poni et al., 2022).

2.5 Objectifs et hypothèses

L'objectif principal de ce mémoire est de déterminer si le risque de gelées tardives a augmenté au fil des années en Belgique. Pour cela nous utiliserons trois hypothèses théoriques qui sont adaptés depuis l'étude de Yann Vitasse (2018). La première hypothèse stipule que l'avancement du débourrement des bourgeons est proportionnel à l'avancement de la dernière gelée printanière. Autrement dit, même si le débourrement des vignes se produit plus tôt, la période de gelée se termine également plus tôt, conservant ainsi un équilibre. Dans cette hypothèse, le risque est stable et n'a pas augmenté au fil des années. La deuxième hypothèse serait une diminution du risque. Cette hypothèse suggère un avancement du débourrement qui serait moins rapide que celle de la dernière gelée printanière. En conséquence, les vignes sont moins susceptibles d'être exposées aux gelées tardives, réduisant donc les dommages potentiels. La dernière hypothèse est celle où le risque augmente. Dans ce cas-là, le débourrement des bourgeons avance plus vite que celui du dernier gel printanier. Cela aurait pour conséquence d'augmenter l'exposition des vignes aux dernières gelées tardives et donc d'être plus susceptible de subir des dégâts de cet événement. Pour cela, il a fallu prédire les dates de débourrement de vignes (*vitis vinifera*) et la date de dernier gel à 0° et -2°C . Pour réaliser la prédiction des dates de débourrement, deux modèles ont été utilisés. Le premier est un modèle simple qui se base sur l'accumulation de température à partir d'une valeur seuil, nommé modèle GDD (Growing Degree Days). Tandis que le deuxième prend en compte la dormance en calculant la date de sortie de dormance qui sera la date de départ de l'accumulation de température (Brin). D'autres objectifs seront également atteints dans le

but d'atteindre l'objectif principale comme la validation des modèles sur des observations Française. Mais également la validation du modèle en Belgique grâce à une observation témoin fournie par un vigneron volontaire. Ces objectifs consistent à valider la capacité du modèle phénologique à simuler le débourrement en Belgique.

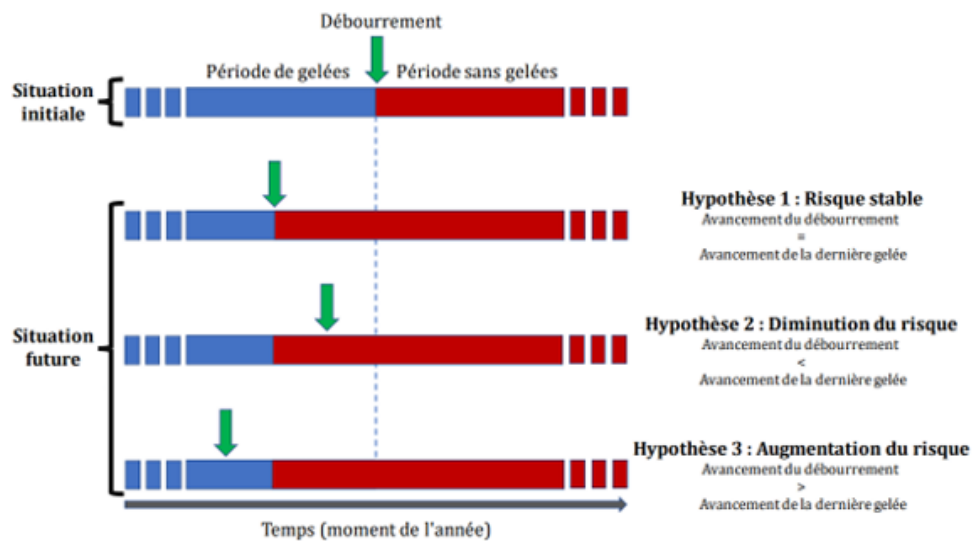


FIGURE 2.3 – Hypothèses théoriques de l'effet du réchauffement climatique sur le risque de gelées tardives (adapté de Vitasse et al., 2018 et inspiré de Borlon, 2022).

Chapitre 3

Matériels

3.1 Zone d'étude

La première zone d'étude concerne la France, choisie pour deux raisons principales. D'une part, la France dispose d'une vaste base de données phénologiques en libre accès, facilitant ainsi l'étude et la prédiction des dates de débourrement des vignes. D'autre part, la diversité climatique de la France, incluant des climats similaires à ceux de la Belgique, tels que le climat océanique tempéré et le climat tempéré, en fait une zone d'étude pertinente (Joly et al., s. d.). Plus précisément, cinq sites ont été sélectionnés en France pour calibrer et valider les modèles. Ces sites sont répartis dans cinq régions différentes, chacune présentant des climats variés : la Champagne, le Bordelais, l'Anjou, le Languedoc et l'Alsace. Les observatoires se situent à Angers ($47^{\circ} 1'N$, $0^{\circ} 13'E$; climat océanique), Epernay ($49^{\circ} 1'N$, $3^{\circ} 94'E$; climat tempéré océanique), Montpellier ($43^{\circ} 33'N$, $3^{\circ} 57'E$; climat méditerranéen), Bordeaux ($45^{\circ} 22'N$, $0^{\circ} 77'E$; climat océanique avec tendance maritime) et Colmar ($48^{\circ} 2'N$, $7^{\circ} 36'E$; climat continental) (TEMPO - Portail de données phénologiques, s. d.).

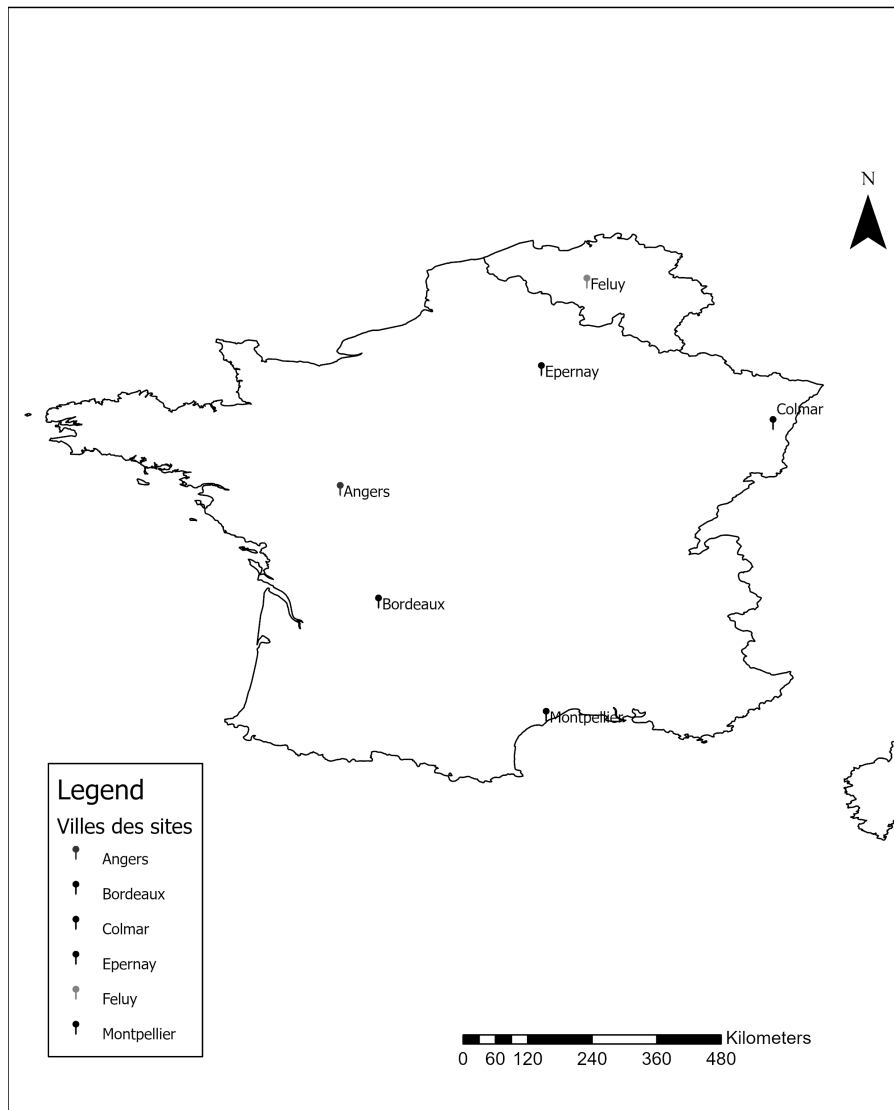


FIGURE 3.1 – Carte de la localisation des sites des vignes en France et en Belgique.

Cette diversité permet de couvrir une grande variabilité climatique pour ensuite l’adapter à la seconde zone d’étude, la Belgique. Ces sites ont été sélectionnés en raison de la disponibilité des données phénologiques en accès libre pour trois d’entre eux, tandis que pour les deux autres, une demande a été nécessaire via le portail de données TEMPO (le portail de la base de données phénologiques PHENOCLIM produite par l’INRA). De plus, il convient de noter que jusqu’à 10 cépages différents ont été étudiés dans chacune des régions viticoles sélectionnées en France. Cette variété de cépages offre une perspective plus complète sur les réponses phénologiques des vignes aux conditions climatiques variées de chaque région, permettant ainsi de prendre en compte des cépages à débourrement précoce ainsi que d’autres à débourrement tardif (García de Cortázar-Atauri et al., 2009).

La deuxième zone d’étude est en Belgique, à Feluy (50° 56’N, 4° 25’E ; climat tempéré océanique), un village situé dans la commune de Seneffe en région wallonne, choisi comme cas d’étude. En Belgique, il n’existe pas de site regroupant des données en libre accès des dates de débourrement, comme en France avec la base de données PHENOCLIM. Afin d’en obtenir, une centaine de vigneron ont été contactés

via le site vigneronsofWallonie.be. Cependant, la plupart ne tenaient pas de registre des dates de débourrement ou d'autres événements phénologiques. Seul un viticulteur de la commune de Seneffe a partagé ses données, couvrant les années 2020 à 2023. N'étant pas un nombre suffisant d'observations, il a fallu utiliser les données disponibles en France pour tester et calibrer les deux modèles phénologiques.

3.2 Données : Température et phénologie

Pour utiliser calibrer et valider ces deux modèles, les données nécessaires incluent la température et les données phénologiques. La température est obtenue à partir de la réanalyse ERA5-Land, qui fournit une vision cohérente de l'évolution des variables terrestres sur plusieurs décennies avec une résolution améliorée par rapport à ERA5. Cette réanalyse est produite en recalculant la composante terrestre de la réanalyse climatique ERA5 de l'ECMWF, en combinant les données du modèle avec des observations mondiales pour créer un ensemble de données complet et cohérent, décrivant précisément le climat passé. La température de l'air à 2 mètres au-dessus de la surface est utilisée comme variable, calculée en interpolant entre le niveau de modèle le plus bas et la surface terrestre, tout en tenant compte des conditions atmosphériques. La résolution horizontale de ces données est de 9 kilomètres. Les données couvrent la période allant de 1950 à 2022. Ensuite, nous disposons de données spatiales sur les températures minimales quotidiennes fournies par l'IRM (Institut Royal Météorologique) en 2023. Ces données spatialisées sont générées à partir d'une interpolation spatiale utilisant la méthode du krigeage à partir d'un réseau de stations d'observation réparties sur le territoire belge. Elles couvrent la région wallonne avec une grille, offrant une résolution d'environ 5 km, sur la période s'étalant de 1954 à 2022.

Les données phénologiques pour la France fournissent les dates de débourrement, extraites de la base de données PHENOCLIM, qui répertorie les dates des différents stades phénologiques pour diverses espèces, dont la vigne (*Vitis vinifera*). Pour cette recherche, les dates de débourrement de la vigne ont été collectées pour la période de 1954 à 2008, provenant de l'Institut National de la Recherche Agronomique français (INRA). Ces données phénologiques ont été récoltées pour 5 sites différents, qui reprennent 10 cépages différents. Les données des dates phénologiques disponibles des différents sites et cépages sont résumées dans le tableau ci-dessous.

VARIETES/LIEUX	COLMAR	BORDEAUX	EPERNAY	MONTPELLIER	ANGERS	Totale
Ugni-blanc	28				5	33
Syrah	28			15	5	48
Sauvignon	14			28	5	47
Riesling	48			5	6	59
Pinot noir	48		5	16		69
Merlot	29	47		10		86
Grenache	27			24	5	56
Chasselas	45			31	5	81
Cabernet-Sauvignon	29	8		11	8	56
Chardonnay	29		5	11		45
Totale	325	55	10	151	39	580

TABLE 3.1 – Tableau récapitulatif des observations disponibles des cépages disponible sur la plateforme PENOCLIM.

Les données phénologiques en Belgique sont obtenues via un recensement auprès de plus de 100 vigneronns. Cependant, uniquement un vigneron localisé à Feluy avait un registre de ses dates de débourrement pour 3 années.

Chapitre 4

Méthodologie

4.1 Modèles phénologiques

Deux types de modèles ont été utilisés pour modéliser la date de débourrement : un modèle linéaire non-séquentiel (qui ne prend pas en compte les étapes précédentes) nommé *Growing Degree Days* (GDD) et un modèle linéaire séquentiel (qui prend en compte les étapes précédentes) nommé le modèle BRIN.

4.1.1 Modèle Growing Degree Days (GDD)

La transition d'un stade phénologique à un autre est influencée par divers facteurs, la température de l'air étant le principal déterminant. De nombreux chercheurs utilisent donc un modèle simple qui quantifie l'accumulation thermique ($\Sigma F_u = F_u$). Une fois que le seuil de forçage (F_u) est atteint, l'accumulation thermique n'est plus prise en compte dans le calcul, car elle a atteint la somme des degrés-jours nécessaires pour déclencher le débourrement (Sgubin et al., 2018).

$$F_u = \text{GDD}_{T_b} = \begin{cases} 0 & \text{si } T \leq T_b \\ T - T_b & \text{si } T > T_b \end{cases} \quad (4.1)$$

La température moyenne journalière est représenté par (T).

La valeur de T_b , représentant la température de base, peut varier selon la littérature entre 5 ou 10°C. Dans cette étude, la valeur de 5°C prédit mieux les dates de débourrement (García de Cortázar-Atauri et al., 2009). Les résultats de ce choix se trouvent dans la section 4.3.1 Le calcul débute le 1er janvier de chaque année et se termine lorsque le seuil de forçage est atteint.

4.1.2 Modèle de Bidabe et Richardson (BRIN)

Le modèle BRIN provient de deux « sous-modèles » souvent utilisés en arboriculture. Le modèle de Bidabe, qui permet de prendre en compte la période de dormance et le modèle de Richardson qui calcul pour la période de post-dormance. Les deux avantages principaux de ce modèle est la prise en compte de la période de dormance. De plus, la période de post-dormance est calculée avec des températures horaires (Garcia de Cortazar-Atauri et al., 2005).

Bidabe

Le schéma de dormance que nous utilisons correspond à la composante « Actions Froid » (CA) de Bidabe (1965). L'accumulation des CA commence dès le début de la période de dormance et s'achève

à sa fin. Il a été choisi de fixer le commencement de la dormance des bourgeons au 1er août, une date étayée par la littérature qui indique que, vers cette période, toutes les variétés initient leur dormance des bourgeons (Pouget, 1989; Champagnol, 1984; Pouget, 1963; Alleweldt, 1960; Nigond, 1967). Étant donné les conditions thermiques estivales, le cumul d'Actions Froid à la fin de l'été est négligeable (Garcia de Cortazar-Atauri et al., 2005).

La rupture de dormance se produit (N_{db}) lorsque une quantité critique d'unités de froid (CU) est atteinte (C_c) (Garcia de Cortazar-Atauri et al., 2005).

$$C_c = \sum_{n=\text{1er août}}^{N_{ab}} C_u \quad (4.2)$$

$$C_a = Q_{10}^{\frac{-T_{max}}{10}} + Q_{10}^{\frac{-T_{min}}{10}} \quad (4.3)$$

L'accumulation de froid est représentée par C_a . Le facteur Q_{10} quantifie l'impact de la température sur la vitesse des réactions physiologiques et exprime comment cette vitesse change de manière exponentielle avec une variation de température de 10 degrés Celsius. Pour déterminer Q_{10} , une analyse de sensibilité a été réalisée, impliquant des modèles agro-météorologiques pour prévoir les dates de débourrement. Cette démarche inclut la simulation et la comparaison avec des données climatiques historiques, une modification systématique de Q_{10} dans les modèles, et l'évaluation de l'exactitude des prédictions en les confrontant aux observations réelles. Des analyses statistiques ont été menées pour garantir la robustesse des résultats. Cette méthode a permis d'identifier la valeur optimale de Q_{10} , qui a amélioré la précision des prévisions des modèles. Considéré comme une constante sans dimension, Q_{10} a été estimé à 2,17 (Garcia de Cortazar-Atauri et al., 2005). Les variables T_{max} et T_{min} représentent les températures maximales et minimales journalières.

Richardson

Le modèle post-dormance s'aligne avec la composante Growing Degrees Hours (GDH) du modèle de Richardson (1974). L'accumulation de GDH commence au moment de la levée de dormance, calculée par le modèle de Bidabe, et s'achève le jour du débourrement. Pour cela, le modèle utilise les températures maximales et minimales journalières pour estimer les valeurs horaires, puis calcule le cumul des GDH pour chaque jour de cette période (Garcia de Cortazar-Atauri et al., 2005).

$$F_u = \sum_{d=\text{levée de dormance}}^{\text{débourrement}} \text{GDH}_d \quad (4.4)$$

avec

$$\text{GDH}_d \approx \begin{cases} \left(\frac{T_{max}(d)+T_{min}(d)}{2} - T_b \right) \times 24 & \text{si } \frac{T_{max}(d)+T_{min}(d)}{2} \leq T_B \\ (T_B - T_b) \times 24 & \text{si } \frac{T_{max}(d)+T_{min}(d)}{2} > T_B \end{cases} \quad (4.5)$$

Dans ce modèle, T_b est fixé à 5°C et T_B à 30°C. Le F_u nécessaire varie selon le cépage et la localisation, et est déterminé par l'accumulation totale des GDH de la levée de dormance jusqu'au débourrement (Garcia de Cortazar-Atauri et al., 2005).

4.2 Calcul des indices de gelées tardives

Les gelées tardives apparaissent de manière irrégulière dans le temps et l'espace (Scheifinger et al., 2003). Cette imprévisibilité rend l'observation des dommages qu'elles causent particulièrement

difficile. Par conséquent, il existe un manque de séries temporelles détaillées concernant ces impacts, ce qui complique leur étude. Il devient donc essentiel de mettre en place des stratégies alternatives pour combler ce déficit d’observations (Scheifinger et al., 2003).

Les indices de gel peuvent être divisés en deux catégories distinctes : l’indice de gel en tant que phénomène météorologique et l’indice de gel en tant que risque pour la vigne. Le premier indice correspond au nombre de jours entre la date du dernier gel de l’année (au plus tard le 1er août) et le 1er janvier précédent. Un jour de gel est défini comme un jour où la température de l’air atteint ou descend en dessous de 0°C (Catinca et al., 2019). Le second indice utilise le même principe mais avec une température seuil de -2°C, ce qui est plus pertinent pour évaluer le risque pour la vigne (Catinca et al., 2019).

Pour vérifier la précision de la prédiction du dernier jour de gel, une analyse comparative est effectuée en utilisant deux ensembles de données distincts. Les gelées tardives peuvent avoir des conséquences sérieuses sur la viticulture en endommageant les bourgeons des vignes, rendant cette évaluation particulièrement importante. Les premières données sont issues des réanalyses ERA5-Land, qui offrent une large couverture spatiale et temporelle, utile pour analyser les tendances climatiques. Étant donné que ces données reposent sur des modèles, il est crucial de les valider par rapport aux relevés de l’Institut Royal Météorologique (IRM), qui sont basés sur des observations directes. Cette comparaison permet de déterminer si les données ERA5-Land représentent fidèlement les dates de gel et d’évaluer leur utilité pour la gestion des vignobles.

4.3 Qualité de la prédiction et incertitude

4.3.1 La Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP)

Le RMSEP, ou Root Mean Square Error of Prediction, est une mesure statistique couramment utilisée pour évaluer la précision des modèles de prédiction. Cette métrique quantifie l’écart moyen entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs réelles observées dans un ensemble de données. La performance des modèles a été évaluée à l’aide de l’erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSEP). Cet indicateur mesure la différence quadratique entre les dates de débournement observées (N_{obs}) et celles simulées (N_{pred}). (Garcia de Cortazar-Atauri et al., 2005).

$$\text{RMSEP} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (N_{obs}(i) - N_{pred}(i))^2} \quad (4.6)$$

L’utilité du RMSEP réside dans sa capacité à fournir une évaluation quantitative de la performance d’un modèle de prédiction. Une valeur faible de RMSEP indique une bonne concordance entre les prédictions et les observations, ce qui suggère que le modèle est capable de capturer les tendances et les relations importantes dans les données.

4.3.2 L’écart type des résidus

L’écart-type résiduel est une mesure statistique fondamentale utilisée pour évaluer la qualité d’ajustement d’un modèle de régression. Il quantifie la dispersion des résidus, qui sont les écarts entre les valeurs observées Y et les valeurs prédites Y_{pred} par le modèle. Ces résidus représentent les erreurs individuelles de prédiction pour chaque observation.

$$\text{Résiduel} = (Y - Y_{pred}) \quad (4.7)$$

Où Y est la valeur observée et Y_{pred} est la valeur prédite par le modèle.

$$S_{\text{res}} = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y_{\text{pred}})^2}{n}} \quad (4.8)$$

Ici, $\sum(Y - Y_{\text{pred}})^2$ représente la somme des carrés des résidus et n est le nombre d'observations.

Une valeur faible de S_{res} indique une bonne adéquation entre le modèle et les données, montrant que le modèle prédit les valeurs avec précision et les erreurs de prédiction sont faibles sur l'ensemble des données.

4.3.3 Test de Wilcoxon

Pour comparer les différences significatives entre deux périodes pour un même site, il a été choisi d'utiliser le test de Wilcoxon. Ce choix est basé sur différentes caractéristiques de mes données ainsi que de mon objectif. Premièrement, les données ne suivent pas une distribution normale. Il faut donc utiliser une méthode non paramétrique. Ensuite, les données sont appariées. C'est pourquoi le test de Wilcoxon est le plus approprié (McClenaghan E., 2023). L'hypothèse nulle de ce test est qu'il n'y a pas de différence. Dès lors, une valeur inférieure à 0.05 sera une valeur significative (McClenaghan E., 2023) et montrera une différence dans les moyennes entre les deux observations.

4.4 Recalibration et validation des modèles

Les observations françaises obtenues sur le site PHENOCLIM ont permis de calibrer correctement le modèle, ainsi que de le valider. En effet, les 580 observations disponibles entre 1958 et 2008 ont permis cela.

4.4.1 Modèle 1 (GDD)

La première étape de ce processus consiste à vérifier si les résultats obtenus correspondent à ceux de l'étude d'Iñaki García de Cortázar Atauri et al (2005). Cela implique de générer des prédictions qualitatives en utilisant les valeurs seuils définies dans cette étude.

Premièrement, le modèle de "Growing degree days" plus communément appelé "GDD" est un modèle qui requiert une valeur de température de base à partir de laquelle il y a un cumul de température. Dans l'étude d'Iñaki García de Cortázar Atauri et al., ils utilisent 2 seuils de température. Bien que la température de base à 10°C soit utilisée dans différentes études, ici les deux possibilités ont été testées. La qualité de prédiction était meilleure lorsque la température de base utilisée était de 5°C avec une moyenne des RMSEP de 10,06. En outre, Schwartz (2006) indique que le seuil de 5°C pour le modèle GDD donne un RMSEP plus faible, justifiant ainsi son adoption pour notre étude.

De plus, l'adaptation des modèles phénologiques à la Belgique, où la température moyenne était de 10,2°C en 2020 Institut Royal Météorologique. (s. d.), nécessite d'ajuster les seuils de température pour initier le débourrement. En comparaison, la France a enregistré une température moyenne de 14,1°C en 2020 (Météo France, 2021), ce qui reflète des conditions climatiques globalement plus chaudes. Cette différence de température moyenne implique que les modèles doivent être calibrés pour des conditions plus froides afin d'être applicables et précis pour les vignobles belges. Par ailleurs, l'adaptation des modèles est également influencée par les cépages et variétés plantées, qui peuvent avoir des sensibilités différentes aux températures, nécessitant ainsi une calibration spécifique pour chaque variété (Jones et al., 2005).

Un premier test fut effectué sur les différents cépages disponibles pour chaque site. Dans l'étude, l'objectif était de trouver une valeur seuil applicable à l'ensemble du territoire français. Ainsi, une valeur seuil unique a été déterminée pour chaque cépage.

Les valeurs des RMSEP n'étaient pas concluantes pour l'ensemble du territoire après le premier test (voir section 5.1, tableau 5.1 et 5.3). Une calibration a été effectuée pour déterminer les valeurs seuils. Pour cela, la moitié des observations de chaque cépage pour chaque site fut utilisée pour une calibration. Le calcul initial avait pour but de déterminer la date de débourrement à partir d'un cumul de température qui atteint une valeur seuil. Ici, il a fallu déterminer la valeur seuil à partir des dates de débourrement observées provenant de la base de données PHENOCLIM, pour chaque site et chaque cépage. Ensuite, une validation fut effectuée sur l'autre moitié des années d'observations disponibles, le calcul initial fut réitéré avec les nouvelles valeurs seuils déterminées par la calibration. Cela a été effectué pour chaque cépage et chaque site. Afin de voir si la RMSEP était plus petite et donc de meilleure qualité ou à l'inverse, de voir si elle était plus grande et donc de moins bonne qualité.

4.4.2 Modèle 2 (BRIN)

Pour le modèle BRIN, une méthodologie similaire à celle utilisée pour le modèle GDD a été suivie. Initialement, des valeurs seuils basées sur les références littéraires ont été utilisées, en accord avec la démarche précédente. Cependant, contrairement au modèle GDD, la première valeur seuil, qui correspond à la sortie de la dormance (la valeur du paramètre) C_c , n'a pas été réévaluée en raison du manque de données sur les dates de sorties de dormance. Au lieu de cela, une calibration des valeurs seuils du forçage du 2^{ème} sous-modèle de Brin (Richardson voir section 4.1.2). Cela se fait à partir des données observées de la date de débourrement provenant de la base de données PHENOCLIM. Cette approche a permis d'évaluer et de valider la performance du modèle BRIN pour chaque site et chaque cépage, en utilisant la même approche de validation croisée que celle appliquée pour le modèle GDD.

4.4.3 Adaptation des valeurs des paramètres pour la Belgique

Pour pouvoir adapter correctement ce modèle à la Belgique et n'ayant pas de données disponibles, il a fallu se baser sur le site français qui avait les conditions climatiques les plus similaires à celle de la Belgique.

Comme évoqué dans la section 2.1 (zone d'étude), Epernay est un site avec un climat de type climat tempéré océanique, ce qui est également le cas de Feluy. Par exemple, la température moyenne à Feluy est de 10.2°C et une précipitation annuelle de 817,6 mm (Météo et climat, s. d.) tandis qu'à Epernay, la température moyenne annuelle est de 11.1°C et une précipitation annuelle de 795 mm ("Climat Épernay : Pluviométrie et Température moyenne Épernay," s. d.). C'est pour cela que des cinq sites, les paramètres de celui d'Epernay ont été utilisés pour les appliquer à la Belgique. C'est le site où les RMSEP des modèles GDD et BRIN étaient le plus faibles. Même si le nombre d'observations n'est que de 10, la recalibration et validation étaient basées uniquement sur 5 observations.

4.4.4 Cas d'étude pour validation en Belgique (Feluy)

Le cas d'étude en Belgique, situé à Feluy, a permis de valider les paramètres et de les appliquer à l'ensemble du territoire belge. Un viticulteur a partagé les dates de débourrement de son domaine de 2020 à 2024, ce qui a permis de vérifier la cohérence des paramètres d'Epernay via les RMSEP des deux modèles. Grâce aux paramètres déterminés dans via le processus de la section 4.3.3 et que l'on peut retrouver les valeurs dans la section 5.1.1, il a été possible de calculer les dates de débourrement

pour chaque site en Belgique. Ces dates ont ensuite été transformées en nombre de jours, permettant de générer des cartes des moyennes maximales et minimales de chaque modèle. Ces cartes montrent les différences de prédictions entre les deux modèles ainsi que leur variabilité. Une analyse similaire a été réalisée pour les gelées, utilisant deux indices : l'indice de gel météorologique, où la température est inférieure à 0°C, et l'indice de gel à -2°C représentant un risque pour les vignes (Perry, 1998).

Pour évaluer si le risque de gelées tardives sur les vignes a augmenté au fil des années en Belgique, l'analyse a été réalisée en trois étapes distinctes. La première étape consistait à analyser l'évolution des dates de débourrement des vignes entre 1950 et 2022. Pour ce faire, nous avons calculé la moyenne des dates de débourrement pour deux périodes distinctes : 1950-1986 (`moyenne1_modele1`) et 1987-2022 (`moyenne2_modele1`). Ces moyennes ont été calculées pour chaque modèle. Afin de déterminer s'il y a eu un avancement de la date de débourrement, nous avons effectué la différence entre ces deux moyennes : `moyenne2_modele1 - moyenne1_modele1`.

La deuxième étape impliquait l'analyse des dates des dernières gelées tardives pour deux indices de température différents (0°C et -2°C). Comme pour la date de débourrement, nous avons calculé la moyenne des dates des dernières gelées tardives pour les deux périodes (1950-1986 et 1987-2022) pour chaque indice de température. Nous avons ensuite déterminé les différences de moyennes pour identifier tout changement dans les dates des dernières gelées tardives au fil du temps.

Enfin, la troisième étape consistait à comparer les différences entre les modèles et les indices de gel. Pour cela, nous avons calculé les différences moyennes pour chaque modèle (GDD et Brin) par rapport aux indices de gel (0°C et -2°C). Les comparaisons suivantes ont été effectuées :

- GDD vs Gel à 0°C
- GDD vs Gel à -2°C
- Brin vs Gel à 0°C
- Brin vs Gel à -2°C

Pour évaluer les risques de gel pour les vignes, nous avons utilisé la notion de PS (Période de Sécurité)(Lenz et al., 2016; Scheifinger et al., 2003; Vitasse et al., 2018), définie comme la différence entre la date de débourrement et la date de la dernière gelée impactante. La formule utilisée est la suivante :

$$\text{PS}[\text{jours}] = \text{Date de débourrement}[\text{jours}] - \text{Date de dernière gelée impactante}[\text{jours}] \quad (4.9)$$

Ainsi, nous avons calculé des PS distincts pour chaque combinaison de modèle et d'indice de gel : par exemple, un PS pour Gel à 0°C et Modèle 1, un PS pour Gel à -2°C et Modèle 1, etc.

Chapitre 5

Résultats et discussion

5.1 Calibration et validation des modèles en France

Pour simplifier, le modèle GDD sera désigné comme modèle 1 et le modèle BRIN comme modèle 2.

La première étape de cette étude consiste à identifier le modèle offrant les meilleures performances pour prédire les dates de débourrement et à sélectionner les sites avec les RMSEP moyens les plus faibles, afin de choisir un site ayant un climat similaire à celui de la Belgique pour appliquer les paramètres appropriés.

En utilisant les paramètres de l'étude de García de Cortázar Atauri et al. (2009) il a été déterminé que Montpellier présentait le meilleur RMSEP moyen pour les deux modèles. Pour le modèle 1, la prédiction était améliorée par rapport aux valeurs des RMSEP de l'étude citée ci-dessus, avec une différence moyenne d'un jour. À l'opposé, Colmar avait le RMSEP le plus élevé, indiquant une moindre précision prédictive, avec une différence moyenne de 30,5 jours pour le modèle 1 et de 35,5 jours pour le modèle 2.

Les tableaux 5.1 et 5.3 montrent une grande variabilité entre les sites, non reflétée dans la moyenne des RMSEP des cépages. L'étude de García de Cortázar Atauri et al. (2009) visait à déterminer un forçage seuil par modèle (F_u de la section 3.2.1 et 3.2.2) par cépage applicable à toute la France et a révélé que le modèle BRIN, en intégrant la période de dormance, pourrait offrir une meilleure précision pour prédire les dates de débourrement par rapport aux modèles classiques comme le GDD, notamment dans les contextes de changements climatiques. Cette précision accrue est souvent attribuée à une meilleure modélisation des conditions réelles influençant la dormance des bourgeons.

Dans ce mémoire, l'objectif est de définir un seuil de forçage pour toute la Belgique. Pour cela, il a été nécessaire de calibrer les paramètres en utilisant les observations de PHENOCLIM, car certains sites présentaient des RMSEP trop élevés. Après calibration et validation des paramètres, une réduction significative des RMSEP a été observée pour le modèle 1. Par exemple, le RMSEP pour Epernay a diminué de 10,05 à 2,95 jours, tandis que pour Montpellier, il est resté stable, passant de 6,66 à 6,68 jours. Les sites plus au nord (Epernay et Colmar) ont montré une diminution plus marquée des RMSEP par rapport aux sites plus au sud, où les variations étaient minimales.

Pour le modèle 2, une diminution du RMSEP a été observée après calibration pour tous les sites, à l'exception d'Angers. Par exemple, le RMSEP pour Epernay est passé de 10,6 à 7,28 jours. Colmar a montré la plus grande diminution, avec un RMSEP passant de 35,64 à 12,39 jours. Ces résultats indiquent que la calibration des paramètres améliore de manière significative la précision des prédictions pour la plupart des sites étudiés.

L'analyse des modèles GDD et BRIN révèle que le modèle GDD (modèle 1) offre une précision

TABLE 5.1 – Tableau récapitulatif des valeurs des RMSEP pour le modèle 1 pour chaque cépage dans les 5 sites en France. Les valeurs présentées avant calibration proviennent de l'étude de García de Cortázar Atauri (2009) . Les valeurs après calibration ont été obtenues en effectuant une calibration des paramètres sur la moitié des observations, puis validées sur l'autre moitié.

RMSEP Avant et Après Recalibration pour le modèle 1										
Variétés/Lieux	Colmar		Bordeaux		Epernay		Montpellier		Angers	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Ugni-blanc	25,81	10,67					10,5		18,15	12,15
Syrah	31,97	12,17					10,9	10,72	12,94	16,43
Sauvignon	36,93	5,53					5,89	6,8	14,02	16,06
Riesling	27,81	8,84					5,9	6,2	10,04	12,36
Pinot noir	28,50	9,77			11,1	2,91	5	4,6		
Merlot	29,28	14,61	15,55	17,06			5,25	5,35		
Grenache	34,51	11,82					8	7,73	15,3	13,91
Chasselas	31,61	9,19					5,88	6,2	13,1	11,95
Cabernet-Sauvignon	30,29	8,22	13,3	4,84			6,53	6,4	16,1	13,12
Chardonnay	28,5	12,58			9	3	6,61	6,2		
Moyenne	30,52	10,34	14,42	10,95	10,05	2,95	6,66	6,68	13,14	13,71

TABLE 5.2 – Tableau récapitulatif des valeurs des écarts-types pour le modèle 1 chaque cépage dans les 5 sites en France. Les valeurs présentées avant calibration proviennent de l'étude de García de Cortázar Atauri (2009). Les valeurs après calibration ont été obtenues en effectuant une calibration des paramètres sur la moitié des observations, puis validées sur l'autre moitié.

Écart-Types Avant et Après Recalibration										
Variétés/Lieux	Colmar		Bordeaux		Epernay		Montpellier		Angers	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Ugni-blanc	8,05	7,57					10,2		9,125	14,74
Syrah	7,47	12,25					10,72	10,72	12,02	19,97
Sauvignon	8,56	5,89					5,95	5,95	13,02	10,26
Riesling	7,28	11,94					5,27	5,27	8,23	15,01
Pinot noir	7,51	11,32			5,06	3,53	4,99	4,99		
Merlot	7,83	10,37	12,78	15,5			4,92	4,92		
Grenache	10,06	10,09					5,85	5,85	11,19	10,44
Chasselas	7,96	9,38					5,52	5,52	10,31	14,17
Cabernet-Sauvignon	8,06	8,25	4,5	3,1			6,11	6,11	6,41	13,32
Chardonnay	8,65	12,41			6,84	2,3	5,72	5,72		5,72
Moyenne	8,143	9,947	8,64	9,3	5,95	2,915	6,12	6,12	10,19	13,98

supérieure, avec des RMSEP généralement plus bas pour divers sites et cépages. Par exemple, pour le Pinot noir, le RMSEP est de 5,76 jours avec le modèle GDD, comparé à 7,55 jours pour le modèle BRIN. À Montpellier, le modèle GDD atteint un RMSEP de 6,69 jours, tandis qu'Epernay se distingue pour le modèle BRIN avec 7,28 jours. Ces résultats indiquent que le modèle GDD est mieux adapté pour une utilisation en Belgique.

Cependant, il est important de noter que la divergence avec la littérature pourrait être due au fait que le calcul de la dormance n'a pas été calibré dans cette étude, faute d'observations disponibles. Les paramètres utilisés pour la dormance étaient ceux de l'étude d'Atauri et al. (2009), et ils pourraient ne pas correspondre aux conditions spécifiques de la Belgique. Cette hypothèse souligne la nécessité d'une calibration locale des paramètres de dormance pour améliorer la précision des modèles prédictifs.

TABLE 5.3 – Tableau récapitulatif des valeurs des RMSEP pour le modèle 2 pour chaque cépage dans les 5 sites en France. Les valeurs présentées avant calibration proviennent de l'étude de García de Cortázar Atauri (2009). Les valeurs après calibration ont été obtenues en effectuant une calibration des paramètres sur la moitié des observations, puis validées sur l'autre moitié.

RMSEP Avant et Après Recalibration pour le Modèle 2										
Variétés/Lieux	Colmar		Bordeaux		Epernay		Montpellier		Angers	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Ugni-blanc	34,76	15,78							13,53	23,76
Syrah	37,31	13,48					10,56	15,51	13,99	24,69
Sauvignon	42,22	7,20					5,55	6,98	14,66	14,30
Riesling	32,38	10,57					11,54	2,91	12,72	16,40
Pinot noir	32,93	11,25			12,76	6,04	5,36	4,35		
Merlot	33,53	15,46	24,78	17,67			4,75	6,67		
Grenache	39,78	13,91					6,85	6,29	15,03	30,00
Chasselas	33,72	9,91					7,37	5,23	12,25	21,02
Cabernet-Sauvignon	36,04	12,55	9,8	3,77			9,36	5,59	16,59	11,63
Chardonnay	33,76	13,75		10,72	8,44	8,51	10,27	4,42		
Moyenne	35,64	12,39	17,29	10,72	10,6	7,28	7,84	6,55	14,11	20,26

TABLE 5.4 – Tableau récapitulatif des valeurs des écarts-types pour le modèle 2 chaque cépage dans les 5 sites en France. Les valeurs présentées avant calibration proviennent de l'étude de García de Cortázar Atauri et al., (2009). Les valeurs après calibration ont été obtenues en effectuant une calibration des paramètres sur la moitié des observations, puis validées sur l'autre moitié.

Écart-Types Avant et Après Recalibration pour le Modèle 2										
Variétés/Lieux	Colmar		Bordeaux		Epernay		Montpellier		Angers	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Ugni-blanc	10,05	14,29					10,66	12,72	10,66	12,72
Syrah	9,44	13,19					10,92	16,26	13,79	12,72
Sauvignon	9,1	7,07					5,45	5,73	15,41	16,26
Riesling	7,9	10,76					7,5	2,12	12,48	14,14
Pinot noir	7,68	11,02			6,02	3,5	4,38	4,55		
Merlot	10,44	12,81	21,46	16,02			5	6,87		
Grenache	10,95	12,37					5,53	6,42	12,75	0
Chasselas	8,67	9,79					6,7	5,15	14,38	12,72
Cabernet-Sauvignon	8,78	12,73	3,87	4,27			8,13	5,54	9,09	6,34
Chardonnay	9,82	13,91			6,87	0,7	8,87	4,15		
Moyenne	9,283	11,794	12,66	10,145	6,445	2,1	6,94	6,31	12,65	10,7

L'analyse des écarts-types (tableaux 5.2 et 5.4) avant et après calibration des paramètres montre une réduction significative de la variabilité pour le modèle 2, indiquant des prédictions plus stables et fiables. Par exemple, le RMSEP d'Epernay passe de 10,6 à 7,28 jours (tableau 5.3) et son écart-type diminue de 6,44 à 2,1 (tableau 5.4).

Pour le modèle 1, les écarts-types augmentent sur trois sites (Colmar, Bordeaux et Angers) et diminuent sur un seul site, Epernay, où l'écart-type passe de 5,95 à 2,915 (tableau 5.2). Pour Montpellier, l'écart-type reste inchangé.

Epernay apparaît donc comme le site de référence pour adapter les valeurs de paramètres à la Belgique. Son RMSEP est très faible pour le modèle 1 (2,96 jours) et relativement faible pour le modèle 2 (7,28 jours). Malgré un nombre d'observations relativement faible pour ce site (voir Tableau 3.1),

Epernay offre un climat similaire à celui de la Belgique, ce qui rend ses paramètres particulièrement adaptés pour une application en Belgique.

5.1.1 Validation des Modèles en Belgique : Cas d'Étude de Feluy

L'objectif ici est de valider les deux modèles en Belgique grâce au cas d'étude de Feluy avec les paramètres d'Epernay. Sur le tableau 5.5, le RMSEP du modèle 1 est de 6,21, tandis que pour le modèle 2, il est de 8,58. En ce qui concerne l'écart-type pour le modèle 1, il est de 2, tandis que pour le modèle 2, il est de 2,51. Ces résultats indiquent que, bien que les deux modèles présentent des erreurs de prédiction relativement faibles, le modèle 1 offre des prédictions légèrement plus précises et stables que le modèle 2 pour le site de Feluy. Cela pourrait suggérer que le modèle GDD est plus adapté pour les conditions climatiques de la Belgique.

Modèle 1 (GDD)			
Epernay	Moyennes des Fu	RMSEP	Écart-Type
Validation avec un seuil de	Fu=239,2 (moyenne des Fu d'Epernay)	6,21	2
Modèle 2 (BRIN)			
Epernay	Moyenne des Fu d'Epernay dans l'étude	RMSEP	Écart-Type
Validation avec un seuil de	Fu=7022,8 (moyenne des Fu d'Epernay) avec un Cu moyen de 105,2	8,58	2,51

TABLE 5.5 – Comparaison des performances des modèles 1 (GDD) et 2 (BRIN) pour la validation des prédictions de débourrement en Belgique à Feluy. Les valeurs présentées incluent les moyennes des unités de forçage (Fu), les erreurs quadratiques moyennes de prédiction (RMSEP) et les écarts-types.

Ces résultats montrent que, bien que le modèle 1 (GDD) soit plus performant que le modèle 2 pour prédire les dates de débourrement en Belgique, ils diffèrent des conclusions de l'étude d'Atauri et al. (2009). Les paramètres de dormance utilisés provenaient de l'étude d'Atauri et al. (2009), ce qui pourrait ne pas être optimal pour les conditions belges. Cette hypothèse souligne la nécessité d'une calibration locale des paramètres de dormance pour améliorer la précision des modèles prédictifs dans le contexte belge.

5.2 Analyse spatiale des dates de débourrement en Belgique.

Maintenant que les paramètres optimaux ont été déterminés pour prédire avec précision les dates de gelées tardives et que le modèle le plus performant a été identifié à travers une étude de cas en Belgique ainsi que sur différents sites en France, il est pertinent d'examiner l'évolution spatiale des dates de débourrement en jours de l'année (JDA). Cette analyse permet de visualiser les variations géographiques de ce phénomène en Belgique et d'évaluer comment ces dates varient en fonction des différents modèles utilisés.

Pour le modèle 1, la carte de la moyenne des JDA par site (Figure 5.2a) montre une variation notable des dates de débourrement à travers la Belgique. Les régions du sud-est présentent des valeurs plus élevées allant de 130 à 145 jours, indiquant des moyennes de débourrement plus tardives, tandis que les régions du nord-ouest affichent des valeurs plus faibles allant de 110 à 120 jours, représentant

des moyennes plus précoces. Cette transition graduelle suggère des différences climatiques influençant le débourrement des sites (Figure 5.2a). La carte des minimums des JDA par site (Figure 5.2b) révèle que les dates de débourrement les plus précoces sont situées dans le nord-ouest, augmentant progressivement vers le sud et l'est. Cela pourrait indiquer que les conditions environnementales dans le nord-ouest permettent un débourrement plus précoce. La carte des maximums des JDA par site (Figure 5.2c) montre que les valeurs maximales de débourrement augmentent vers le sud-est, suggérant que ces régions pourraient connaître des conditions favorisant une période de débourrement plus étendue dans le temps.

En ce qui concerne le modèle 2, la carte de la moyenne des JDA par site (Figure 5.3a) présente une distribution similaire mais avec quelques différences notables par rapport au modèle 1. Les valeurs les plus élevées se trouvent dans le sud-est, allant de 130 à 135 jours, tandis que le nord-ouest montre des valeurs plus faibles, de 95 à 105 jours, bien que la transition soit moins marquée que dans le modèle 1. Les différences observées pourraient être dues à des facteurs spécifiques influençant le débourrement de manière différente dans chaque modèle. En effet, les valeurs au nord-ouest et au sud-est sont plus faibles que celles du modèle 1.

La carte des minimums des JDA par site pour le modèle 2 (Figure 5.3b) montre des valeurs minimales de débourrement plus faibles dans le nord-ouest, augmentant vers le sud-est. La carte des maximums des JDA par site pour le modèle 2 (Figure 5.3c) montre également une augmentation vers le sud-est, indiquant une période de débourrement plus étendue dans certaines régions comparé au modèle 1. La distribution semble être similaire à celle du modèle 1, bien que des différences persistent. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le modèle 2 pourrait capturer des aspects différents des conditions environnementales influençant le débourrement précoce.

En comparant les deux modèles, on observe des tendances spatiales similaires pour certains paramètres, mais les détails et les transitions spatiales varient. En effet, les moyennes des JDA sont plus élevées dans le sud-est pour les deux modèles, mais les détails et les transitions diffèrent. Les minimums montrent des tendances similaires entre les deux modèles, avec des variations dans les détails régionaux. Les maximums montrent également des tendances similaires entre les deux modèles, avec des variations dans les détails régionaux. Le modèle 2 présente une variabilité beaucoup plus grande dans ses valeurs minimales et maximales par rapport au modèle 1. En effet, les minimums du modèle 2 oscillent entre 10 et 15 jours jusqu'à 110 jours, alors que ceux du modèle 1 varient de 75 à 80 jours à 115 à 120 jours. Il est important de noter que la valeur de 10 à 15 jours est observée uniquement pour un seul site, et ce débourrement précoce ne s'est produit qu'une seule fois en 2014.

Il est également notable que le modèle 1 commence toujours à la même date (1er janvier) comme évoqué dans la section 3.2.1, tandis que le modèle 2 commence à la date de la levée de dormance. Une carte des dates moyennes de levée de dormance pour les différents sites (Figure 5.1) illustre la variabilité spatiale de ce phénomène en jours. Il est important de déterminer si la dormance a un impact sur la date de débourrement et dans quelle mesure elle impacte la date de débourrement du modèle 2. Si la levée de dormance était homogène, son impact sur les dates de débourrement pourrait être minimal. Cependant, étant donné que cette variabilité est hétérogène, comme le montre la figure 5.1, cela pourrait expliquer les différences observées entre les modèles 1 et 2. Et cela explique pourquoi le modèle 2 prédit plus tôt.

Moyenne des jours par site de la date de sortie de dormance du modèle 2

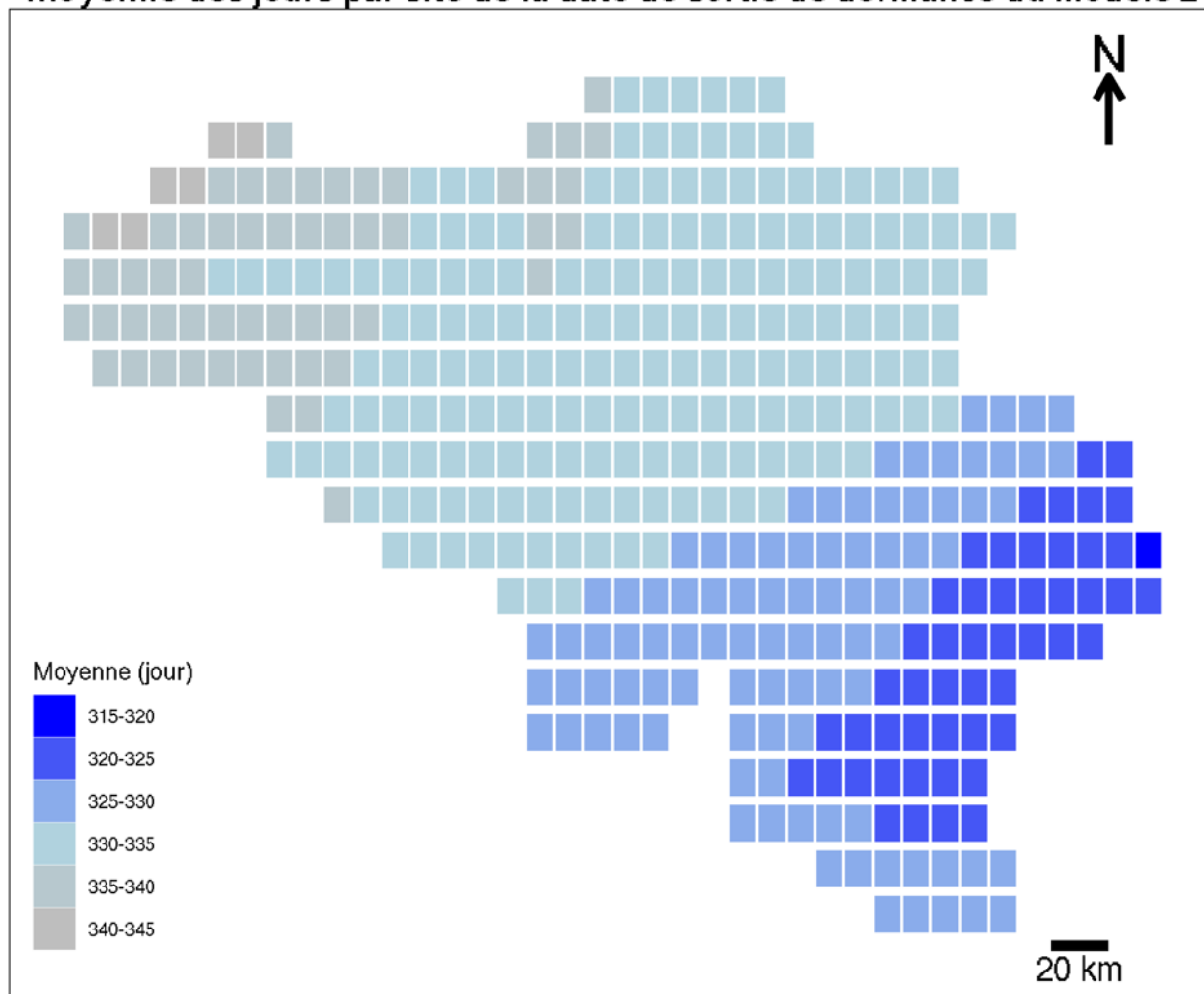


FIGURE 5.1 – La carte présente la moyenne des dates de dormance par site en Belgique entre 1950 et 2022. Les couleurs des carrés indiquent la moyenne des dates de dormance : les nuances de bleu représentent des dates de dormance plus précoces dans l’année, tandis que les nuances de gris à bleu clair indiquent des dates de dormance plus tardives.

Cette différence de point de départ peut avoir un impact significatif sur les résultats. La carte des dates moyennes de levée de dormance par site révèle une variabilité notable à travers la Belgique, avec des dates variant de 315 à 345 jours. Dans le sud-est de la Belgique, les dates de levée de dormance sont plus précoces, tandis qu’elles sont plus tardives dans le nord-ouest.

Pour les sites où la levée de dormance est précoce, les calculs du modèle 2 commencent plus tôt dans l’année, entraînant des dates de débourrement plus précoces par rapport au modèle 1. Il est également à noter qu’aucune date de levée de dormance n’excède 365 jours, ce qui signifie que, quel que soit le site en Belgique, le calcul du cumul de température pour le modèle 2 commence toujours avant le 1er janvier. Ainsi, le modèle 2 aura systématiquement un début de calcul de cumul de températures plus précoce que le modèle 1.

La variation des dates de levée de dormance entre les sites entraîne des différences dans les dates de débourrement calculées. Par exemple, le sud-est de la Belgique, avec des dates de levée de dormance plus précoces, pourrait afficher des dates de débourrement plus précoces sous le modèle 2. Inversement, le nord-ouest, avec des dates de levée de dormance plus tardives, pourrait montrer des dates de débourrement plus tardives.

En conclusion, l’hétérogénéité des dates de levée de dormance a une influence significative sur les

résultats du modèle 2. Les différences dans les dates de levée de dormance entre les sites expliquent les divergences observées entre les modèles 1 et 2, car ces variations régionales modifient les dates de débournement calculées par le modèle 2. La saisonnalité est donc un paramètre important qui permet d’avoir un meilleur RMSEP pour le modèle 2 que pour le modèle 1 (Leolini et al., 2020). Cependant, dans le cadre de cette étude, le modèle 1 présente un RMSEP plus faible. Néanmoins, le modèle 2 permet une plus grande hétérogénéité et une meilleure prise en compte des variations locales mais moins précises

L’étude de Luisa Leolini (2020) compare divers modèles phénologiques pour estimer la date de débournement de la vigne. Elle montre que les modèles intégrant les phases de dormance (comme le modèle Brin) offrent une meilleure précision mais avec une variabilité accrue par rapport aux modèles simples comme le GDD. En effet, cela explique pourquoi le modèle Brin est plus sensible aux variations climatiques fines (Leolini et al., 2020). L’article de Omazić et al., (2023) discute des avantages et des inconvénients des modèles statistiques, soulignant que les modèles complexes (comme le Brin) intégrant la dormance sont plus sensibles aux variations climatiques et montrent une plus grande variabilité dans les prévisions. En effet, les variations régionales des tendances observées dans les Ardennes et la côte belge peuvent être mieux comprises à travers cette sensibilité accrue (Chuine, 2000).

Cette analyse souligne l’importance de considérer la levée de dormance comme un facteur clé influençant la phénologie des sites en Belgique. Bien que la littérature indique que prendre en compte la dormance peut améliorer la précision des prédictions, cette étude ne confirme pas pleinement cet avantage. En effet, malgré une variabilité accrue permettant de mieux capturer les variations locales, le modèle 2, qui intègre la levée de dormance, se révèle moins performant que le modèle 1 dans notre contexte. Cette différence pourrait être due à la nécessité d’une calibration plus fine des paramètres de dormance spécifique aux conditions belges comme évoqué dans la section 5.1. Ainsi, bien que prometteur, le modèle 2 nécessite des ajustements supplémentaires pour atteindre une précision comparable à celle du modèle 1 dans les conditions climatiques de la Belgique.

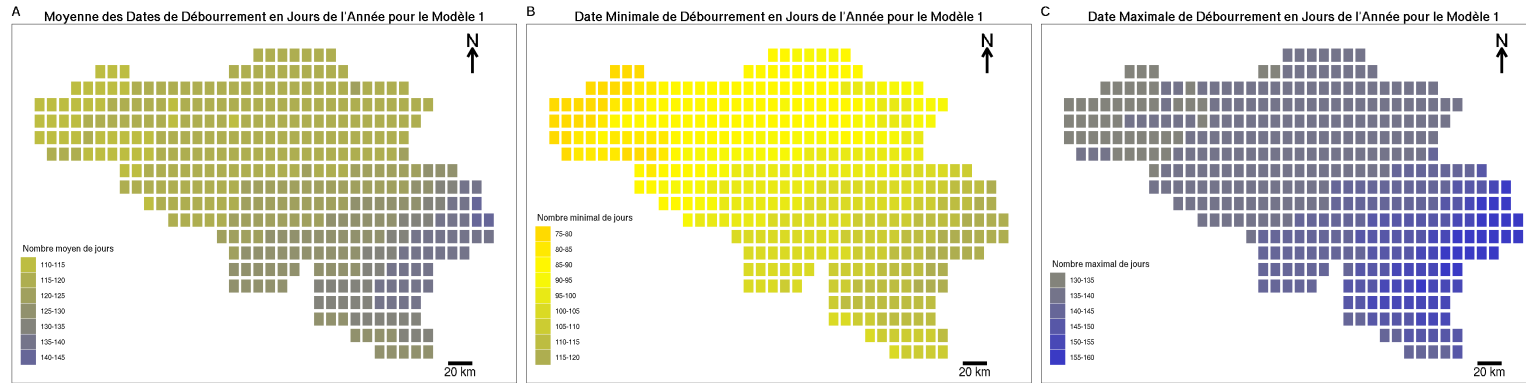


FIGURE 5.2 – Les cartes présentent l'analyse des dates de débourrement par site en Belgique pour le modèle 1, montrant la moyenne, le minimum et le maximum des dates de débourrement. La sous-figure (A) montre la moyenne des dates de débourrement par site, indiquant les valeurs moyennes sur la période étudiée. La sous-figure (B) illustre le minimum des dates de débourrement par site, indiquant les valeurs minimales observées. La sous-figure (C) présente le maximum des dates de débourrement par site, montrant les valeurs maximales observées. Les couleurs des carrés représentent les différentes valeurs : les nuances de jaune à rouge indiquent des dates de débourrement plus tardives, tandis que les nuances de bleu à gris indiquent des dates de débourrement plus précoces. Ces cartes permettent de visualiser les variations spatiales des dates de débourrement en Belgique, en mettant en évidence les sites où les débournements sont les plus précoces ou les plus tardifs pour le modèle 1.

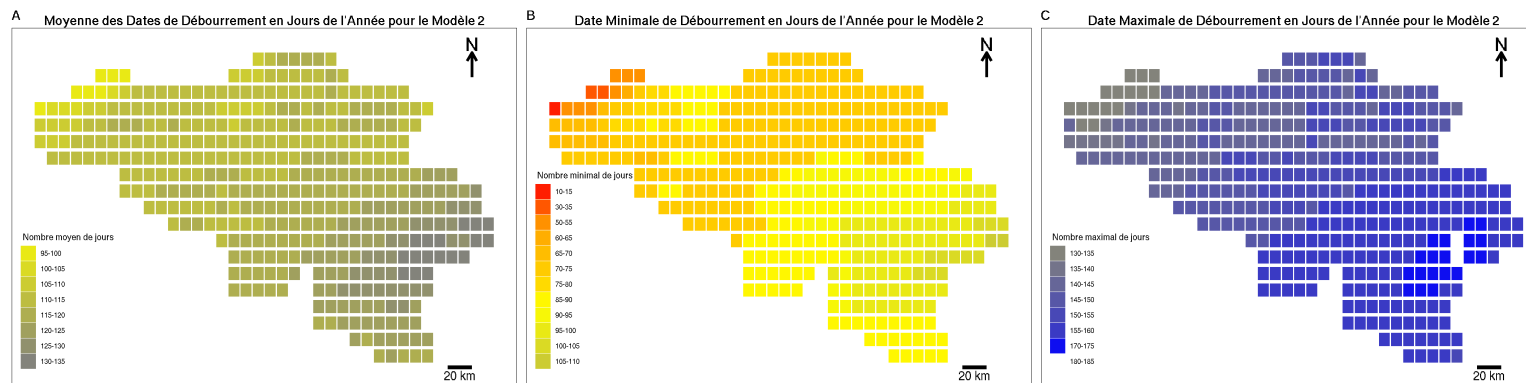


FIGURE 5.3 – Les cartes présentent l'analyse des dates de débourrement par site en Belgique pour le modèle 2, montrant la moyenne, le minimum et le maximum des dates de débourrement. La sous-figure (A) montre la moyenne des dates de débourrement par site, indiquant les valeurs moyennes sur la période étudiée. La sous-figure (B) illustre le minimum des dates de débourrement par site, indiquant les valeurs minimales observées. La sous-figure (C) présente le maximum des dates de débourrement par site, montrant les valeurs maximales observées. Les couleurs des carrés représentent les différentes valeurs : les nuances de jaune à rouge indiquent des dates de débourrement plus tardives, tandis que les nuances de bleu à gris indiquent des dates de débourrement plus précoces. Ces cartes permettent de visualiser les variations spatiales des dates de débourrement en Belgique, en mettant en évidence les sites où les débournements sont les plus précoces ou les plus tardifs pour le modèle 2.

5.3 Analyse spatiale de la dernière date de gel à 0°C et -2°C en Belgique.

Pour les gelées à 0°C, la carte de la moyenne des JDA par site (figure 5.4a) montre une variation notable des dates de gel à travers la Belgique. Les régions du sud-est présentent des dates de gel plus tardives, avec des moyennes de 145 à 150 jours, tandis que le nord-ouest affiche des dates plus précoces, variant de 115 à 120 jours. Cette transition graduelle est attribuée à des différences climatiques et topographiques. En effet, la topographie influence l'occurrence des gelées printanières. La topographie joue un rôle crucial, car les pentes favorisent l'écoulement de l'air froid vers les zones plates ou les cuvettes, où il peut s'accumuler et causer des gelées (Rochard et al., 2019). De plus, la température diminue avec l'altitude, avec une diminution moyenne de 6,5°C par kilomètre d'altitude (Fichefet, 2021). La carte des minimums des JDA par site révèle que les dates de dernier gels sont plus précoces dans le nord et l'ouest, avec des minimums variant de 75 à 85 jours, augmentant vers le sud et l'est jusqu'à 120 à 125 jours. Cela suggère que les conditions environnementales dans le nord et l'ouest de la Belgique, influencées par l'effet thermique de la Mer du Nord, favorisent une date de dernier gel plus précoce (Gu et al., 2008 ; Helali et al., 2020). En revanche, la carte des maximums des JDA par site montre une augmentation de la valeur maximale de la date de la dernière gelée vers le sud et l'est, avec des maximums atteignant 160 à 165 jours, indiquant une période de gel plus étendue dans ces régions. Ce phénomène peut être attribué aux conditions climatiques spécifiques des Ardennes. Les Ardennes, avec leur topographie plus élevée et un climat continental plus prononcé, subissent des températures moyennes plus basses et des variations de température plus extrêmes. L'altitude plus élevée contribue à des températures plus froides, prolongeant ainsi la saison de gel (Helali et al., 2020 ; Hufkens et al., 2012). Comme pour le reste, il y a un fort lien entre la moyenne, le minimum et le maximum. En d'autres termes, les régions ayant des gelées précoces ont généralement une période de gel plus courte, tandis que celles ayant des gelées tardives ont une période de gel plus longue.

Pour les gelées à -2°C, la carte de la moyenne des JDA par site (figure 5.5a) présente une distribution similaire pour les moyennes mais avec des valeurs inférieures par rapport à la carte de la moyenne des JDA par site pour un gel à 0°C. Les valeurs de la dernière date de gel les plus élevées se trouvent dans le sud-est, avec des moyennes allant de 110 à 115 jours, avec une transition moins marquée que pour les gelées à 0°C. Ces différences pourraient être dues à des facteurs spécifiques influençant les gelées à des températures plus basses. La carte des minimums des jours par site pour les gelées à -2°C montre que les valeurs minimales de gel sont plus faibles dans le nord-ouest, variant de 0 à 5 jours, augmentant vers le sud-est jusqu'à 85 à 90 jours. De plus, la carte des maximums des jours par site pour les gelées à -2°C montre une augmentation des valeurs maximales de la dernière date de gel vers le sud-est, avec des maximums atteignant 150 à 155 jours, indiquant une période de gel plus étendue dans certaines régions comparé aux gelées à 0°C.

En comparant les distributions spatiales des dernières dates de gelées pour 0°C et -2°C (figure 5.4 ; 5.5), on observe que les moyennes des JDA sont plus élevées dans le sud-est pour les deux températures, mais les transitions varient. Pour les minimums (figure 5.5b), la date de la dernière gelée à 0°C montrent des valeurs plus faibles dans le nord et l'est (75 à 85 jours), tandis que les gelées à -2°C les montrent dans le nord-ouest (0 à 5 jours). Les tendances pour les maximums (figure 5.5c) sont similaires entre les deux températures, avec des variations régionales notables (160 à 165 jours pour les gelées à 0°C et 150 à 155 jours pour les gelées à -2°C). Ces analyses soulignent l'importance de prendre en compte les différentes températures lors de l'évaluation des dates de gel, car les conditions environnementales et les réponses phénologiques varient avec la température.

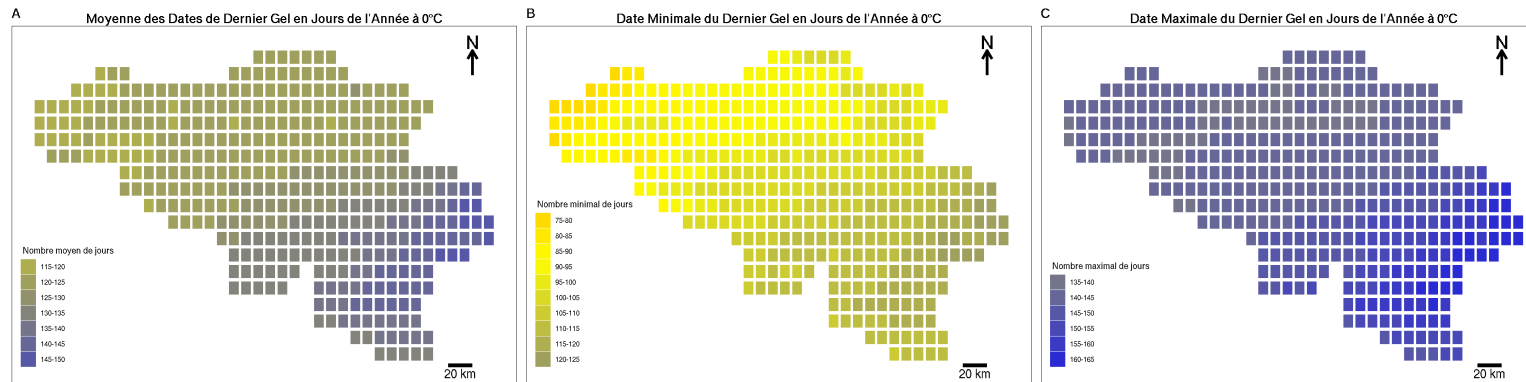


FIGURE 5.4 – Les cartes présentent l’analyse du gel à 0°C en Belgique, montrant la moyenne, le minimum et le maximum des jours de gel par site. La sous-figure (A) montre la moyenne des jours de gel à 0°C par site, indiquant les valeurs moyennes sur la période étudiée. La sous-figure (B) illustre le minimum des jours de gel à 0°C par site, indiquant les valeurs minimales observées. La sous-figure (C) présente le maximum des jours de gel à 0°C par site, montrant les valeurs maximales observées. Les couleurs des carrés représentent les différentes valeurs : les nuances de jaune à rouge indiquent des valeurs plus élevées pour la moyenne et le minimum, tandis que les nuances de bleu à gris indiquent des valeurs plus faibles pour le maximum. Ces cartes permettent de visualiser les variations spatiales des jours de gel à 0°C en Belgique, en mettant en évidence les sites les plus et les moins affectés par le gel.

28

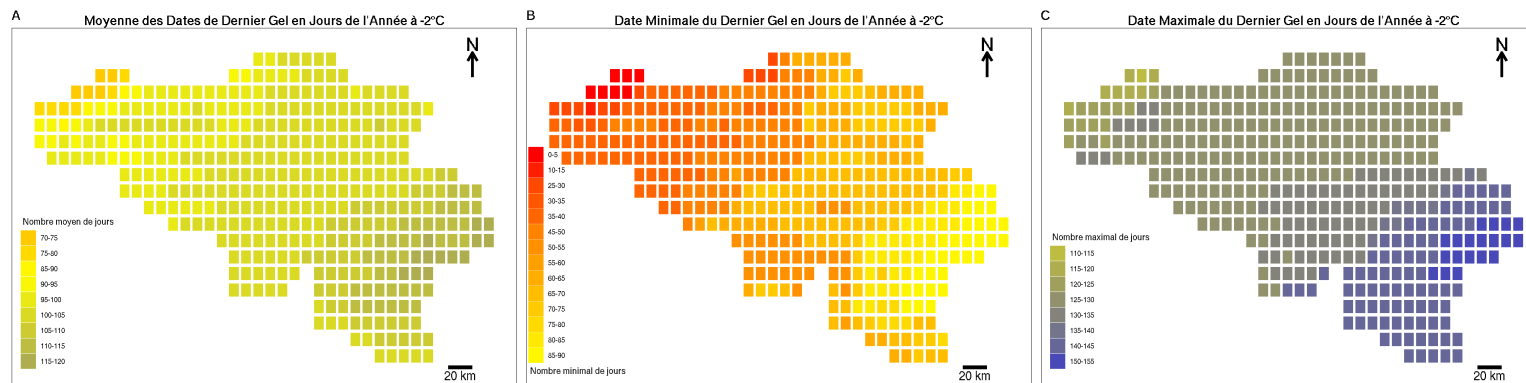


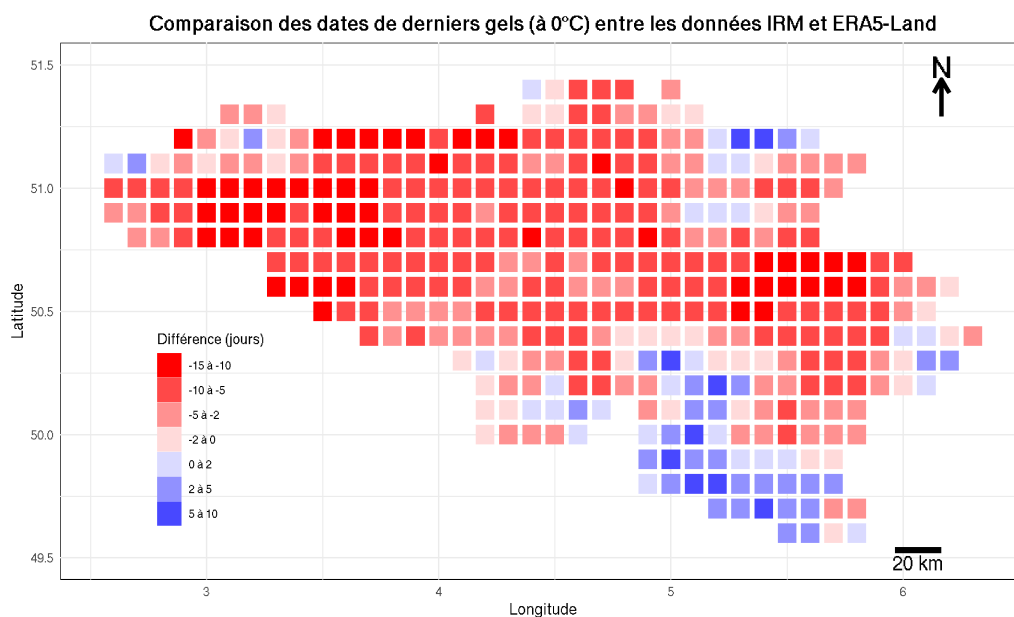
FIGURE 5.5 – Les cartes présentent l’analyse du gel à -2°C en Belgique, montrant la moyenne, le minimum et le maximum des jours de gel par site. La sous-figure (A) montre la moyenne des jours de gel à -2°C par site, indiquant les valeurs moyennes sur la période étudiée. La sous-figure (B) illustre le minimum des jours de gel à -2°C par site, indiquant les valeurs minimales observées. La sous-figure (C) présente le maximum des jours de gel à -2°C par site, montrant les valeurs maximales observées. Les couleurs des carrés représentent les différentes valeurs : les nuances de jaune à rouge indiquent des valeurs plus élevées pour la moyenne et le minimum, tandis que les nuances de bleu à gris indiquent des valeurs plus faibles pour le maximum. Ces cartes permettent de visualiser les variations spatiales des jours de gel à -2°C en Belgique, en mettant en évidence les sites les plus et les moins affectés par le gel.

5.3.1 Comparaison des données ERA5 avec les données d'observation IRM

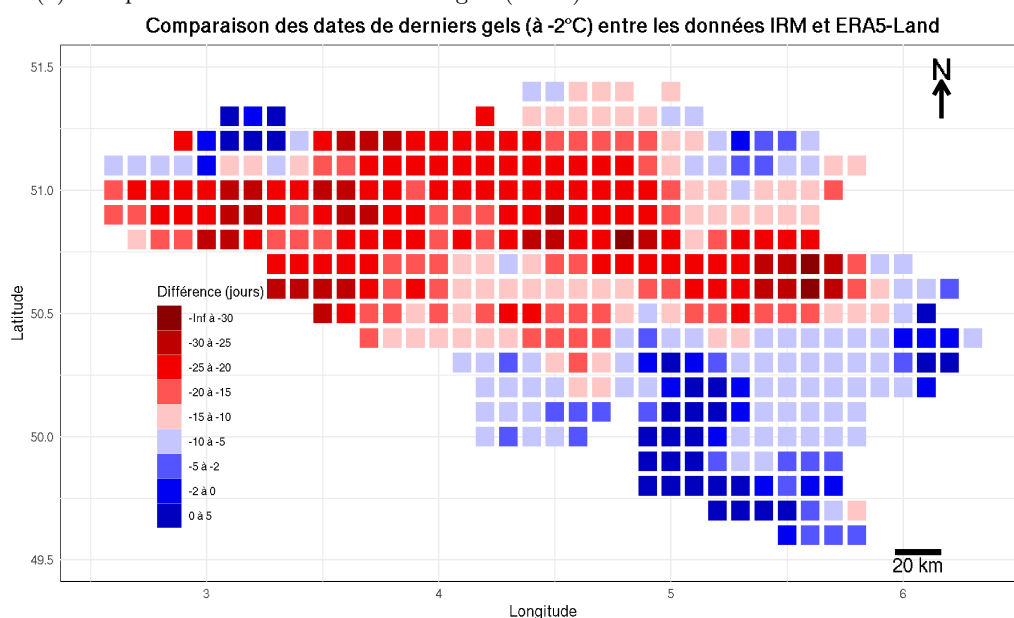
Pour valider les prédictions des dates de gel issues des données ERA5, une comparaison avec les données d'observation de l'IRM a été réalisée. Les figures ci-dessous illustrent la différence entre les dates de gel estimées par ERA5 et les dates observées par l'IRM pour les gelées à 0°C et -2°C de 1954 à 2022.

La figure 5.6 montre que les dates de gel estimées par ERA5 sont généralement plus tardives que celles observées par l'IRM. Pour les gelées à 0°C, les différences les plus faibles (allant de -2 à 2 jours) se trouvent principalement dans le sud-est de la Belgique. En revanche, les écarts plus importants sont observés dans le nord-ouest, avec des différences atteignant jusqu'à -15 jours. Cette disparité peut s'expliquer par le fait qu'ERA5 intègre les températures de la surface de la mer (SST)(Hersbach et al., 2020), ce qui n'est pas le cas de l'IRM. Cela influence particulièrement les zones côtières où l'effet modérateur de l'océan sur les températures est plus prononcé .

Pour les gelées à -2°C, les écarts sont encore plus marqués, atteignant jusqu'à -30 jours dans certaines régions. Cependant, comme pour les gelées à 0°C, les régions du sud-est montrent des différences plus faibles, suggérant que les modèles ERA5 peuvent être plus précis dans ces zones.



(a) Comparaison des dates de derniers gels (à 0°C) entre les données IRM et ERA5-Land.



(b) Comparaison des dates de derniers gels (à -2°C) entre les données IRM et ERA5-Land.

FIGURE 5.6 – Les cartes comparent les dates de derniers gels entre les données de l’IRM et celles d’ERA5-Land pour deux seuils de température différents. La sous-figure (a) montre la comparaison pour les gels à 0°C, tandis que la sous-figure (b) présente la comparaison pour les gels à -2°C. La couleur des carrés indique la différence en jours entre les dates de gel des deux sources de données : les nuances de rouge représentent des dates de gel plus tardives dans les données ERA5-Land par rapport aux données de l’IRM, tandis que les nuances de bleu indiquent des dates de gel plus précoces dans les données ERA5-Land. La comparaison est faite en calculant la différence entre la moyenne de la date de dernier gel IRM et celle d’ERA5-Land. Ces cartes permettent de visualiser les variations spatiales des différences de dates de gel entre les deux sources de données pour les seuils de 0°C et -2°C, mettant en évidence les zones où les divergences sont les plus prononcées.

Il semble intéressant d’analyser les différences moyennes des gels à 0°C et -2°C.

Pour les gelées à 0°C, la différence moyenne est de -4,86 jours, indiquant que les dates de gel estimées par ERA5 sont en moyenne plus tardives que celles observées par l’IRM. Lors des événements de gel tardif en 2017, une différence de -1,69 jours a été observée, et en 2021, cette différence était de -3,32 jours.

Pour les gelées à -2°C, la différence moyenne est de -13,395 jours, indiquant également des dates de

gel plus tardives pour ERA5 par rapport à l'IRM. Lors des événements de gel en 2017, la différence était de -9,01 jours et en 2021, de -13,89 jours.

Ces observations montrent que les données ERA5-Land tendent à prédire des dates de gel plus tardives par rapport aux observations de l'IRM, en particulier pour les gelées à -2°C . Les différences observées peuvent être justifiées par les résolutions temporelle et spatiale des données ERA5-Land, qui, bien que fiables et cohérentes, peuvent ne pas capturer toutes les variations locales fines des conditions climatiques et topographiques comme le fait l'IRM. L'intégration des températures de la surface de la mer (SST) par ERA5, notamment dans le nord-ouest du pays, influe sur la modélisation des dates de gel. Les conditions spécifiques locales, telles que la topographie, l'humidité et les microclimats, jouent également un rôle important, expliquant pourquoi les données ERA5-Land tendent à prédire des dates de gel plus tardives par rapport aux observations de l'IRM, en particulier dans les régions moins bien couvertes par les stations météorologiques.

En conclusion, bien que les données ERA5 offrent une base solide pour l'analyse climatique, il est important de prendre en compte leurs limitations de précision locale dans les analyses ultérieures. Cependant, comme les dates de débourrement sont également calculées à partir des mêmes données ERA5, les comparaisons internes entre dates de gel et de débourrement resteront cohérentes. Il faudra simplement être prudent dans l'interprétation des différences régionales et des incertitudes inhérentes aux modèles climatiques.

5.3.2 Evolution de la fréquence de gel en Belgique depuis 1950.

Avant d'analyser l'évolution du risque de gelées tardives en Belgique, examinons la fréquence de ces gelées après le débourrement pour les seuils de 0°C et -2°C .

Pour le modèle M1, le pourcentage de gel post-débourrement à -2°C est passé de 3% (1950-1988) à 5% (1989-2022) (Figure 5.8a). L'écart-type était de 18,94 pour la première période et de 19,22 pour la deuxième, indiquant une légère augmentation de la variabilité interannuelle. Pour le modèle M2, il est passé de 2% à 4% avec un écart-type passant de 13,80 à 14,82 (Figure 5.8b). La fréquence des gelées post-débourrement à -2°C a donc augmenté entre les deux périodes, indiquant un risque croissant pour la viticulture. Cependant, cette fréquence reste relativement faible, probablement en raison du fait que les températures ERA5 sont mesurées à 2 mètres au-dessus du sol, alors qu'au pied des vignes, les températures peuvent être plus basses, ce qui augmente donc le risque de gel.

Pour le modèle M1, le pourcentage de gel post-débourrement à 0°C est passé de 40% (1950-1988) à 30% (1989-2022) (Figure 5.8c). L'écart-type est passé de 40,18 à 42,86, ce qui indique une variabilité interannuelle accrue. Pour le modèle M2, il est passé de 45% à 35% avec un écart-type passant de 27,51 à 31,15 (Figure 5.8d). La fréquence des gelées post-débourrement à 0°C a diminué entre les deux périodes, mais ces événements restent significatifs pour la viticulture. Un gel à 0°C semble se produire environ une année sur trois, ce qui représente un risque important pour les vignerons.

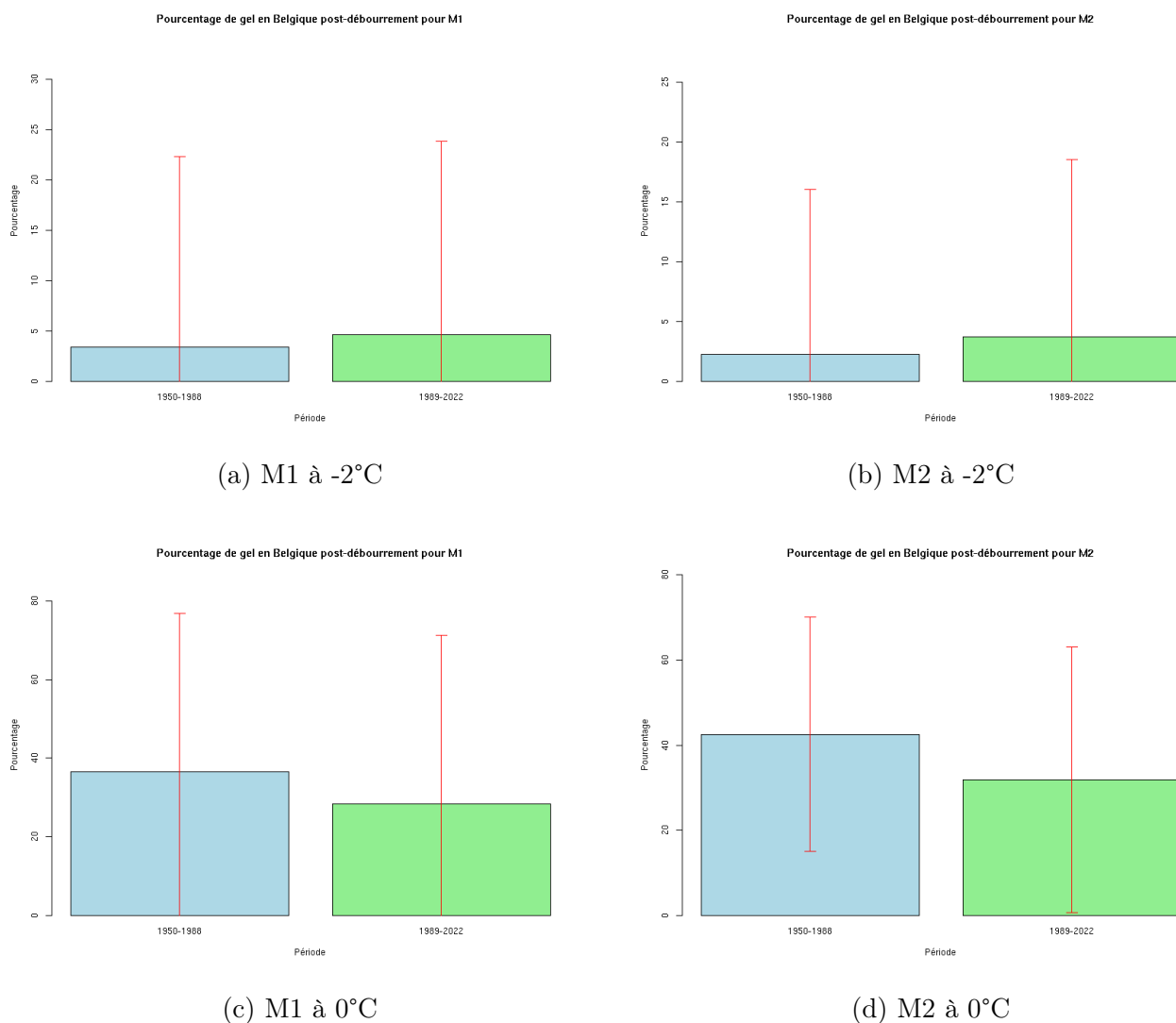


FIGURE 5.7 – Les graphiques montrent les pourcentages de jours de gel post-débournement pour deux périodes distinctes : 1950-1986 et 1987-2022, selon deux modèles (M1 et M2) et deux seuils de température (-2°C et 0°C). Chaque sous-figure représente une combinaison spécifique de modèle et de seuil de température. Les barres bleues représentent les données de la période 1950-1986, tandis que les barres vertes représentent les données de la période 1987-2022. Le graphique (a) illustre le pourcentage de gel post-débournement pour le modèle 1 à -2°C , le graphique (b) montre le pourcentage pour le modèle 2 à -2°C , le graphique (c) présente le pourcentage pour le modèle 1 à 0°C , et le graphique (d) indique le pourcentage pour le modèle 2 à 0°C .

La fréquence des gelées post-débournement montre des tendances variées pour les deux modèles et les deux seuils de température entre les périodes 1950-1988 et 1989-2022. Les températures ERA5 étant mesurées à 2 mètres au-dessus du sol, elles peuvent sous-estimer les gelées au pied des vignes, ce qui pourrait expliquer la faible fréquence observée pour les gelées à -2°C . Néanmoins, les gelées à 0°C restent suffisamment fréquentes, se produisant environ une année sur trois, posant un risque important pour les viticulteurs. Les écarts-types montrent une variabilité interannuelle qui a légèrement augmenté dans certaines conditions, ce qui souligne l'importance de stratégies d'adaptation pour protéger les vignes contre ces gelées tardives. Il est essentiel de surveiller cette variabilité pour mieux comprendre et anticiper les risques climatiques pour la viticulture.

Validation Qualitative des Gelées Tardives

Pour valider la correspondance entre les données climatiques et les événements de gel réels, nous avons utilisé les témoignages d'un vigneron qui a une parcelle à Feluy, en Belgique et des analyses

littéraires. Les témoignages couvrent les impacts significatifs des gelées après la date de débourrement de 2020 à 2022 et soulignent 2017 et 2021 comme des années particulièrement touchées (voir introduction). En 2020, une gelée le 13 mai a entraîné une perte quasi-totale des récoltes. En 2021, des gelées survenues fin avril et début mai ont endommagé 50% des vignes, et en 2022, une gelée le 1er mai a brûlé 30% des bourgeons. Cependant, les données sur les gelées à 0°C et à -2°C ne montrent pas de gel survenu après la date de débourrement pour 2020 et 2021, ce qui suggère que les dommages rapportés ces années-là ne sont pas reflétés par un décalage dans les dates de gel. En revanche, les gelées à 0°C en 2017 ont été bien capturées ainsi que celle de 2021, correspondant aux rapports de pertes importantes (Figure en annexe).

L'analyse des gelées post-débourrement révèle des variations dans la fréquence des événements de gel à 0°C et à -2°C. Les données, mesurées à deux mètres au-dessus du sol, suggèrent une occurrence modérée de ces gelées, bien que le risque réel au niveau des vignes puisse être sous-estimé, étant donné que les températures au sol tendent à être plus basses.

5.4 Analyse spatiale de l'évolution du risque de gelées tardives en Belgique depuis 1950

Dans cette section, nous chercherons à établir si le risque de gelées tardives a augmenté au fil des années en Belgique. Comme mentionné précédemment, trois hypothèses ont été envisagées (voir section 2.6).

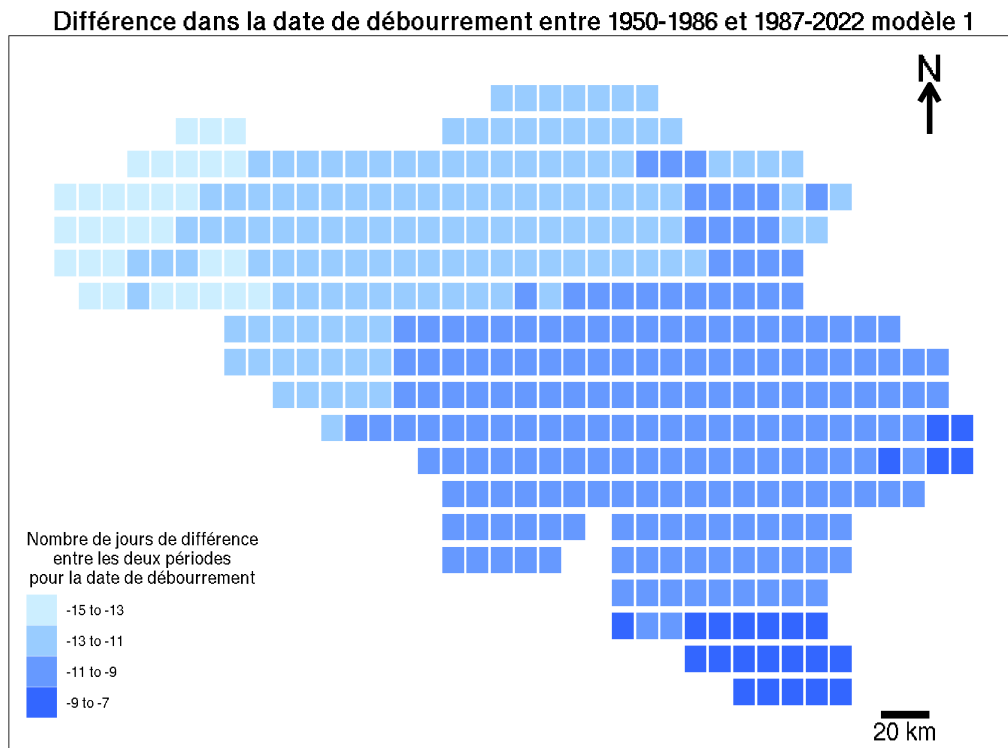
À cette fin, nous avons comparé l'évolution des dates de débourrement selon deux modèles distincts entre deux périodes différentes, ainsi que la date des derniers gels enregistrés à des températures de -2°C et 0°C.

5.4.1 Analyse de l'avancement de la date de débourrement prédit par le modèle 1 et 2 entre 1950 et 2022

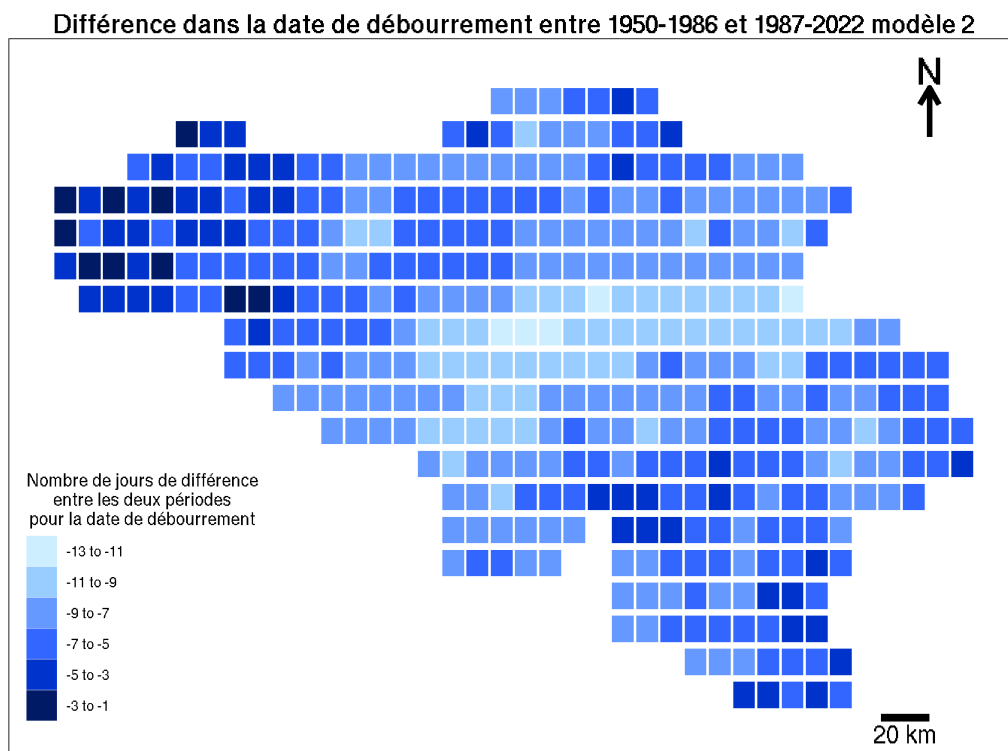
1) Analyse spatiale des modèles

L'analyse des différences de dates de débourrement entre les deux périodes (1950-1986 et 1987-2022) révèle un avancement généralisé des dates de débourrement en Belgique, comme le montrent les résultats des modèles 1 et 2. Pour le modèle 1, la différence observée varie de -15 à -7 jours, indiquant un avancement notable au fil du temps. Cet avancement présente une distribution spatiale distincte à travers la Belgique, avec les régions du nord-ouest enregistrant les avancées les plus marquées, tandis que cet effet diminue progressivement en direction du sud-est.

Le modèle 2, quant à lui, montre une différence dans les dates de débourrement s'étendant de -13 à -1 jour. Bien que ce modèle indique également un avancement des dates de débourrement, la variabilité spatiale est plus prononcée. L'avancement le plus important se situe dans le centre du pays, tandis qu'il est minimal au nord-ouest et au sud-est. Ces résultats suggèrent un changement significatif dans les dates de débourrement en Belgique, avec des avancements observés dans les deux modèles. Cependant, la distribution spatiale et l'ampleur de cet avancement varient entre les deux. Le modèle 1 montre un avancement plus homogène mais plus marqué dans certaines régions, tandis que le modèle 2 révèle une plus grande variabilité spatiale.



(a) Modèle 1



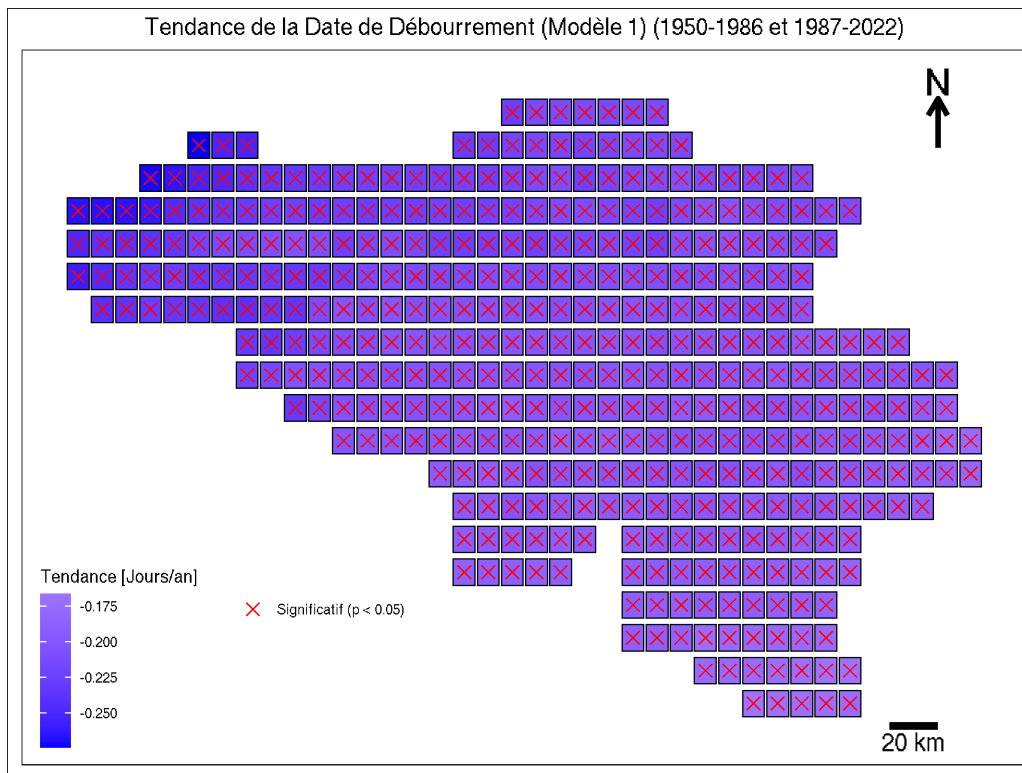
(b) Modèle 2

FIGURE 5.8 – Les cartes montrent les différences dans les dates de débourrement entre les périodes 1950-1986 et 1987-2022 en Belgique pour le modèle 1 (a) et le modèle 2 (b). La couleur des carrés indique le nombre de jours de différence dans la date de débourrement : les nuances de bleu clair à foncé représentent un avancement de la date de débourrement. Plus la valeur est importante (d'un point de vue absolu), plus l'avancement est marqué.

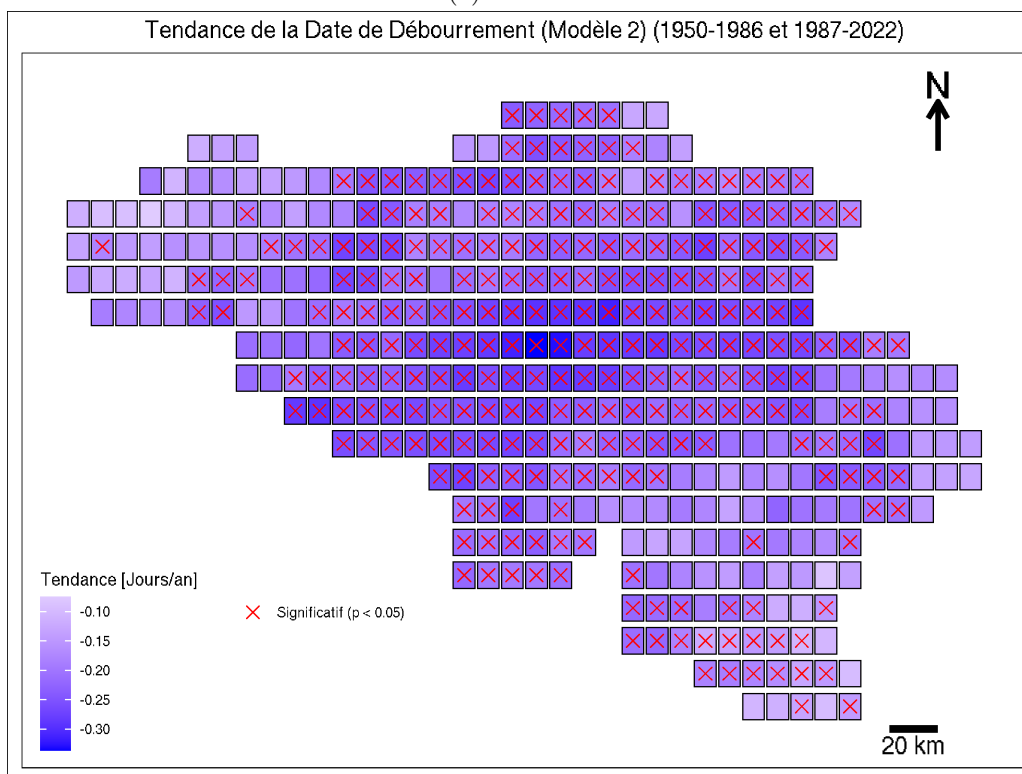
2) Analyse statistique des modèles (wilcoxon)

L'analyse des résultats des tests de Wilcoxon et de tendance pour les deux modèles fournit une perspective statistique supplémentaire. Pour le modèle 1, les cartes montrent que la majorité des sites présentent une tendance significative avec un test de Wilcoxon indiquant des p-values inférieures à 0,05. Cela confirme l'avancement des dates de débourrement observé précédemment. La distribution spatiale des sites significatifs correspond également à celle des tendances observées, renforçant l'idée d'un avancement homogène mais marqué dans certaines régions. Pour le modèle 2, bien que la variabilité spatiale soit plus prononcée, une proportion substantielle des sites montre également des tendances significatives. Les p-values des tests de Wilcoxon confirment les observations du modèle 2, avec des sites significatifs répartis principalement dans le centre et de manière plus diffuse dans d'autres régions. La plus grande variabilité spatiale dans les résultats du modèle 2 est cohérente avec les différences observées dans les tendances de débourrement.

La comparaison entre les modèles 1 et 2 révèle que, bien que les deux modèles indiquent un avancement significatif des dates de débourrement, le modèle 1 présente une homogénéité spatiale plus grande dans les sites significatifs. Le modèle 2, en revanche, montre une plus grande variabilité, avec des zones de significativité plus dispersées. Cela peut être attribué aux différences méthodologiques entre les deux modèles et souligne l'importance de considérer plusieurs approches pour une évaluation complète.



(a) Modèle 1



(b) Modèle 2

FIGURE 5.9 – Les cartes montrent les tendances des différences de date de débourrement entre les périodes 1950-1986 et 1987-2022 en Belgique pour le modèle 1 (a) et le modèle 2 (b). La couleur des carrés indique la tendance des dates de débourrement : les nuances de bleu représentent des dates de débourrement plus précoces, tandis que les nuances de rouge indiquent des dates de débourrement plus tardives. Les croix rouges marquent les zones où les changements sont statistiquement significatifs ($p < 0.05$).

Les études antérieures corroborent ces observations, indiquant que le réchauffement climatique est un facteur clé de cet avancement des dates de débourrement. Les travaux de Sgubin et al. (2018)

montrent que le réchauffement climatique a avancé la date de débourrement des vignes en France, augmentant ainsi les risques de dommages dus aux gelées tardives. Les modèles climatiques de cette étude prévoient une augmentation des températures en France, entraînant des dates de dernière gelée et de débourrement plus précoces (Sgubin et al., 2018). En Californie, une étude de l'Université de Californie à Davis a démontré que des températures plus élevées peuvent provoquer un débourrement plus précoce, exposant les jeunes pousses au risque de gelées tardives et entraînant des pertes de rendement importantes (Poni et al., 2022).

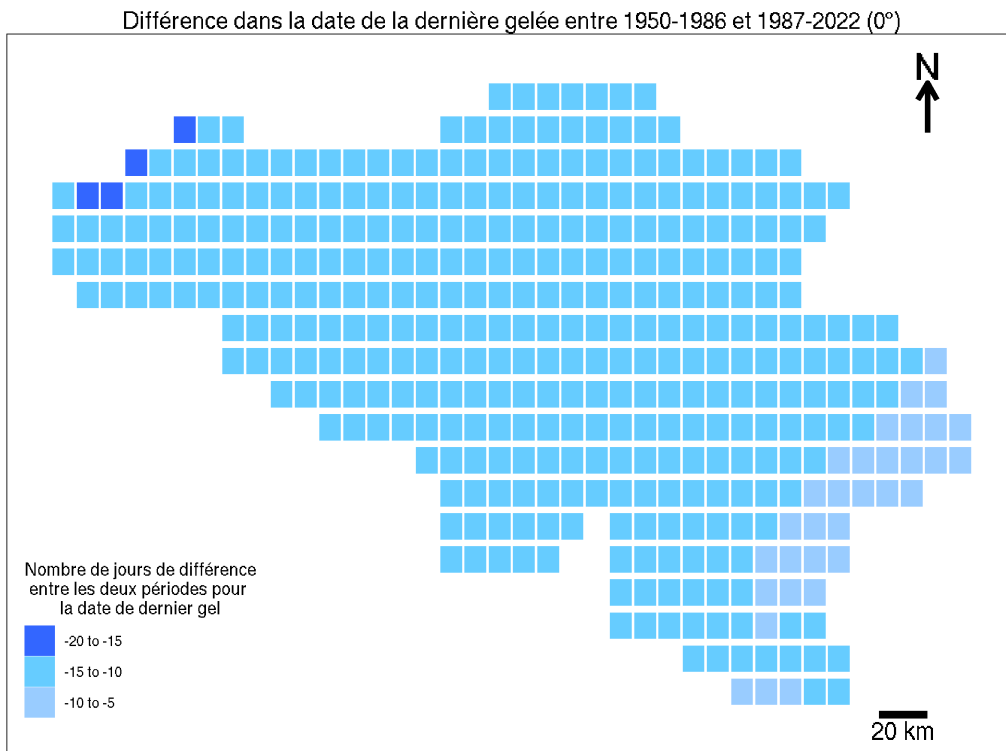
En conclusion, l'avancement observé des dates de débourrement en Belgique, corroboré par les modèles 1 et 2, est en ligne avec les tendances observées dans d'autres régions viticoles sous l'effet du réchauffement climatique. Les augmentations de température prévues continueront probablement à influencer la phénologie des vignes, nécessitant des stratégies d'adaptation pour gérer les risques accrus de gelées tardives. Ces interprétations fournissent un contexte pour comprendre les résultats de l'étude et soulignent l'importance de la gestion des risques climatiques dans la viticulture moderne. Nous aborderons les stratégies d'adaptation spécifiques à adopter dans une section ultérieure (5.4.3)

5.4.2 Analyse de l'avancement de la date de dernier gel à 0°C et -2°C entre 1950 et 2022

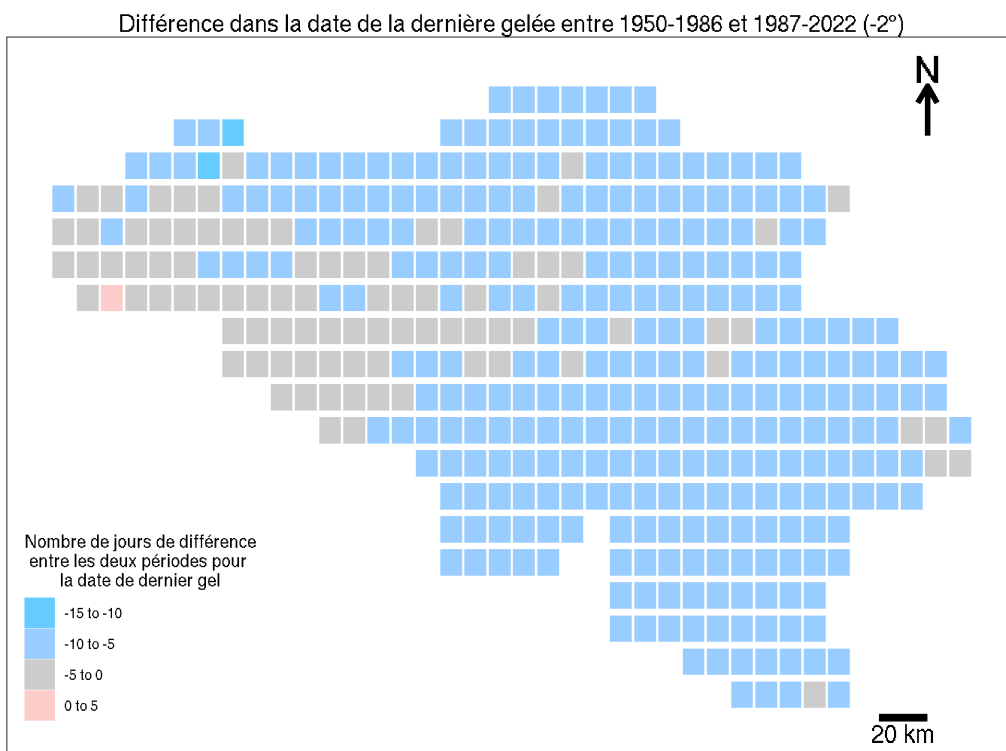
1) Analyse visuelle de la date de dernier gel à 0°C

L'analyse des différences de dates de dernier gel entre les périodes 1950-1986 et 1987-2022 révèle un avancement généralisé en Belgique. Pour les gels à 0°, la différence varie de -20 à -5 jours, avec un avancement plus marqué dans le nord-ouest et diminuant progressivement vers le sud-est. Les gels à -2° montrent une répartition plus hétérogène, avec des avancements de -10 à -5 jours sur la majorité du territoire, et de -5 à 0 jours pour l'ouest du pays, voire un léger recul dans des zones isolées.

Ces observations suggèrent que les dates de dernier gel en Belgique ont avancé au cours des décennies, avec une variation spatiale notable entre les gels à 0° et à -2°. Le réchauffement climatique sur la Belgique pourrait être un facteur déterminant dans ces changements phénologiques, affectant différemment les températures de gel selon les régions.



(a) gel 0°



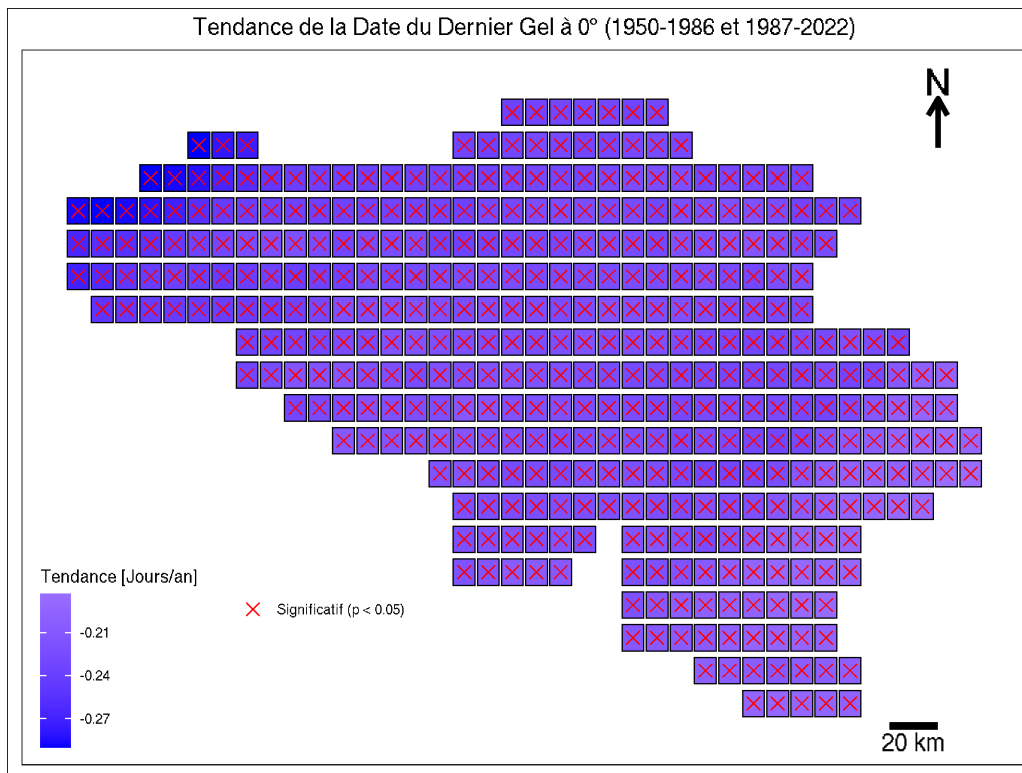
(b) gel -2°

FIGURE 5.10 – Les cartes montrent les différences dans les dates de débournement entre les périodes 1950-1986 et 1987-2022 en Belgique pour le modèle 1 (a) et le modèle 2 (b). La couleur des carrés indique le nombre de jours de différence dans la date de débournement : les nuances de bleu représentent un avancement de la date de débournement, tandis que les nuances de rouge indiquent un retard de la date de débournement. Plus la valeur absolue est importante, plus l'avancement ou le retard est marqué. Ces cartes permettent de visualiser les variations spatiales des dates de débournement, en identifiant les régions où les changements ont été les plus prononcés pour les deux modèles.

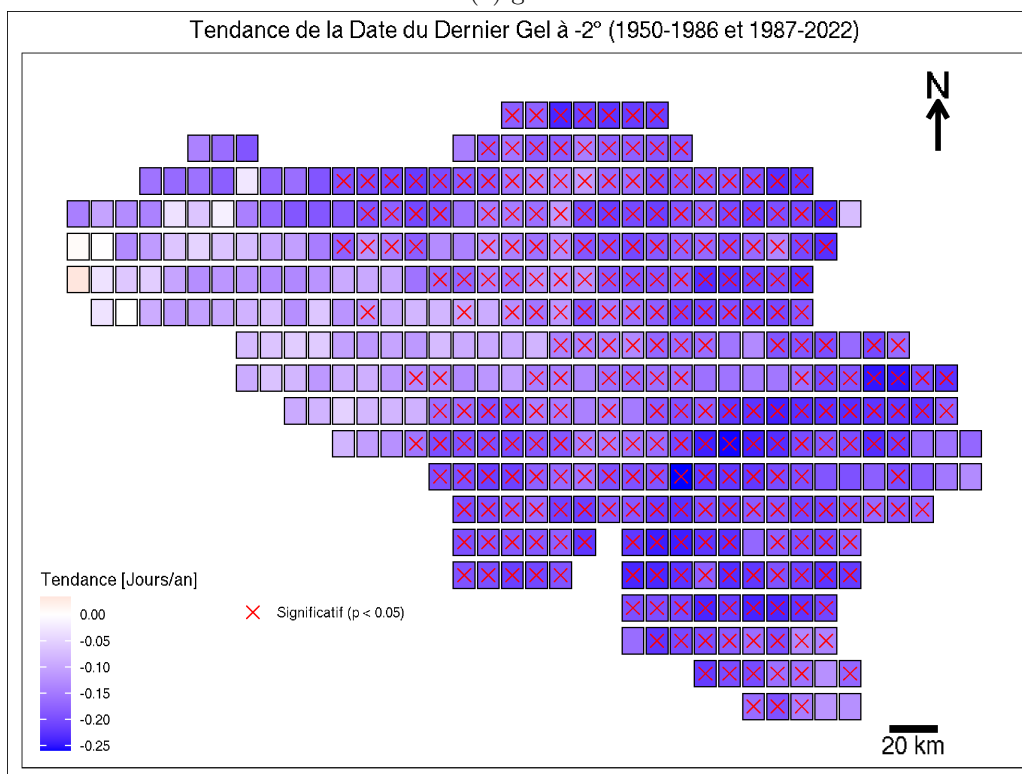
2) Analyse statistique des de la date de dernier gel (Wilcoxon)

L'analyse des tendances pour les dates de gel à 0° montre une diminution générale des jours de gel sur l'ensemble de la Belgique, avec une tendance significative dans la plupart des sites. Le nord-ouest enregistre les tendances les plus marquées, jusqu'à $-0,27$ jours par année. Pour les gels à -2° , la distribution des tendances est plus hétérogène, avec des diminutions variant de $-0,10$ à $-0,25$ jours par année, et quelques sites montrant une absence de tendance ou une légère augmentation des jours de gel.

Les cartes de tendance pour les gels à 0° et à -2° indiquent un avancement généralisé des dates de dernier gel en Belgique. Les tendances significatives varient spatialement, avec des différences notables entre les deux modèles. Le réchauffement climatique sur la Belgique a un impact différencié selon les régions et les seuils de température. Toutefois, il est essentiel de considérer l'influence de la variabilité interne du climat, qui peut affecter les tendances observées, ainsi que la rareté de certains événements extrêmes, qui peut introduire une incertitude supplémentaire dans les résultats.



(a) gel 0°



(b) gel -2°

FIGURE 5.11 – Les cartes présentent les tendances des différences de date de dernier gel pour les seuils de température de 0°C (a) et -2°C (b). La période d'analyse est divisée en deux sous-périodes : 1950-1986 et 1987-2022. Les couleurs des carrés indiquent la tendance des dates de gel : les nuances de bleu montrent une tendance vers des dates de gel plus précoces, tandis que les nuances de rouge indiquent des dates de gel plus tardives. Les croix rouges marquent les zones où les changements sont statistiquement significatifs ($p < 0.05$).

Les résultats montrent clairement une diminution des jours de gel, en accord avec les prédictions et observations des impacts du réchauffement climatique. Les tendances les plus marquées se trouvent

dans le nord-ouest, région particulièrement sensible aux augmentations de température en raison de la proximité de la mer. Cette mer joue un rôle de tampon thermique, atténuant les extrêmes de température et rendant les hivers plus doux, ce qui réduit la fréquence des jours de gel (Schrier et al., 2013).

La dynamique climatique le long de la côte belge est influencée par la mer du Nord, ce qui contribue à une baisse notable des jours de gel dans cette région. Au contraire des Ardennes belges, caractérisées par un climat continental, connaissent des hivers rigoureux et des étés plus frais, conférant à cette zone une plus grande variabilité thermique. Ces disparités régionales expliquent les variations observées dans les tendances de gel. Les données issues de l'ensemble ERA5-Land fournissent une analyse détaillée des températures minimales et maximales, permettant une modélisation précise des conditions environnementales. Ces données mettent en évidence que les fluctuations de température sont moins accentuées dans les régions côtières et ardennaises, réduisant ainsi la fréquence des épisodes de gel sévère et soutenant des tendances climatiques plus stables (Hersbach et al., 2020). La baisse du nombre de jours de gel en Belgique, soutenue par les modèles pour les seuils de 0° et -2°, illustre les effets évidents du réchauffement climatique. L'élévation globale des températures, conséquence du changement climatique, adoucit les hivers, surtout dans les zones côtières où l'influence maritime joue un rôle modérateur. Cette évolution s'aligne avec les projections climatiques mondiales, mettant en évidence comment le réchauffement contribue à la transformation des saisons et à la diminution des occurrences de gel (IPCC, 2021).

En conclusion, l'avancement observé des dates de dernier jour de gel en Belgique, confirmé par les modèles de gels à 0° et à -2°, reflète les impacts du réchauffement climatique.

5.4.3 Comparaison des périodes de sécurité en Belgique entre 1950-1986 et 1987-2022

Pour évaluer les risques de gel pour les vignes, nous avons calculé la fréquence des années durant lesquelles il y a eu au moins un événement de gel après le débourrement (section 5.3.2). En raison du faible nombre d'occurrences de gel à 0°, qui pourrait être sous-estimé car les températures ERA5 sont mesurées à 2 mètres au-dessus du sol, il est possible qu'elles ne reflètent pas correctement les gelées qui se produisent au niveau du sol, par exemple, au pied des vignes. Par conséquent, il est préférable d'analyser ces données à un niveau spatial pour obtenir une vue d'ensemble plus précise du risque. Pour pallier les imperfections liées à l'analyse de la fréquence des événements de gel, nous avons utilisé la notion de Période de Sécurité (PS) (Lenz et al., 2016 ; Scheifinger et al., 2003 ; Vitasse et al., 2018). La PS est définie comme la différence entre la date de débourrement et la date de la dernière gelée impactante.

$$PS \text{ [jours]} = \text{Date de débourrement [jours]} - \text{Date de la dernière gelée impactante [jours]} \quad (5.1)$$

Nous avons ainsi calculé des PS distinctes pour chaque combinaison de modèle et d'indice de gel. Les cartes de comparaison des PS en Belgique entre les périodes 1950-1986 et 1987-2022 révèlent des variations spatio-temporelles marquées. Elle a déjà été représentée sous forme de graphique (Figure 5.8) mais il me semblait plus adapté de représenter cette PS spatialement également.

Pour le modèle 1 (M1) sous des conditions de gel à 0°C (Figure 12a), la PS n'est pas fortement impactée au fil des années. Toutefois, un clivage notable apparaît entre le Nord-Ouest et le Sud-Est du pays. Dans le Nord-Ouest, le PS est négatif, indiquant une augmentation du risque de gel, tandis que

dans le Sud-Est, le PS est positif, réduisant ce risque. Bien que la différence absolue soit de seulement 3 jours, cette variation doit être prise en compte. Pour la grande majorité du territoire, à l'exception du sillon Sambre-et-Meuse et le sud de la province du Luxembourg, l'avancement varie entre -1 et 1 jour.

Pour le modèle 2 (M2) sous des conditions de gel à 0°C (Figure 12c), la situation est différente. La PS montre une tendance opposée pour la majorité du territoire par rapport au modèle M1. Le PS est positif pour une grande partie du territoire, variant entre 0 et plus de 10 jours, indiquant une diminution du risque de gel au fil des années pour ces régions. Les zones avec un PS positif élevé (>10 jours) sont principalement situées dans le Nord-Ouest et le Sud-Est du pays, tandis que quelques zones isolées présentent encore un PS négatif comme cela semble être le cas pour le Brabant Wallon.

Pour le modèle 1 (M1) sous des conditions de gel à -2°C (Figure 12b), les résultats montrent une répartition géographique distincte par rapport aux conditions de gel à 0°C. La plupart des régions affichent un PS négatif, indiquant une augmentation du risque de gel sévère. Les diminutions les plus importantes du risque de gel (PS fortement négatif) se trouvent dans le Nord-Ouest du pays, avec des valeurs allant jusqu'à -14 jours. Cela suggère que certaines zones, en particulier dans le Nord-Ouest, subissent des gels sévères plus fréquents et plus précoces au fil des années. En revanche, le Sud et l'Est présentent des tendances moins prononcées avec des PS variant principalement entre -5 et -3 jours. Quelques régions isolées affichent des PS positifs, indiquant une légère diminution du risque de gel.

Pour le modèle 2 (M2) sous des conditions de gel à -2°C (Figure 12d), la distribution des tendances est également hétérogène, mais avec des différences notables par rapport au modèle M1. Les PS négatifs sont plus répartis à travers le pays, atteignant jusqu'à -10 jours, surtout dans les régions centrales et orientales. Cependant, des zones significatives, notamment le Nord-Ouest et certaines parties du Sud, présentent des PS positifs, indiquant une diminution du risque de gel sévère. Ces zones avec un PS positif montrent une tendance à l'avancement de la date de dernière gelée, surtout dans le Brabant Wallon et le Sud-Est. Les variations dans les PS sont moins extrêmes que dans le modèle M1, avec des valeurs principalement comprises entre -5 et +7 jours.

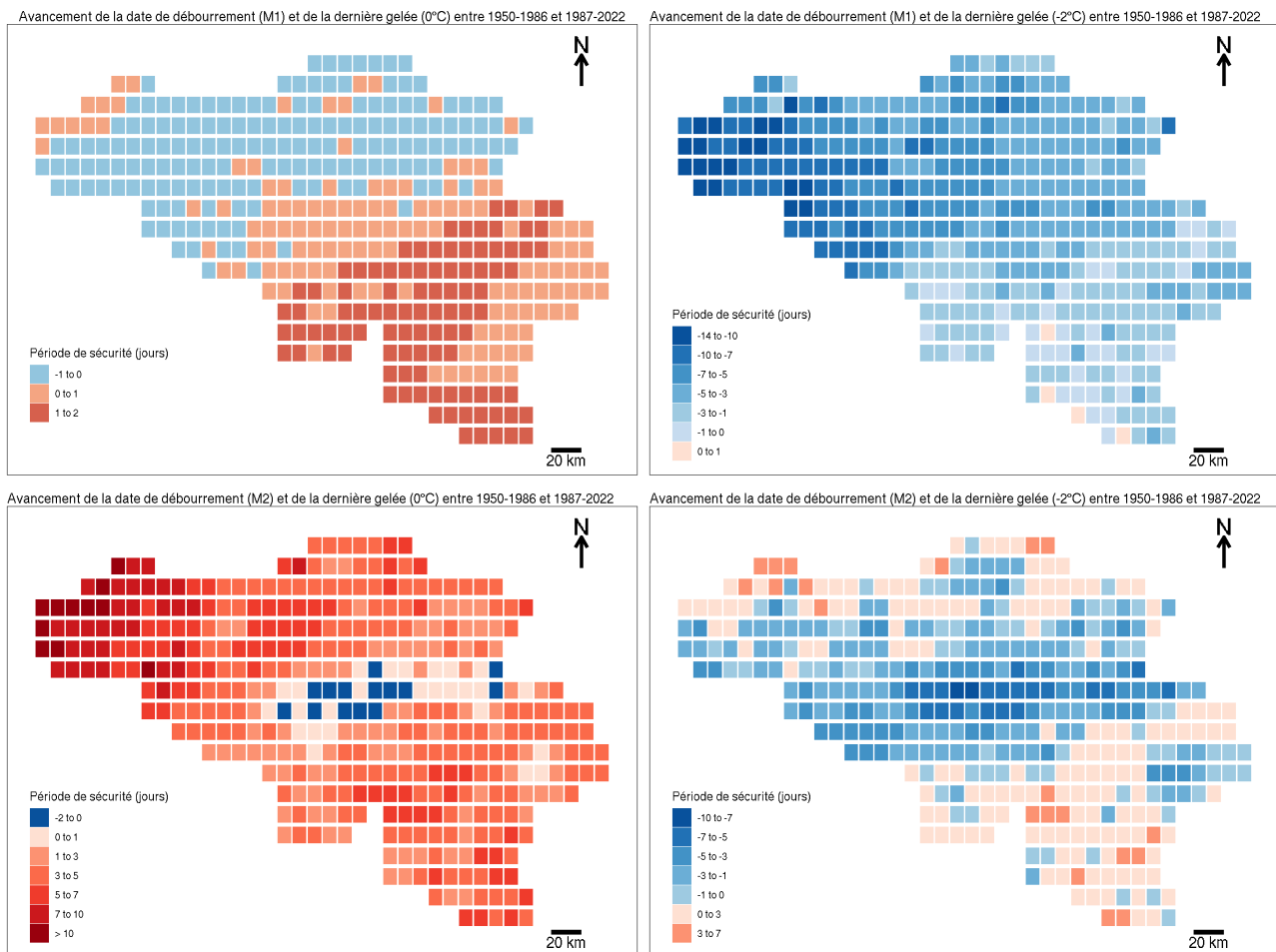


FIGURE 5.12 – Avancement des dates de débournement (M1 et M2) et des dates de dernière gelée (0°C et -2°C) entre les périodes 1950-1986 et 1987-2022 en Belgique. Les cartes montrent les différences moyennes en jours pour les différentes configurations. Les couleurs indiquent l’ampleur de l’avancement ou du retard des dates de débournement et de gelée. Les régions en rouge montrent un avancement (dates plus précoces) tandis que les régions en bleu montrent un retard (dates plus tardives).

Pour renforcer et quantifier ces observations, nous avons également procédé à une analyse statistique. Cette analyse a été effectuée à l’aide de cartes de tendance, permettant de visualiser les évolutions sur le long terme. Pour assurer la significativité des résultats, nous avons utilisé le test de Wilcoxon, un test non paramétrique adapté aux données appariées. Cette approche nous a permis de déterminer de manière rigoureuse si les variations observées étaient statistiquement significatives et de confirmer les tendances mises en évidence par l’analyse visuelle.

La première carte (en haut à gauche) représente le modèle M1 avec un gel à 0°C . On observe une tendance positive marquée dans la plupart des régions, notamment dans le centre et le Nord-Ouest du pays. Cela indique une diminution du risque de gel dans ces zones. Les valeurs de tendance varient principalement entre 0.01 et 0.04, ce qui suggère une amélioration de la PS qui reste faible. Cependant, aucun site n’a de changements significatifs

La deuxième carte (en haut à droite) montre le modèle M1 avec un gel à -2°C . Ici, les tendances sont principalement négatives dans le Nord et le centre du pays, indiquant une augmentation du risque de gel. Les valeurs de tendance négative atteignent jusqu’à -0.2 , soulignant une détérioration significative de la PS. Les sites avec des croix rouges montrent des changements significatifs, renforçant l’observation d’un risque accru.

La troisième carte (en bas à gauche) représente le modèle M2 avec un gel à 0°C . La tendance est globalement positive sur la majeure partie du territoire, particulièrement marquée dans le Nord-Ouest

avec des valeurs de tendance allant jusqu'à 0.2 jour par an. Cela indique une réduction significative du risque de gel dans ces régions au fil des années. Les sites avec des croix rouges indiquent des zones où cette diminution est statistiquement significative comme c'est le cas dans le Nord-Ouest de la Belgique.

Enfin, la quatrième carte (en bas à droite) montre le modèle M2 avec un gel à -2°C . On observe une tendance négative dominante dans le centre et le Sud-Est, avec des valeurs de tendance allant jusqu'à -0.2 jour par an, indiquant une augmentation du risque de gel. Les zones significatives se situent dans le Brabant Wallon.

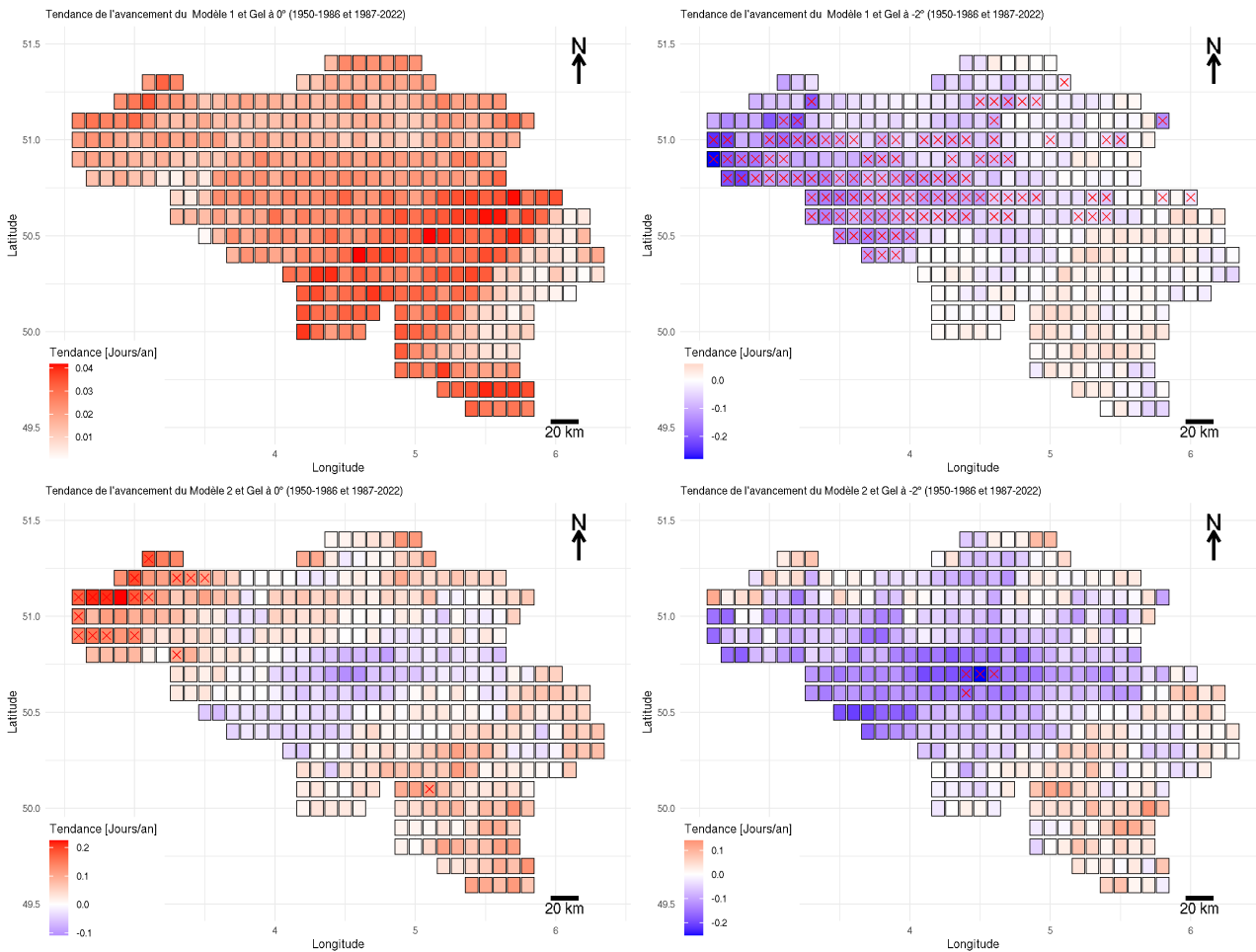


FIGURE 5.13 – Les cartes illustrent les tendances significatives des différences de date de gel pour deux seuils de température (0°C et -2°C) et deux modèles (M1 et M2) en Belgique. Les tendances positives (en rouge) indiquent une augmentation de la date de gel, tandis que les tendances négatives (en bleu) signalent une diminution de la date de gel. Les résultats sont basés sur les données ERA5-Land et les relevés de l'IRM, mettant en évidence les variations spatiales de la date de gel et les différences potentielles entre les deux sources de données. Les zones avec une significativité statistique ($p < 0.05$) sont marquées, permettant de visualiser les régions où les changements sont les plus prononcés.

En conclusion, les résultats obtenus dans cette étude indiquent que le modèle GDD (modèle 1) surpasse le modèle BRIN (modèle 2) en termes de précision pour la prédiction des dates de débournement, comme le montrent les valeurs de RMSEP. Cette différence peut être attribuée à l'incapacité de calibrer correctement la date de fin de dormance pour le modèle BRIN. Selon García de Cortázar Aauri et al. (2009), le modèle BRIN, qui prend en compte les périodes de dormance et post-dormance, devrait théoriquement être plus précis. Toutefois, la qualité des données de calibration est essentielle pour atteindre cette précision, soulignant ainsi l'importance d'une calibration locale.

L'analyse des gelées à -2°C révèle une grande variabilité dans les résultats, principalement en raison de la nature extrême de ces températures. L'étude de Perry (1998) a montré que des températures aussi

basses causent des dommages significatifs aux bourgeons de vigne, ce qui explique pourquoi de telles gelées peuvent avoir des impacts très variables.

Il est crucial de noter que les données ERA5-Land, qui prévoient souvent des dates de gel plus tardives que les relevés de l'IRM, pourraient surestimer le risque de gelées tardives. Cette observation est particulièrement pertinente pour les gels à -2°C . La comparaison avec les données de l'IRM montre que les dates de gel ERA5-Land sont souvent plus tardives, ce qui suggère que le risque réel pourrait être plus élevé si les dates de gel sont effectivement plus précoces. Cette surestimation potentielle par ERA5-Land indique que les dates de gel pourraient être plus tardives que prévu, augmentant ainsi le risque de dommages aux vignes.

L'objectif principal de cette étude était d'identifier les zones en Belgique où le risque de gelées tardives a augmenté ou diminué. Les résultats montrent que, globalement, le risque de gel augmente dans les conditions à -2°C , surtout avec le modèle GDD (modèle 1), qui a montré une meilleure capacité prédictive. Cependant, en raison de la faible fréquence des gelées à -2°C , ces résultats doivent être interprétés avec prudence. Pour les gelées à -2°C , le modèle BRIN (modèle 2) montre également des sites significatifs, notamment dans le Brabant Wallon, suggérant que ce modèle peut être utile pour des analyses spécifiques. Cependant, cette observation nécessite une vérification plus approfondie. Les résultats de Vitasse et al. (2018) confirment que les modèles phénologiques peuvent montrer des différences régionales significatives dues aux conditions locales de dormance et de post-dormance.

En ce qui concerne les gelées à 0°C , le modèle BRIN (modèle 2) indique une diminution significative du risque dans le nord-ouest de la Belgique. Malgré cela, le modèle BRIN reste moins robuste que le modèle GDD, bien qu'il conserve une certaine robustesse selon les régions et les conditions analysées. Cette constatation est cohérente avec les études de Sgubin et al. (2018), qui ont montré que les projections climatiques peuvent varier considérablement en fonction des modèles utilisés, affectant ainsi la robustesse des prévisions des dates de gel. Il faut tout de fois ne pas négliger le fait que les études sont pour la plupart des projections et donc discutent d'hypothèses futures tandis que dans le cadre de cette étude, on analyse l'évolution depuis 1950 jusqu'à 2022.

La littérature montre que le réchauffement climatique a des effets mixtes sur le risque de gelées tardives. D'une part, l'avancement des dates de débourrement augmente l'exposition des jeunes bourgeons aux gelées tardives. D'autre part, la diminution générale des jours de gel réduit ce risque. Nos résultats confirment cette complexité, montrant une variabilité spatiale et temporelle significative des risques de gelées tardives en Belgique. Meier et al. (2018) ont également noté que le réchauffement climatique peut à la fois réduire la fréquence des jours de gel tout en augmentant la vulnérabilité des cultures en avançant les dates de débourrement.

L'étude de Jones et Davis (2000) a révélé que les changements phénologiques des vignes, tels que le débourrement, sont influencés par les températures hivernales et printanières. Ils ont observé qu'une augmentation des températures moyennes entraîne une date de débourrement plus précoce, ce qui pourrait indirectement réduire le risque de gel tardif en raccourcissant la période pendant laquelle les bourgeons sont vulnérables. Cependant, leur étude ne s'est pas penchée sur l'avancement des dates de gelées tardives en lien avec le réchauffement climatique. Nos résultats du modèle M2 montrent que même si les dates de gelées tardives ne changent pas, le risque de gel à un seuil de 0°C diminue avec l'augmentation des températures moyennes. Cela signifie que, dans un contexte de températures plus élevées, les vignes ont moins de chances de subir des gels tardifs, rejoignant ainsi partiellement les conclusions de Jones et Davis, tout en ajoutant une nuance supplémentaire sur la réduction des risques de gel dans des conditions climatiques changeantes.

Nos analyses indiquent une augmentation du risque de gelées tardives dans certaines régions de

Belgique, notamment sous les conditions extrêmes de -2°C . Cela correspond aux résultats de Combe (2021) et Vitasse et al. (2018), qui ont montré que le réchauffement climatique peut paradoxalement augmenter le risque de gelées tardives en avançant les dates de débourrement sans une réduction proportionnelle des jours de gel. Cependant, dans certaines régions, le risque semble diminuer, en particulier pour les gelées à 0°C , ce qui est cohérent avec les observations de Sgubin et al. (2018) en France.

Les résultats de notre étude ont des implications pratiques importantes pour la viticulture en Belgique. Les régions présentant des risques accrus de gelées tardives devront envisager des mesures de protection spécifiques, telles que l'utilisation de bougies antigel, d'aspersion d'eau ou de ventilateurs. De plus, la sélection de cépages moins sensibles aux gelées tardives pourrait être une stratégie d'adaptation viable. Les viticulteurs devraient également suivre de près les prévisions météorologiques locales et utiliser des modèles phénologiques calibrés localement pour planifier les interventions de protection.

Pour améliorer la précision des prédictions et la robustesse des modèles, il est crucial de continuer à affiner les paramètres des modèles phénologiques en fonction des conditions locales. Des collaborations avec les viticulteurs locaux pour collecter des données phénologiques détaillées seraient bénéfiques. De plus, l'intégration de données climatiques plus fines et localisées, ainsi que l'utilisation de technologies de modélisation avancées, pourrait renforcer les capacités prédictives des modèles et leur applicabilité pratique.

En conclusion, bien que le modèle GDD ait montré de meilleures performances globales, il est essentiel de continuer à affiner les modèles phénologiques, en particulier en tenant compte des spécificités locales et des limites des données disponibles. Le suivi attentif des conditions climatiques et des gelées reste crucial pour la viticulture belge, afin de développer des stratégies d'adaptation efficaces face aux changements climatiques. Des études futures devraient se concentrer sur la calibration locale des modèles de dormance et sur l'intégration de données climatiques plus précises pour améliorer la robustesse des prédictions. Par ailleurs, la création d'une base de données en opendata similaire à celle en France faciliterait les études et contribuerait au développement de la profession en Belgique.

Chapitre 6

Conclusion

L'objectif principal de cette étude était de déterminer si le risque de gelées tardives a évolué en Belgique depuis 1950. Pour ce faire, nous avons formulé trois hypothèses : une stabilité du risque, une diminution du risque, et une augmentation du risque de gelées tardives.

Les résultats de l'analyse montrent un avancement significatif des dates de débournement des vignes en Belgique, ce qui est en accord avec les tendances observées dans d'autres régions viticoles affectées par le réchauffement climatique. En effet, cet avancement est illustré par les données issues des deux modèles utilisés, GDD et BRIN, qui prévoient une progression des phases phénologiques des vignes, suggérant que l'augmentation des températures joue un rôle clé dans ces changements.

En analysant les dates des dernières gelées, nous constatons une complexité accrue : bien que les jours de gel soient généralement moins fréquents, les gelées à -2°C présentent une variabilité spatiale notable. Cette tendance est particulièrement marquée dans les Hautes Fagnes et les régions élevées, où l'exposition accrue des bourgeons à ces températures critiques souligne un risque accru de gelées tardives. Ce phénomène paradoxal met en lumière l'effet mixte du réchauffement climatique : alors qu'il diminue globalement les occurrences de gelées, il avance également la date de débournement, exposant ainsi les jeunes bourgeons à des risques de gelées tardives plus importants.

Les analyses spatiales des dernières gelées et des dates de débournement indiquent que les régions de basse altitude, telles que les zones côtières, montrent un recul plus prononcé des dates de dernière gelée par rapport aux régions intérieures. En revanche, les zones de haute altitude, notamment les Hautes Fagnes, continuent de subir des gelées tardives persistantes, ce qui constitue un défi majeur pour les viticulteurs locaux. Les modèles GDD et BRIN convergent sur ce point, confirmant une diminution générale du nombre de jours de gel, mais une persistance des risques de gelées tardives pour certaines zones spécifiques.

Les implications pour la viticulture en Belgique sont considérables. Les stratégies d'adaptation devront inclure des mesures spécifiques telles que l'implantation de systèmes de protection antigél, l'optimisation des pratiques culturales pour retarder le débournement, et le choix de cépages moins vulnérables aux gelées. En effet, ces mesures sont cruciales pour atténuer les impacts des gelées tardives, en particulier dans les régions où le risque est croissant.

Cependant, cette étude présente certaines limites. L'utilisation des données ERA5, qui mesurent la température à 2 mètres au-dessus du sol, peut surestimer la véritable occurrence de gelées, car les températures au niveau du sol peuvent être significativement plus basses. Cette limitation a été confirmée lors de la validation des données avec des observations locales, révélant que certaines gelées tardives n'ont pas été capturées par les réanalyses ERA5. Cette sous-estimation potentielle souligne l'importance de compléter les modèles avec des données au sol plus précises pour obtenir une image

plus fidèle du risque de gelées tardives.

En conclusion, notre recherche démontre une tendance globale vers un avancement des dates de débourrement et une variabilité accrue dans les dates de dernière gelée, avec un risque de gelées tardives qui persiste, voire augmente dans certaines régions de Belgique. La poursuite de ces observations et l'amélioration des bases de données climatiques seront essentielles pour permettre une gestion adaptative efficace face aux changements climatiques. L'amélioration continue des modèles phénologiques et l'implémentation de stratégies d'adaptation appropriées seront cruciales pour assurer la résilience de la viticulture belge dans un climat en mutation.

Bibliographie

- Bosshart, L. (2020). Switching grape varieties can help save world's wine-growing regions : UBC study. UBC News. <https://news.ubc.ca/2020/01/switching-grape-varieties-can-help-save-worlds-wine-growing-regions-ubc-study/> consulté le 20/6/2024
- Cantat, O., Planchon, O., Quénot, H., Savouret, E., Bois, B., Beauvais, F., & Brunel-Muguet, S. (2019). Gelées tardives et viticulture en basse et moyenne Vallée de la Loire (France) : Approche géoclimatique d'un aléa météorologique majeur pour la vigne. *Climatologie*, 16, 91-128. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1413> consulté le 20/6/2024
- Catinca, G., Bois, B., Castel, T., Larmure, A., Ouvrié, M., & Richard, Y. (2019). Analyse spatiale de l'évolution du risque de gel sur la vigne en Bourgogne-Franche-Comté.
- Clément, J.-M. (1981). Larousse Agricole. Larousse.
- Combe, M. (2021). Gel tardif : Un risque de plus en plus probable à cause du réchauffement. *Natura Sciences*. <https://www.natura-sciences.com/comprendre/gel-tardif-rechauffement-climatique.html> consulté le 20/6/2024
- Costes, G. (2023). La Wallonie, nouveau pays du vin.
- Galet, P. (2000). Précis de viticulture : à l'usage des ingénieurs agronomes, des étudiants en agronomie et en œnologie, des techniciens des lycées agricoles, et des professionnels de la viticulture (P. Galet, Ed.).
- Garcia de Cortazar-Atauri, I., ATAURI, C., BRISSON, N., SEGUIN, B., GAUDILLERE, J., & BACULAT, B. (2005). Simulation of budbreak date for vine. The BRIN model. Some applications in climate change study.
- García de Cortázar-Atauri, I., Brisson, N., & Gaudillere, J. P. (2009). Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *International Journal of Biometeorology*, 53(4), 317-326. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0217-4> consulté le 20/6/2024
- Gel et dégâts de gel sur vigne. (s. d.). IFV Occitanie. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/gel-et-degats-de-gel-sur-vigne/> consulté le 20/6/2024
- Gu, L., Hanson, P. J., Post, W. M., Kaiser, D. P., Yang, B., Nemani, R., Pallardy, S. G., & Meyers, T. (2008). The 2007 Eastern US spring freeze : Increased cold damage in a warming world? *Bioscience*, 58(3), 253-26.
- Helali, M. O., Msaddek, M. H., & Nasr, S. B. (2020). Anomalies of climate extremes and their impacts on cereal yield in Tunisia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(4), 3859-3873.
- Hufkens, K., Friedl, M. A., Keenan, T. F., Sonnentag, O., Bailey, A., O'Keefe, J., & Richardson, A. D. (2012). Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out in a North American deciduous forest. *Biogeosciences*, 9(9), 3427-3441.

- Institut Royal Météorologique. (s. d.). Définition d'un jour de gel. Dans *Atlas climatique*. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/atlas-climatique/cartes-climatiques/temperature-de-lair/indices-de-temperature/jours-de-printemps> consulté le 18/6/2024
- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). (2023). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1re éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896> consulté le 18/6/2024
- Joly, D., Brossard, Thierry, & Cardot, H. (s. d.). Les types de climats en France, une construction spatiale. <https://journals.openedition.org/cybergeogeo/23155> consulté le 18/6/2024
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2005). Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*, 73(3), 319-343. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2> consulté le 18/6/2024
- Lenz, A., Hoch, G., Körner, C., & Vitasse, Y. (2016). Convergence of leaf-out towards minimum risk of freezing damage in temperate trees. *Functional Ecology*, 30(9), 1480-1490. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12623> consulté le 18/6/2024
- Leolini, L., Costafreda-Aumedes, S., A. Santos, J., Menz, C., Fraga, H., Molitor, D., Merante, P., Junk, J., Kartschall, T., Destrac-Irvine, A., van Leeuwen, C., C. Malheiro, A., Eiras-Dias, J., Silvestre, J., Dibari, C., Bindi, M., & Moriondo, M. (2020). Phenological Model Intercomparison for Estimating Grapevine Budbreak Date (*Vitis vinifera* L.) in Europe. *Applied Sciences*, 10(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/app10113800> consulté le 18/6/2024
- L'histoire de la viticulture en Belgique – Vin de Liège, domaine viticole. (2017). Vin de Liège. <https://www.vindeliege.be/la-vigne-en-belgique/1-histoire/> consulté le 18/6/2024
- Madelin, M. (2004). L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne. Modélisation spatiale à une échelle fine des écoulements de l'air et des températures minimales [Phdthesis, Université Paris-Diderot - Paris VII]. <https://theses.hal.science/tel-00008906> consulté le 18/6/2024
- McClenaghan, E. (2023). The Wilcoxon Signed-Rank Test. *Immunology Microbiology from Technology Networks*. <http://www.technologynetworks.com/immunology/articles/the-wilcoxon-signed-rank-test-370384> consulté le 20/6/2024
- Meier, M., Fuhrer, J., Holzkämper, A. (2018). Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley. *International Journal of Biometeorology*, 62(6), 991-1002. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1501-y> consulté le 18/6/2024
- Météo-France. (2020). 2020 : l'année la plus chaude en France depuis 1900. Repéré le 13 août 2024, à l'adresse <https://www.meteofrance.com/actualites/8506196-2020-1-annee-la-plus-chaude-en-france-depuis-1900> consulté le 17/3/2024
- Omazić, B., Telišman Prtenjak, M., Bubola, M., Meštrić, J., Karoglan, M., Prša, I. (2023). Application of statistical models in the detection of grapevine phenology changes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 341, 109682. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109682> consulté le 20/6/2024
- Parker, A., de Cortázar-Atauri, I. G., Chuine, I., Barbeau, G., Bois, B., Boursiquot, J.-M., Cahurel, J.-Y., Claverie, M., Dufourcq, T., Gény, L., Guimberteau, G., Hofmann, R. W., Jacquet, O., Lacombe, T., Monamy, C., Ojeda, H., Panigai, L., Payan, J.-C., Lovelle, B. R., ... van Leeuwen, C. (2013). Classification des variétés selon leur moment de floraison et de véraison à l'aide d'une

- approche de modélisation : Une étude de cas pour l'espèce de vigne *Vitis vinifera* L. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 249-264. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.005> consulté le 17/3/2024
- Pérarnaud, V., Raynal, N. (1991). Agrométéorologie. Ecole nationale de la météorologie.
 - Perry, K. B. (1998). Basics of frost and freeze protection for horticultural crops. *HortTechnology*, 8(1), 10-15.
 - Petit âge glaciaire. (2024). In Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Petit_%C3%A2ge_glaciaire&oldid=217514448 consulté le 17/3/2024
 - Poling, E. B. (2008). Spring Cold Injury to Winegrapes and Protection Strategies and Methods. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.6.1652> consulté le 17/3/2024
 - Poni, S., Sabbatini, P., Palliotti, A. (2022). Facing Spring Frost Damage in Grapevine : Recent Developments and the Role of Delayed Winter Pruning – A Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 73(4), 211-226. <https://doi.org/10.5344/ajev.2022.22011> consulté le 17/3/2024
 - Production record pour le vin belge en 2023—FOD Economie (communiqué de presse). (s. d.). <https://news.economie.fgov.be/236171-production-record-pour-le-vin-belge-en-2023> consulté le 17/3/2024
 - Reynier, A. (2011). Manuel de viticulture : Guide technique du viticulteur. Lavoisier.
 - RMI - Climate projections. (s. d.). KMI. <https://www.meteo.be/en/research-v1/scope-of-research/klimaatprojecties> consulté le 18/3/2024
 - Rochard, J., Monamy, C., Pauthier, B., Rocque, A. (2019). Stratégie et équipements de prévention vis-à-vis du gel de printemps et de la grêle. Perspectives en lien avec les changements climatiques, projet ADVICLIM. *BIO Web of Conferences*, 12, 01012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191201012> consulté le 17/3/2024
 - Scheifinger, H., Menzel, A., Koch, E., Peter, Ch. (2003). Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 74(1), 41-51. <https://doi.org/10.1007/s00704-002-0704-6> consulté le 20/3/2024
 - Schrier, G., Van den Besselaar, E., Tank, A., Verver, G. (2013). Monitoring European average temperature based on the E-OBS gridded data set. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 118, 8890. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50444> consulté le 17/3/2024
 - Schwartz, M. D. (2006). Phenology : An integrative environmental science. Springer.
 - Sgubin, G., Swingedouw, D., Dayon, G., García de Cortázar-Atauri, I., Ollat, N., Pagé, C., van Leeuwen, C. (2018). The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 226-242. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253> consulté le 17/6/2024
 - SPF Economie. (2023, August 2). Production record pour le vin belge en 2023. SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Énergie. <https://news.economie.fgov.be/236171-production-record-pour-le-vin-belge-en-2023> consulté le 17/6/2024
 - TEMPO - Portail de données phénologiques. (s. d.). <https://data.pheno.fr/> consulté le 17/3/2024
 - This, P., Boursiquot, J.-M. (1999). Essai de définition du cépage. *Progrès Agricole et Viticole*, 116.
 - Tomasi, D., Jones, G. V., Giust, M., Lovat, L., Gaiotti, F. (2011). Grapevine Phenology and Climate Change : Relationships and Trends in the Veneto Region of Italy for 1964-2009. *American Journal of Enology and Viticulture*, 62(3), 329-339. <https://doi.org/10.5344/ajev>.

2011.10108 consulté le 17/3/2024

- Unterberger, C., Brunner, L., Nabernegg, S., Steininger, K., Steiner, A., Stabentheiner, E., Monschein, S., Truhetz, H. (2018). Spring frost risk for regional apple production under a warmer climate. PLOS ONE, 13, e0200201. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200201> consulté le 17/3/2024
- Vanel, M. (2021, avril 12). Gel dans le vignoble wallon : Relativement peu de dégâts, mais rien n'est gagné. Marc Vanel. <https://www.marcvanel.be/gel-2021-wallonie/> consulté le 17/3/2024
- van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., de Rességuier, L., Ollat, N. (2019). An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations. *Agronomy*, 9(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514> consulté le 21/3/2024
- Vinispi. (s. d.). Que sont les gelées de printemps? <https://www.vinispi.com/que-sont-les-gelees-de-printemps/> consulté le 17/3/2024
- Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005> consulté le 17/3/2024

Annexes

TABLE 1 – Récapitulatif des valeurs de F_u , C_c , et RMSEP pour différents cépages, utilisant les modèles phénologiques GDD et BRIN. Les modèles GDD sont évalués à deux seuils de base ($T_b = 5^\circ C$ et $T_b = 10^\circ C$), tandis que le modèle BRIN inclut des paramètres supplémentaires pour C_c . Ces données servent à la calibration et à la validation des modèles pour les cépages spécifiés, offrant un aperçu de leur performance en termes de prédiction des dates de débourrement.

Cépage	Observations	GDD (10°C)		GDD (5°C)		BRIN		
		F_u	RMSEP	F_u	RMSEP	F_u	C_c	RMSEP
Cabernet Sauvignon	63	52.5	12.5	318.6	9.8	9169.4	106.8	9.4
Chasselas	89	37.2	17.9	257.8	14.6	6971.8	106.8	14.2
Chardonnay	60	33.3	18.9	220.1	12.6	6576.7	101.2	11.6
Grenache	40	57.0	9.6	321.3	9.4	9174.3	102.2	8.8
Merlot	54	38.6	16.1	265.3	7.4	7595.5	105.7	8.2
Pinot Noir	72	38.4	9.1	258.4	7.8	7468.9	103.6	9.1
Riesling	64	39.7	13.4	257.7	9.2	7471.3	108.2	10.8
Sauvignon	63	34.2	12.8	294.4	10.0	8352.8	103.9	9.5
Syrah	64	39.2	16.1	265.3	11.0	7818.6	99.2	11.1
Ugni Blanc	47	48.0	11.9	284.7	10.5	9145.4	94.3	10.5

Autobiographie

Coordonnées

- Loïc Delsinne
- 01/05/1998
- Avenue de Biolley, n°54, 1150 Bruxelles
- loicdelsinne@hotmail.com
- +32470220612

Parcours Académique

- **2010-2016** Ecole secondaire lycée Mater-Dei
- **2016-2018** Sciences de l'ingénieur, orientation bioingénieur à l'Université Catholique de Louvain.
- **2018-2022** Bachelier en sciences géographiques, orientation générale, à l'Université Catholique de Louvain.
- **2021-2024** Master [120] en sciences géographiques, orientation climatologie, à finalité approfondie, à l'Université Catholique de Louvain.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des sciences

Place des sciences, 2 bte L6.06.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/sc