

Faculté des sciences

Evolution du risque de gelées tardives en forêt wallonne avec le changement climatique

Auteur: **Boris BORLON**

Promoteurs: **Prof. Hugues GOOSSE, Prof. Mathieu JONARD**

Lecteur: **Prof. Patrick MEYFROIDT**

Année académique: 2021-2022

Master [120] en sciences géographiques, orientation climatologie,
à finalité approfondie

Remerciements

Je remercie grandement mes deux promoteurs, Monsieur Goosse et Monsieur Jonard pour leur accompagnement au cours de cette dernière année. J'ai eu l'opportunité de travailler et de recevoir une expertise dans les deux disciplines que sont la climatologie et la foresterie. J'ai eu droit à de nombreuses réunions, commentaires, relectures et modifications ayant nécessité une partie de votre temps non négligeable.

Je remercie également Monsieur André pour la participation à de nombreuses réunions et l'aide technique concernant le modèle HETEROFOR.

Enfin, je remercie l'Observatoire Wallon de la Santé des Forêts et plus particulièrement Madame Bay pour les données phénologiques ainsi que l'Institut Royal Météorologique pour les données météorologiques.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Revue de la littérature	3
2.1	Changement climatique et forêts	3
2.2	Changement climatique et phénologie	5
2.3	Modélisation phénologique	6
2.4	Le gel et les forêts	8
2.5	Changement climatique et gelées tardives	9
2.6	Objectifs	12
3	Matériel	13
3.1	Zone d'étude	13
3.2	Le module phénologique du modèle HETEROFOR	14
3.3	Données	16
4	Méthodologie	18
4.1	Validation du module phénologique	18
4.2	Détermination de la sensibilité propre aux espèces	19
4.3	Indicateurs de gelées tardives	20
4.4	Validation des données météorologiques/climatiques	21
4.5	Simulation historique des indicateurs de gelées tardives	22
4.5.1	Évolution historique des indicateurs de gelées tardives	22
4.5.2	Adéquation des indicateurs avec des observations de dégâts	22
4.6	Projection des indicateurs de gelées tardives	23
4.6.1	Comparaison entre la période historique et la période future	23
4.6.2	Tendance jusqu'en 2100	24
5	Résultats et Discussion	25
5.1	Validation du module phénologique	25
5.2	Détermination de la sensibilité propre aux espèces	28
5.3	Validation des données météorologiques/climatiques	30
5.4	Simulation historique des indicateurs de gelées tardives	34
5.4.1	Évolution historique du débourrement et des indicateurs de gelées tardives	34
5.4.2	Adéquation des indicateurs avec des observations de dégâts	37

5.5	Projection des indicateurs de gelées tardives	39
5.5.1	Comparaison entre la période historique et la période future	39
5.5.2	Tendance jusqu'en 2100	42
6	Conclusion	48
7	Références	50
8	Annexes	59

Introduction

Un changement du système climatique dont l'homme est le principal responsable (extrêmement probable) ne fait désormais plus aucun doute (IPCC, 2021). Ce changement induit un réchauffement moyen à l'échelle globale mais modifie également les caractéristiques des événements extrêmes (IPCC, 2021 ; Seneviratne et al., 2012). Ce genre d'événements peut être responsable de dégâts importants sur notre société et l'environnement (Nicholls et Alexander, 2007). Parmi ces extrêmes, les gelées, les sécheresses ou encore les vagues de chaleur ont la capacité d'impacter la croissance et la vitalité des forêts (Dittmar et al., 2006 ; Allen et al., 2015 ; Teskey et al., 2015).

De plus, le cycle phénologique des plantes, qui leur permet entre autres d'éviter l'exposition à des conditions environnementales défavorables dont le gel, est sensible au climat et plus particulièrement à la température (Tang et al., 2016 ; Chuine et Régnière, 2017). Par conséquent, on peut logiquement s'attendre à ce que le changement climatique ait un impact phénologique important (Chuine et al., 2003 ; de Wergifosse, 2021). D'ailleurs, des modifications phénologiques ont été régulièrement signalées dans la littérature, que ce soit par des observations in-situ ou par satellites (détaillé dans la section 2.2 ; Piao et al., 2019 ; de Wergifosse et al., 2020b). Parmi ces modifications, une grande partie concerne une avancée temporelle du débourrement, c'est-à-dire de l'initiation de la croissance des tissus à partir des bourgeons (Lang et al., 1987). Cet événement est de grande importance dans l'étude des gelées car les feuilles et les fruits sont particulièrement sensibles au gel (Sakai et Larcher, 1987). Ces événements de gel ayant lieu après le débourrement, appelés gelées tardives, ont des impacts importants sur les forêts à courts et longs termes (Inouye, 2000 ; Gu et al., 2008).

Le changement climatique a le potentiel d'augmenter le risque de gelées tardives à cause d'une variabilité plus importante de la température dans certaines régions et surtout à cause d'un avancement du débourrement lié au réchauffement (Cannell et Smith, 1986 ; Inouye, 2000 ; Marino et al., 2011 ; Seneviratne et al., 2012). L'évolution du risque de gelées tardives dépend de l'avancement relatif de la date des dernières gelées de l'année et de celle du débourrement. Si la date des dernières gelées est avancée avec un rythme moindre que celle du débourrement, alors les arbres se retrouvent à un stade de développement trop avancé et le risque de gelées tardives potentiellement dommageables augmente (Scheifinger et al., 2003 ; Schwartz et al., 2006 ; Vitasse et al., 2018). De nombreuses études ont évalué l'évolution de ce risque avec le changement climatique (détaillé dans la section 2.5). L'évolution dépendrait de la région, de l'espèce et de la méthodologie (Kramer, 1994 ; Linkosalo et al., 2000 ; Ma et al., 2019). Cependant, l'évolution future du risque de gelées

tardives en Wallonie reste inconnue.

Dès lors, l'objectif principal de ce mémoire consiste à déterminer comment et dans quelle mesure évoluera le risque de gelées tardives pour les forêts wallonnes jusqu'en 2100. Trois hypothèses décrites par l'avancement relatif du débourrement par rapport aux dernières gelées sont étudiées : le risque de gelées tardives augmente, diminue ou reste stable. Différentes espèces communes en Wallonie ont été étudiées. Cinq sites considérés comme représentatifs de la diversité climatique wallonne ont été choisis. L'étude de l'évolution du risque repose sur des projections issues de modèles climatiques et sur la simulation du débourrement dans le futur à l'aide d'un modèle phénologique. Enfin, des objectifs secondaires dont certains sont nécessaires pour répondre à la question principale sont également visés. Ces objectifs consistent à valider la capacité du modèle phénologique à simuler le débourrement dans le contexte wallon et la capacité des projections à représenter les événements de gel.

Revue de la littérature

2.1 Changement climatique et forêts

Un changement du système climatique dont l'homme est le principal responsable (extrêmement probable) ne fait désormais plus aucun doute (IPCC, 2021). L'émission de gaz à effet de serre depuis l'époque préindustrielle représente la cause majeure de l'accumulation d'énergie dans le système climatique et donc de l'augmentation de la température globale moyenne (IPCC, 2021). De nombreux changements dans les différentes composantes du système climatique sont les témoins de ce bouleversement climatique. En effet, lors des dernières décennies, l'atmosphère et l'océan se sont globalement réchauffés, la cryosphère a perdu en masse et le niveau des mers a augmenté (IPCC, 2021). Le changement climatique et ses conséquences sur les différentes composantes sont supposés perdurer dans le futur, ce qui pourrait amener à des impacts sévères et parfois irréversibles sur les systèmes humains et naturels (IPCC, 2021). L'intensité du réchauffement moyen sera principalement déterminée par les émissions cumulatives de CO_2 (IPCC, 2021). En Wallonie, il est attendu un réchauffement annuel moyen entre 1 et 3.5 °C, selon le scénario, pour l'horizon 2100 (Jacob et al., 2014).

Le changement climatique est souvent dénommé comme réchauffement climatique, une appellation qui met l'accent sur l'aspect global et moyen des changements. Cependant, des changements concernant la fréquence, l'intensité, l'étendue spatiale, la durée ou encore la saisonnalité d'évènements météorologiques extrêmes font également partie du changement climatique (Seneviratne et al., 2012). D'ailleurs, ce genre d'évènements peut être responsable de dégâts importants sur notre société et l'environnement (Nicholls et Alexander, 2007). Ces modifications peuvent être reliées au changement de la valeur moyenne des variables climatiques. En effet, un faible changement sur la moyenne peut amener à des modifications importantes au niveau des extrêmes (Nicholls et Alexander, 2007). De plus, une perturbation de ces derniers peut également être liée à un changement de la variabilité (Seneviratne et al., 2012). Autrement dit, un décalage de la distribution (Figure 1 de Nicholls et Alexander, 2007) ainsi qu'une modification de sa forme peuvent expliquer un changement dans la fréquence et l'intensité des évènements extrêmes.

A l'échelle globale, des modifications ont déjà été observées et sont projetées pour le futur, que ce soit pour les températures, les précipitations, les vents, etc. (Seneviratne et al., 2012; IPCC, 2021). Au cours du 21ème siècle, la fréquence et l'intensité des extrêmes de températures chaudes devraient augmenter tandis que celles des extrêmes de températures

froides devraient diminuer (Seneviratne et al., 2012). Assez logiquement et en omettant une possible modification de la forme de la distribution des températures, une augmentation de la fréquence d'un extrême est associée à une diminution de son extrême opposé (Nicholls et Alexander, 2007). En Europe, il est attendu que la fréquence de certains des évènements extrêmes, tels que les vagues de chaleur, augmente (Jacob et al., 2018). En ce qui concerne les températures minimales, le nombre de nuits froides (*cold nights*) devrait diminuer sur le continent européen (haute confiance; Seneviratne et al., 2012). En Wallonie, la date de la dernière gelée printanière au sens strict du terme (température négative) a avancé dans l'année de 8.4 jours en moyenne entre la période 1991-2019 et la période 1960-1990 (Figure 2.1).

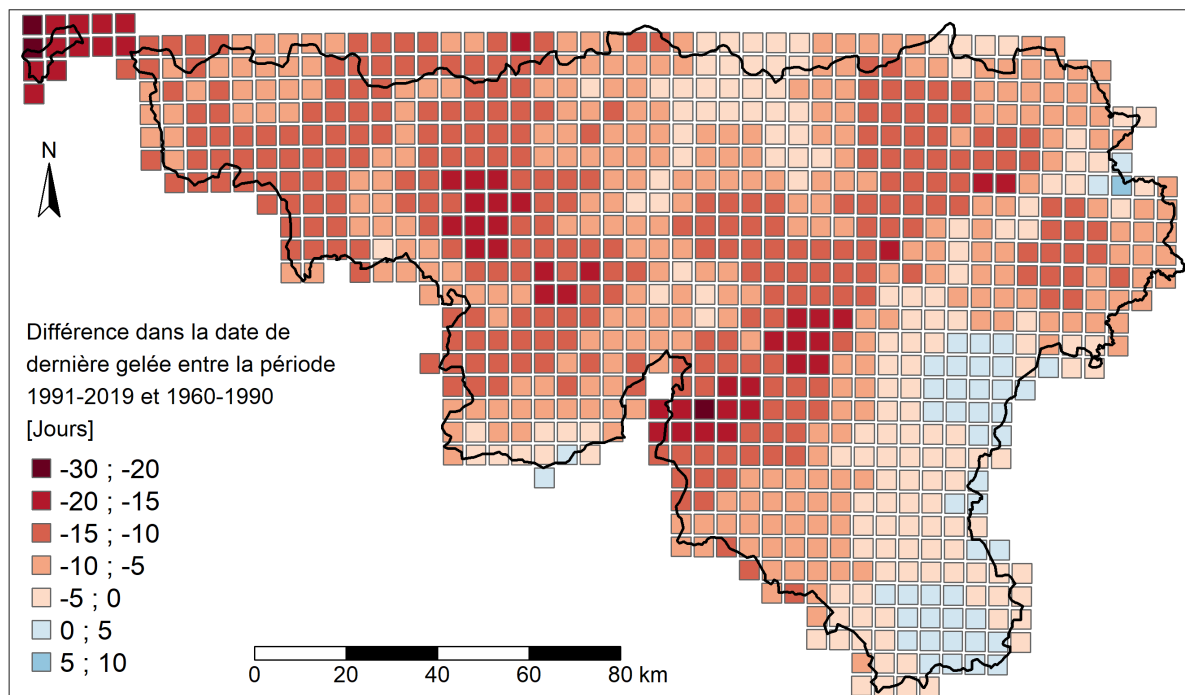


FIGURE 2.1 – Différence dans la date de dernière gelée entre la période 1991-2019 et la période 1960-1990 [jours] (source des données : IRM, 2018). Les valeurs positives (négatives) indiquent un recul (une avancée) de la date dans l'année.

Les forêts étant très sensibles au climat, il est évident qu'elles sont et seront affectées par le changement climatique (Parmesan et Yohe, 2003; Mina et al., 2017). C'est particulièrement le cas avec les évènements climatiques extrêmes qui ont la capacité d'impacter la croissance et la vitalité des forêts (par exemple les gelées, Dittmar et al., 2006; les sécheresses, Allen et al., 2015; les vagues de chaleur, Teskey et al., 2015). Il convient donc d'être capable d'évaluer l'évolution de ces extrêmes et de leurs impacts sur les forêts dans le futur.

Les nombreux services écosystémiques rendus par les forêts justifient l'attention scientifique qui leur est accordée. Les forêts jouent un rôle de régulation climatique. En plus d'être influencées par le climat, elles ont également une influence sur celui-ci, au travers de processus physiques, biologiques et chimiques (Bonan, 2008). Ce phénomène est appelé

rétroaction climatique (*feedback*; Goosse, 2015). Cette influence sur le climat provient de leur capacité à séquestrer du carbone, leur rôle dans l'évapotranspiration ou encore par leur modification de l'albédo en surface (Bonan, 2008; Le Quéré et al., 2018). Une meilleure connaissance de la dynamique des forêts représente donc une meilleure compréhension de l'évolution du climat. Enfin, les forêts fournissent également des services environnementaux (biodiversité, protection des sols et ressources en eau), économiques (tels que la production de bois et de nourriture), et culturels (tels que des activités récréatives) qu'il convient de conserver (Bauhus et al., 2010; Gamfeldt et al., 2013; Miura et al., 2015; Mori, 2017).

2.2 Changement climatique et phénologie

La phénologie correspond à l'étude des cycles et activités périodiques des plantes (et des animaux) au cours de l'année (Lieth, 1974). Le cycle phénologique des plantes, sensible à l'environnement, permet, entre autres, une synchronie dans la reproduction des individus au sein d'une population et d'éviter l'exposition à des conditions environnementales défavorables telles que le gel (Tang et al., 2016). D'ailleurs, dans les climats tempérés, les plantes ont évolué de sorte à minimiser la probabilité d'être exposées à des conditions météorologiques extrêmes (Tang et al., 2016). Cependant, le débourrement, c'est-à-dire l'initiation de la croissance des tissus à partir des bourgeons (Lang et al., 1987), repose sur un compromis étant donné que son retardement implique également une diminution de la période photosynthétique, de l'assimilation du carbone et donc de la croissance (Linkosalo et al., 2000; Saxe et al., 2001).

Les plantes utilisent différents signaux environnementaux pour régler leur développement phénologique. Certains signaux concernent les conditions environnementales actuelles ou très récentes (telles que la photopériode, la température ou les conditions hydriques) tandis que d'autres signaux concernent des conditions environnementales passées (telles que l'accumulation de température sur une certaine période; Tang et al., 2016). La température représente le déterminant le plus important de la phénologie des plantes (Chuine et Régnière, 2017). Le rôle de la photopériode est moins bien établi. Elle n'affecte pas toutes les phases du développement et la sensibilité à celle-ci dépend des espèces (Chuine et Régnière, 2017). De plus, la photopériode étant la même chaque année, elle ne peut expliquer les variations phénologiques sans interactions avec la température (Chuine et al., 2003). Enfin, la nutrition et la disponibilité en eau peuvent également jouer un rôle mais de moindre importance (Chuine et Régnière, 2017).

Etant donné l'influence importante des conditions climatiques sur les événements phénologiques, on peut logiquement s'attendre à ce que le changement climatique ait un impact phénologique important (Chuine et al., 2003; de Wergifosse, 2021). Ce dernier est responsable d'un changement temporel de certains des principaux événements phénologiques dont le débourrement printanier (Chuine, 2000; Piao et al., 2019). Ces modifications ont été régulièrement signalées dans la littérature, que ce soit par des observations in-situ ou par satellites (Piao et al., 2019; de Wergifosse et al., 2020b). D'ailleurs, une grande

partie de tous ces changements phénologiques sont la preuve d'une plasticité phénotypique (Franks et al., 2014). Les arbres ayant un long cycle de vie sont plus susceptibles de s'adapter rapidement au changement climatique en utilisant cette plasticité plutôt que l'évolution génétique (micro-évolutions ; Savolainen et al., 2004 ; Chevin et al., 2013 ; Franks et al., 2014). L'un des changements phénologiques les plus frappants concerne l'initiation prématurée des événements printaniers observée lors des dernières décennies entre autres en Europe (Piao et al., 2019). La plupart des études témoignent d'un avancement dont l'amplitude dépend de la période, de la zone d'étude et de l'espèce (Piao et al., 2019). Beaucoup de ces études concernent le continent européen. Chmielewski et Rötzer (2001) ont relevé un avancement de la saison de croissance équivalent à près de 3 jours/décennie. Menzel et al. (2006) ont utilisé une base de données de plus de 125 000 séries temporelles et ont relevé un avancement moyen du débourrement de 2.5 jours/décennie. A l'aide de la télédétection, un avancement général du début de la saison de croissance équivalent à 5.4 jours/décennie a également été estimé (Stockli et Vidale, 2004) ainsi qu'un avancement du début (de la fin) de la saison de croissance de 3.2 jours/décennie (8.2 jours/décennie ; Jeong et al., 2011). Finalement, Fu et al. (2014) ont utilisé plus d'un million d'observations et ont relevé un avancement du débourrement équivalent à 4.5 jours/décennie. Néanmoins, il se pourrait qu'une décélération, voire une inversion du décalage temporel (un recul) aient lieu depuis les années 2000 en raison d'un hiatus (une pause) dans le réchauffement climatique (Piao et al., 2019). L'amplitude de l'avancement dépend de la région, de la période ou encore des espèces (Piao et al., 2019). La méthodologie explique probablement aussi une partie de la variabilité de l'avancement entre ces études, ne serait-ce parce que certaines d'entre elles utilisent la télédétection au lieu d'observations in-situ. Enfin, il est à noter que, au sein de cette littérature phénologique, l'évènement le plus étudié, de façon directe ou indirecte (au travers de la saison de croissance) est le débourrement (et plus particulièrement celui des feuilles).

De nombreuses conséquences peuvent résulter de ces modifications temporelles sur la phénologie, parmi lesquelles un fort impact sur la structure des communautés et la fonction des écosystèmes, une augmentation de l'activité photosynthétique et de l'absorption du carbone ou encore une modification des échanges d'eau et d'énergie entre la biosphère et l'atmosphère induisant de possibles rétroactions climatiques (Penuelas et al. 2009 ; Piao et al., 2019). Un avancement du débourrement peut également induire une exposition de tissus fragiles, tels que les feuilles et les fruits, à des gelées tardives (section 2.5). Cette exposition à des conditions défavorables fait du débourrement l'évènement phénologique d'intérêt dans ce mémoire.

2.3 Modélisation phénologique

Il est plus que probable que le changement climatique perdure dans le futur (IPCC, 2021), ce qui motive la prévision de ses conséquences, y compris sur la phénologie et surtout sur le débourrement. Étant donné la taille, la longévité et la complexité des processus qui concernent les arbres, l'effet du changement climatique ne peut être résolu

par expérimentation (Kramer, 1996). Alors, les modèles s'avèrent être d'importants outils pour étudier l'effet du changement climatique à venir sur la phénologie des plantes (Kramer, 1996 ; Liu et al., 2019).

Initialement, les premiers modèles phénologiques étaient empiriques et reposaient sur le concept de *degree-day* introduit par Reaumur (1735) selon lequel le développement des plantes dépend plus de l'accumulation de température sur une période que de la température au moment de l'évènement phénologique en lui-même (Chuine et Régnière, 2017 ; Piao et al., 2019). C'est par exemple le cas du *thermal time model* de Cannell et Smith (1983). Depuis Reaumur, l'accumulation de température (avant l'évènement phénologique) est reconnue dans la littérature comme le facteur principal de la variation interannuelle de l'apparition des différentes phases phénologiques (Chuine et al., 2003).

Cependant, les changements climatiques déjà observés et projetés dans le futur sont sans précédent durant l'histoire de l'homme moderne (IPCC, 2021). Les conséquences de ces changements pourraient donc être d'une nature et d'une intensité qui n'ont jamais été observées. L'application de modèles purement empiriques, tels que celui de Cannell et Smith (1983), à la simulation dans le futur pourrait amener à des biais importants (Piao et al., 2019). Dès lors, la modélisation basée (au moins en partie) sur les processus (*process-based modelling*) représente un meilleur outil car plus adapté pour l'extrapolation dans des conditions sans précédent (Kramer, 1996 ; Piao et al., 2019 ; de Wergifosse et al., 2020a). Ces modèles plus mécanistes utilisent les relations de cause à effet entre des processus biologiques et des facteurs déterminants de l'environnement (Chuine et al., 2003). Dans le cas de la phénologie, les modèles considèrent différentes phases de développement jusqu'au débourrement que sont l'endodormance et l'écodormance (Sarvas, 1974 ; Lang, 1987).

L'endodormance, aussi appelée phase de repos ou *chilling period*, est une période durant laquelle les bourgeons restent dormants à cause des conditions physiologiques empêchant la croissance même lorsque les conditions environnementales y sont favorables (Kramer, 1994). Cela signifie que la croissance est "volontairement" empêchée par la plante. Les facteurs internes responsables de cette inhibition ne sont pas encore très bien élucidés (Chuine et al., 2016). Cette phase est terminée lorsque les bourgeons ont été exposés à des températures froides pendant une certaine période (Kramer, 1994). La phase suivante, l'écodormance, aussi appelée quiescence ou *forcing period*, est la période durant laquelle les bourgeons se développent lorsque les conditions environnementales sont favorables (Kramer, 1994 ; Duputié et al., 2015). Durant cette phase, un forçage par la température mène au débourrement (Kramer, 1994 ; Chuine, 2000) et le taux de développement augmente avec la température (Chuine et al., 2003). Tandis que, paradoxalement, ce sont des températures froides qui sont requises lors de l'endodormance (*chilling units*), c'est de la chaleur qui est requise lors de l'écodormance (*forcing units* ; Chuine et al., 2003). L'effet de la température sur les évènements phénologiques est par conséquent non linéaire (Fu et al., 2015).

Les modèles sont classés par le nombre de phases qu'ils considèrent (Piao et al., 2019). Les modèles à une phase ne considèrent que l'écodormance. Les modèles à deux phases considèrent que l'endodormance doit être brisée par l'accumulation de températures froides (*chilling requirement*) avant que l'écodormance ne puisse commencer (Schwartz et Hanes, 2010 ; Piao et al., 2019), comme cela a pu être démontré (Cannell et Smith, 1983). La

température joue donc un rôle important mais différent selon les phases.

2.4 Le gel et les forêts

Le gel représente un évènement météorologique extrême qui n'est peut-être pas aussi oppressif que les sécheresses ou aussi violent que les tempêtes mais qui peut avoir des effets écologiques importants (Inouye, 2000). A l'échelle cellulaire, des conditions de gel sont responsables de la formation de cristaux de glace dans et entre les cellules provoquant des dommages physiques aux tissus et des problèmes physiologiques (Inouye, 2000 ; Saxe et al., 2001). De manière générale et aussi dans le cas des gelées, la vulnérabilité et donc les dommages potentiels dépendent de l'exposition et de la sensibilité (Williams et al., 2008 ; Charrier et al., 2018). L'exposition est indépendante de la plante et concerne, dans le cas des gelées, l'amplitude des températures négatives. La sensibilité est propre à la plante et dépend de l'espèce, de l'âge de l'arbre, des organes et du stade phénologique (Sakai et Larcher, 1987 ; Augspurger, 2009 ; Augspurger, 2013). De plus, la résistance (l'inverse de la sensibilité) des arbres face au gel varie au cours de l'année (Chamberlain et al., 2019). Au final, il peut être considéré que, pour les plantes ligneuses, les fruits et les feuilles en cours de croissance sont les organes de la plante les plus sensibles au gel (Sakai et Larcher, 1987).

Cette combinaison de l'exposition et de la sensibilité conditionne les dommages observés et justifie l'intérêt plus important porté au printemps dans la littérature et dans ce mémoire. En hiver, l'exposition à des conditions de gel est très importante mais la sensibilité est très faible. La résistance des bourgeons en hiver leur permet de supporter plusieurs dizaines de degrés négatifs (Sakai et Larcher, 1987 ; Chamberlain et al., 2019), une résistance généralement bien au-delà des températures qu'ils rencontrent et, par conséquent, des dégâts de gel hivernaux sont très peu (pas) rapportés (Vitasse et al., 2014b). Des températures négatives comme il en arrive presque tous les jours en hiver en Wallonie ne représentent pas un réel danger pour nos forêts. En été, l'exposition à des températures négatives est quasi inexistante. Enfin, en automne, les gelées sont moins critiques car plus rares et souvent "simplement" responsables d'une accélération de la sénescence (Estiarte et Peñuelas, 2015 ; Liu et al., 2018 ; Chamberlain et al., 2019). Des dégâts de gel en automne sont également très peu rapportés pour des arbres d'espèces indigènes (Vitasse et al., 2014b). L'étude de la saison printanière est donc d'une grande importance dans le cas des gelées. D'ailleurs, les températures printanières minimales (plus que les températures hivernales minimales) seraient l'un des facteurs principaux expliquant la distribution et surtout les limites géographiques des espèces (Lenz et al., 2013 ; Kollas et al., 2014). Par conséquent, ce mémoire s'intéresse spécifiquement au cas des gelées ayant lieu après le débournement, au moment de la plus forte sensibilité, jusqu'au solstice d'été (ne considérant donc pas les gelées précoces d'automne). De tels évènements sont habituellement dénommés gelées tardives ou gelées printanières (indépendamment de la définition des saisons) dans la littérature.

Les conséquences des gelées à court et long termes sont nombreuses. La décoloration, le brunissement, le flétrissement, le dessèchement, l'arrêt de la croissance voire la nécrose des feuilles, des fruits et des pousses font partie des dégâts directement observables (Day, 1951; Gu et al., 2008; Augspurger, 2013). Dans les cas les plus extrêmes, le gel peut amener à la mort des jeunes plantes (Ningre et Colin, 2007). A court terme, l'activité photosynthétique et donc la croissance sont réduites et la repousse ne permet pas toujours d'atteindre le niveau foliaire maximal habituellement observé (Gu et al., 2008). A long terme, l'écosystème qui dépend des forêts est potentiellement et indirectement affecté par ces gelées (Inouye, 2000; Gu et al., 2008; Augspurger, 2009). Les animaux peuvent faire face à des pénuries de nourriture issues de la chute des feuilles et des fruits (Inouye, 2000). La structure des communautés peut aussi être affectée par une stimulation du sous-bois profitant d'une interception plus faible de la lumière par l'étage dominant ou encore par des dommages inégaux entre les différentes essences (Gu et al., 2008). Les gelées tardives pourraient fournir un avantage compétitif à certaines espèces (et donc un désavantage à d'autres espèces) et par conséquent modifier leurs abondances dans certaines régions (Hufkens et al., 2012). De manière générale, l'effet du gel sur les plantes a été plus étudié pour les cultures que pour les forêts, probablement à cause des dégâts économiques importants (Inouye, 2000). Le cas des forêts n'en reste pas moins très important car elles sont à l'origine de nombreux services (sections 2.1).

2.5 Changement climatique et gelées tardives

Bien que cela puisse paraître contre-intuitif, le changement climatique a le potentiel d'augmenter le risque de gelées tardives à cause d'une variabilité plus importante de la température dans certaines régions et surtout à cause d'un avancement du débourrement lié au réchauffement (Cannell et Smith, 1986; Inouye, 2000; Marino et al., 2011; Seneviratne et al., 2012). Tandis que le réchauffement se traduit par un avancement de la date des dernières gelées, il pourrait augmenter le risque que le débourrement ait déjà eu lieu lors de ces gelées. L'évolution du risque de gelées tardives dépend donc de l'avancement relatif de la date des dernières gelées et de celle du débourrement. Si la date des dernières gelées de l'année est avancée avec un rythme moindre que celle du débourrement, alors les arbres se retrouvent à un stade de développement trop avancé et le risque de gelées tardives potentiellement dommageables augmente (Scheifinger et al., 2003; Schwartz et al., 2006; Vitasse et al., 2018).

De nombreuses études ont évalué l'évolution de ce risque avec le changement climatique et il semblerait qu'elle dépende de la région, de l'espèce, de la méthodologie (Kramer, 1994; Linkosalo et al., 2000; Ma et al., 2019). Cannell et Smith (1986), en utilisant un *thermal time model*, ont étudié l'effet d'un réchauffement de 2°C sur le risque de gelées tardives pour une espèce de pin en Angleterre et une espèce de pommier en Ecosse. Ils ont conclu que le risque devrait augmenter pour l'espèce de pommier mais resterait inchangé pour les pins. Murray et al. (1989) ont utilisé la même approche et estimé que le risque de gelées devrait diminuer pour la plupart des espèces en Angleterre car la date de débour-

rement ne devrait pas être nettement modifiée, à l'exception de quelques espèces ayant un faible *chilling requirement*. En utilisant un modèle à deux phases, Hänninen (1991) a estimé que le risque de dommage par le gel devrait augmenter avec le réchauffement climatique pour les forêts finlandaises. Les différences de résultats entre les deux études précédentes seraient attribuables aux espèces et aux conditions locales plutôt qu'à des différences méthodologiques que sont les modèles et les scénarios de réchauffement (Kramer, 1994). En plus de déterminer les raisons de ces différences, Kramer (1994), en utilisant un modèle à deux phases, a estimé que la probabilité de gelées devrait diminuer pour de nombreuses espèces aux Pays-Bas et en Allemagne. Il peut néanmoins être reproché aux études précédentes d'avoir utilisé des scénarios de réchauffement qui reposaient principalement sur une augmentation de la température moyenne (Rigby et Porporato, 2008), sans changement concernant la variance et les extrêmes de températures qui sont pourtant également impactés par le changement climatique (Seneviratne et al., 2012). Scheifinger et al. (2003), en utilisant des observations phénologiques d'Europe centrale (Allemagne, Suisse, Autriche et Slovénie), ont relevé que les dates des dernières gelées évoluaient plus rapidement que les dates phénologiques sur la période 1951-1997. Par conséquent, le risque de gelées tardives aurait diminué dans cette région. Schwartz et al. (2006) ont également évalué ces tendances (la différence entre les deux tendances) à l'échelle de l'hémisphère nord, sur la période 1961-2000, à partir d'un débourrement simulé. Les résultats diffèrent entre et au sein des continents. En Europe de l'Ouest (principalement la France), le risque aurait diminué. En Europe centrale, dans la région correspondante à celle étudiée par Scheifinger et al. (2003), les deux tendances auraient progressé au même rythme (risque stable). En Europe du Nord et de l'Est, la tendance du débourrement aurait été plus importante que celle des dernières gelées et donc le risque aurait augmenté (Schwartz et al., 2006). Marino et al. (2011) ont utilisé la télédétection (*enhanced vegetation index*) pour simuler le débourrement et évaluer l'évolution du risque de gelées tardives sur la période 1901-2007 dans une région à l'Est des Etats-Unis qui a d'ailleurs été fortement touchée par un événement généralisé en 2007 (Gu et al., 2008). Le risque de gelées aurait augmenté dans le Sud-Est de la zone d'étude et diminué dans Nord et l'Ouest (Figure 2.2). En utilisant un *thermal time model* (Cannell et Smith, 1983), une diminution du risque de gelées sur la période 1963 à 2009 dans le Nord de la Chine a été estimée ainsi qu'une tendance non significative dans le Nord-Est du pays (Dai et al., 2013). Allstadt et al. (2015) ont étudié l'évolution du risque à l'échelle des États-Unis jusqu'en 2100 (scénario RCP 8.5) et projeté des évolutions nulles, positives et négatives selon la localisation. Zhu et al. (2019) ont utilisé une méthodologie très similaire à l'étude précédente mais appliquée au cas de la Chine. Là aussi, le risque projeté diminue, augmente ou reste constant selon la localisation dans le pays. Liu et al. (2018), en inférant l'information phénologique à partir de la télédétection (NDVI), ont étudié l'évolution du risque dans l'hémisphère Nord sur la période 1982-2012. Le risque de gelées printanières aurait augmenté dans presque toute l'Europe tandis que les évolutions sont plus contrastées en Asie et en Amérique du Nord. Ma et al. (2019), en utilisant une large base de données phénologiques récentes en Europe, ont estimé globalement une augmentation du risque dans les régions côtières et maritimes et une diminution dans les régions plus continentales.

De manière générale, il est difficile de comparer quantitativement l'effet du changement

climatique sur les arbres à partir d'études qui traitent de différentes espèces ou régions géographiques (Walther, 2003), ne serait-ce parce que le changement climatique est spatialement hétérogène (IPCC, 2021), parce que les espèces présentent des réponses phénologiques différentes (Piao et al., 2019), parce que les modèles phénologiques et les données de paramétrisation sont différents (Zhu et al., 2019) et parce que les projections diffèrent entre les modèles climatiques utilisés (Zhu et al., 2019).

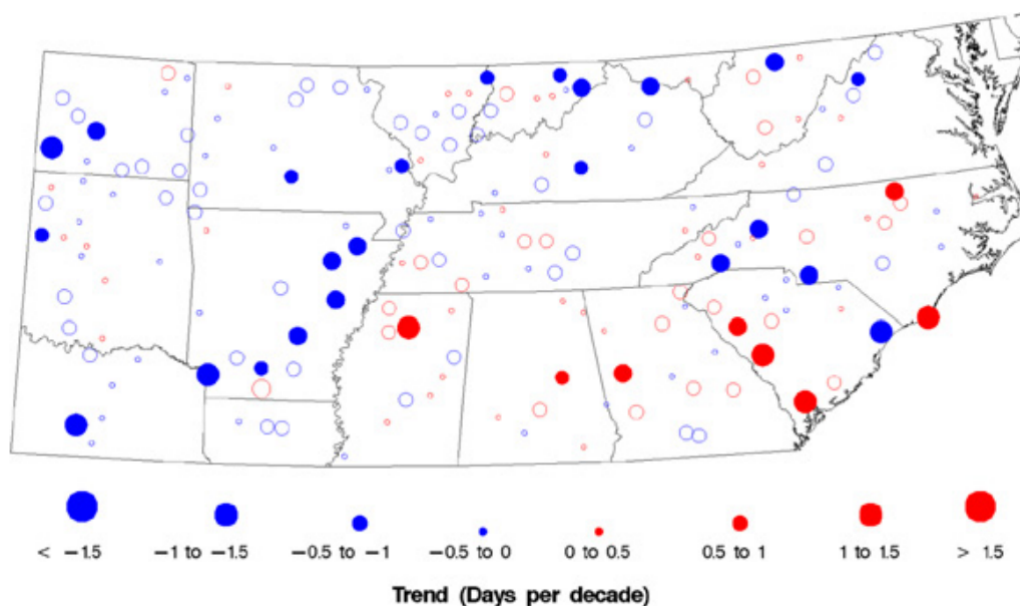


FIGURE 2.2 – Tendances d'un indicateur de risque de gelées tardives [jours/décennie] dans l'Est des Etats-Unis sur la période 1901-2007 (FSI = *False Spring Index* = date de dernière gelée de l'année - date de débourrement [jours]; Marino et al., 2011). Les tendances rouges (bleues) indiquent une augmentation (diminution) du risque.

Il est également à noter que beaucoup de ces études présentent des évolutions contrastées (parfois une augmentation, parfois une diminution du risque) en fonction de la localisation (pour une méthodologie donnée). Au sein d'un même pays (ou au sein d'un état dans le cas de grands pays), des évolutions positives et négatives du risque de gelées sont parfois estimées (Figure 2.2). Enfin, étant donné que les gelées tardives sont distribuées de manière très hétérogène dans le temps et l'espace (Scheifinger et al., 2003), les observations systématiques de dégâts par le gel sont rares. Par conséquent, toutes ces études ont étudié le risque de façon indirecte, c'est-à-dire en combinant l'information phénologique (qu'elle soit observée, inférée par télédétection, simulée ou projetée) et l'information météorologique. Seule Augspurger (2013) a observé des dégâts de façon systématique et a développé un modèle de prédiction direct pour une forêt en Illinois (États-Unis). L'application du modèle a révélé une augmentation des dégâts par le gel sur la période 1889-2012.

2.6 Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est de déterminer comment et dans quelle mesure évoluera le risque de gelées tardives pour les forêts wallonnes jusqu'en 2100. Trois situations hypothétiques peuvent résulter de l'avancement relatif du débourrement par rapport aux dernières gelées (Vitasse et al., 2018 ; Figure 2.3). La première hypothèse correspond à un avancement similaire du débourrement et de la dernière gelée et donc à un risque inchangé dans le futur. Selon la deuxième hypothèse, l'avancement de la dernière gelée serait plus important que celui du débourrement. Par conséquent, le risque de gelées tardives diminuerait. La troisième hypothèse correspond au cas inverse, lorsque l'avancement du débourrement est plus important que celui de la dernière gelée. Dans cette situation, le risque de gelées tardives augmenterait avec le changement climatique, comme proposé par Cannell et Smith (1986). L'étude porte sur des espèces répandues en Wallonie et présentant des stratégies de débourrement différentes, c'est à dire plus ou moins tardives dans la saison, que sont le hêtre commun (*Fagus Sylvatica* L.), le chêne sessile (*Quercus Petraea* (Matt.) Liebl.), le mélèze (*Larix Decidua* Mill.) et le frêne (*Fraxinus Excelsior* L.). Cinq sites de suivi à long-terme des écosystèmes forestiers et considérés comme représentatifs de la diversité climatique wallonne que sont les placettes de Louvain-la-neuve (LLN), Eupen, Chimay, Virton et Wellin ont été choisis. L'évolution du risque de gelées tardives a été étudiée en comparant l'information climatique et phénologique simulées dans le futur. Des projections issues de deux modèles climatiques forcés par deux scénarios différents ont été utilisées. Ces mêmes projections ont servi de données d'entrée à un modèle phénologique simulant le débourrement. Enfin, des objectifs secondaires dont certains sont nécessaires pour répondre à la question principale sont également visés. Ces objectifs consistent à valider la capacité du modèle phénologique à simuler le débourrement dans le contexte wallon et la capacité des projections à représenter les événements de gel.

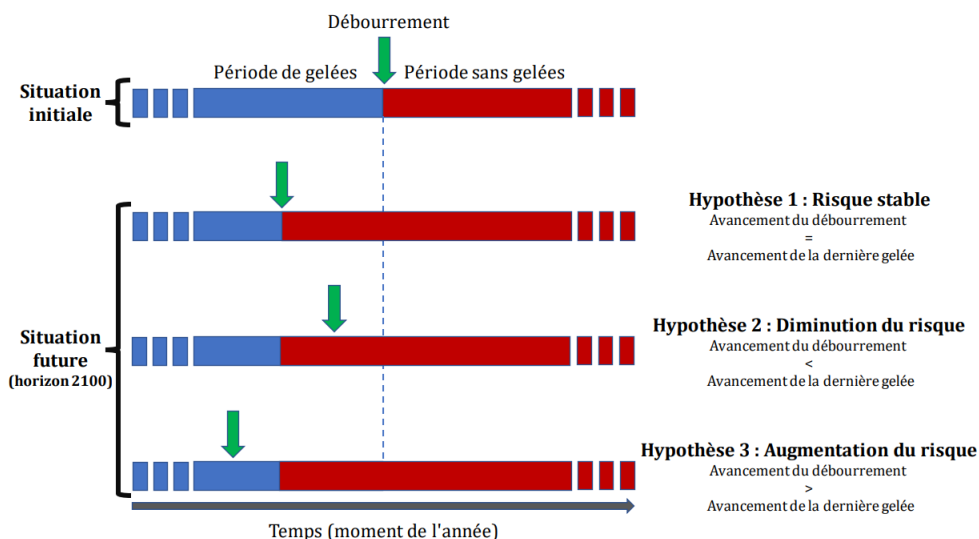


FIGURE 2.3 – Hypothèses théoriques de l'effet du réchauffement climatique sur le risque de gelées tardives (adapté de Vitasse et al., 2018).

Matériel

3.1 Zone d'étude

La zone d'étude est la Wallonie, région administrative au Sud de la Belgique (2.75°E-6.50°E ; 49.46°N-50.85°N). Pour l'étude portant sur la période future, cinq sites ont été choisis : le site de Louvain-la-neuve (LLN), Eupen, Chimay, Virton et Wellin. Il s'agit de placettes de suivi à long-terme des écosystèmes forestiers faisant partie du réseau européen de niveau II du Programme International Concerté sur les forêts (PIC Forêt ou *ICP Forest*). Ces placettes offrent l'avantage de disposer de longues séries de données de suivi notamment météorologiques qui seront utilisées par la suite. En outre, celles-ci permettent de couvrir la diversité des climats de Wallonie car elles sont situées dans des territoires bioclimatiques différents (Figure 3.1 ; Van der Perre et al., 2015). Les caractéristiques climatiques des sites sont indiquées dans la table 3.1. Le site de Louvain-la-neuve est le plus chaud et a sans surprise la date de dernière gelée la plus précoce. A l'inverse, le site d'Eupen est le plus froid et présente une date de dernière gelée la plus tardive. Dans le cadre de ce mémoire, les différents sites ont été définis uniquement du point de vue du climat en ne considérant ni le type de sol ni la composition spécifique propre au site. Néanmoins, afin d'évaluer une possible différence entre les essences dans le risque face aux gelées tardives et dans son évolution future tout en limitant le nombre de combinaisons possibles, quatre espèces communes en Wallonie ont été sélectionnées. Le hêtre commun (*Fagus Sylvatica* L.) et le chêne sessile (*Quercus Petraea* (Matt.) Liebl.), ayant une date de débourrement moyenne, ont été choisies car elles sont très représentées dans les forêts wallonnes. Afin de considérer différentes stratégies de débourrement, une espèce débourrant tôt dans la saison, le mélèze (*Larix Decidua* Mill.), ainsi qu'une espèce débourrant tardivement, le frêne (*Fraxinus Excelsior* L.), ont également été choisies.

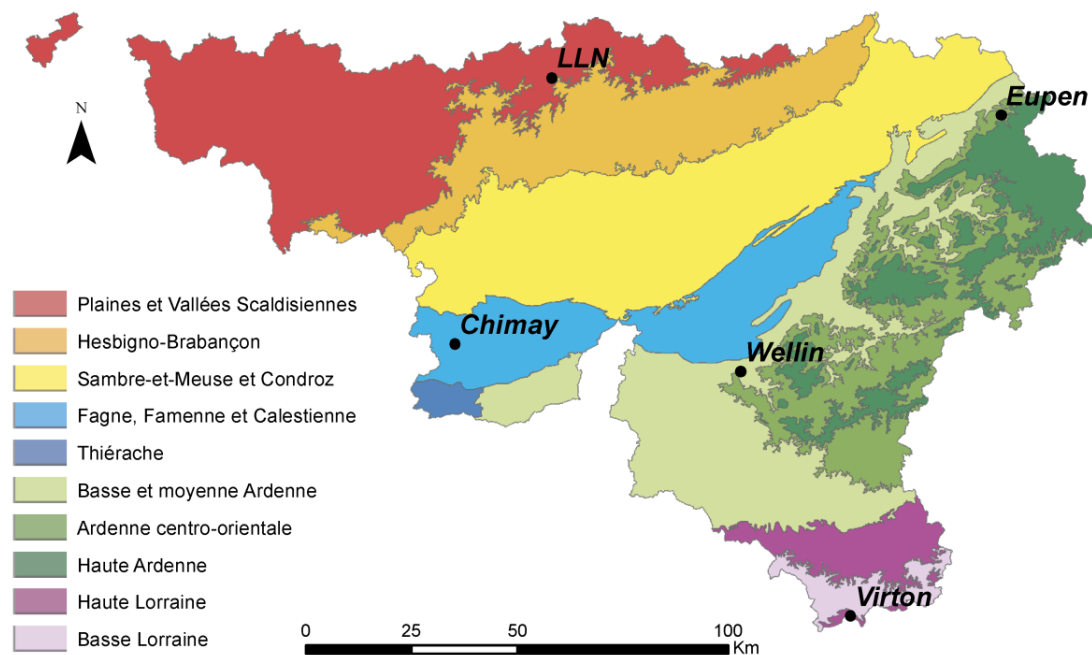


FIGURE 3.1 – Carte bioclimatique de la Wallonie avec la localisation des sites projetés (adapté de Van der Perre et al., 2015 ; Source du fond de carte : Service public de Wallonie - SPW, 2015).

TABLE 3.1 – Caractéristiques climatiques des sites utilisés pour les projections. La température annuelle et la date de dernière gelée sont moyennées sur la période 1999-2018 (Source des données : Réseau Pameseb, CRA-W/Agromet.be).

Site	Localisation	Territoire bioclimatique	Température moyenne [°C]	Date de dernière gelée moyenne [Jour de l'année]
LLN	50.68°N; 4.60°E	Hesbigno-Brabançon	11.0	88
Eupen	50.58°N; 6.10°E	Ardenne centro-orientale	8.0	117
Chimay	50.11°N; 4.28°E	Fagne, Famenne et Calestienne	9.8	101
Virton	49.53°N; 5.57°E	Haute Lorraine	9.9	94
Wellin	50.05°N; 5.22°E	Basse et moyenne Ardenne	9.8	100

3.2 Le module phénologique du modèle HETEROFOR

Le moment du débourrement a été simulé à l'aide du module phénologique du modèle HETEROFOR. Ce dernier est un modèle hébergé dans la plateforme Capsis (*Computer-Aided Projections of Strategies In Silviculture*), un simulateur adapté à la modélisation de la croissance des forêts (Dufour-Kowalski et al., 2012). HETEROFOR est un modèle spatialement explicite simulant la croissance des arbres sur base du partage des ressources que sont la lumière, l'eau et les nutriments (Jonard et al., 2020). Dans le cadre de ce travail, seul le module phénologique a été utilisé et sera donc explicité. Néanmoins, les détails du modèle peuvent être trouvés dans les articles de Jonard et al.(2020) et de Wergifosse et al.(2020a).

La suite de cette section comprend les éléments du modèle phénologique importants pour

la simulation du débourrement et décrits par de Wergifosse et al.(2020a) et de Wergifosse (2021). Le module phénologique permet de simuler les variations temporelles de l'état du feuillage sur base de la température fournie par l'utilisateur au pas de temps horaire à l'aide d'un fichier météorologique. La première étape consiste à prévoir le moment du débourrement, désormais admis comme étant le résultat de deux stades phénologiques successifs : l'endodormance et l'écodormance (Sarvas, 1974; Lang, 1987). L'endodormance correspond à une accumulation de températures froides à partir de la date de départ t_0 jusqu'à la rupture de la dormance des bourgeons. Chaque jour, un taux de levée de dormance R_c est calculé par une fonction de réponse à la température. Les R_c journaliers sont sommés jusqu'à atteindre un seuil C^* . Deux fonctions de réponse aux températures existent. La première fonction dite *optimum* basée sur le travail de Hänninen (1990). Le R_c varie entre une valeur minimale et maximale en passant par un optimum selon :

$$R_c = \begin{cases} 0, & T \leq T_{min} \\ \frac{T-T_{min}}{T_{opt}-T_{min}}, & T_{min} < T \leq T_{opt} \\ \frac{T-T_{max}}{T_{opt}-T_{max}}, & T_{opt} < T \leq T_{max} \\ 0, & T \geq T_{max} \end{cases} \quad (3.1)$$

avec T [°C], la température moyenne de la journée, T_{min} , T_{max} , T_{opt} [°C] la température minimale, maximale et optimale respectivement.

La deuxième fonction de réponse aux températures dite *sigmoid* est basée sur le travail de Chuine (2000) :

$$R_c = \begin{cases} \frac{1}{1+e^{C_a(T-C_c)^2+C_b(T-C_c)}}, & -5 \leq T \leq 10 \\ 0, & T < -5 \text{ ou } T > 10 \end{cases} \quad (3.2)$$

avec C_a [$\frac{1}{\circ C^2}$], C_b [$\frac{1}{\circ C}$] et C_c [°C] les paramètres liés à la levée de dormance.

L'atteinte du seuil C^* définit le moment t_1 et simule la rupture de la dormance ce qui initie alors l'écodormance. Cette phase est aussi décrite par la somme d'une variable, le taux de forçage R_f qui est calculé selon une autre équation sigmoïde (Chuine, 2000) :

$$R_f = \begin{cases} \frac{1}{1+e^{F_b(T-F_c)}}, & T > T_{bfor} \\ 0, & T \leq T_{bfor} \end{cases} \quad (3.3)$$

avec F_b [$\frac{1}{\circ C}$] et F_c [°C] les paramètres de forçage et T_{bfor} [°C] le seuil à partir duquel la température est assez chaude pour induire un forçage.

Contrairement à la première phase, la phase de forçage correspond donc a une accumulation de chaleur (températures plus chaudes que la première phase). Les R_f journaliers sont cumulés jusqu'à atteindre le seuil F^* qui définit la date moyenne de débourrement (les observations utilisées pour les calibrations correspondant généralement à des débournements moyens), au moment t_2 .

Le modèle permet aussi de simuler les autres étapes phénologiques successives que sont le développement complet du feuillage, le vieillissement, le jaunissement associé à la perte d'activité photosynthétique et enfin la chute des feuilles. Le détail de ces étapes n'est pas explicité car leur simulation n'est pas utilisée dans le cadre de ce mémoire. Enfin, le

débourrement, tout comme les autres étapes phénologiques, peut être simulé à l'échelle du peuplement (avec malgré tout une distinction entre espèces) et de l'arbre. Etant donné que l'étude porte sur la région Wallonne de manière générale, que l'échelle de l'arbre ajoute un niveau de complexité, augmente le temps de calcul et surtout nécessite un inventaire spatialisé pour chaque site (disponible en un nombre limité d'endroits), les simulations ont toujours été réalisées à l'échelle du peuplement.

Les valeurs des différents paramètres sont extraites de la littérature. Dans le cas du mélèze et du frêne, ce sont les calibrations réalisées aux Pays-Bas et en Allemagne par Kramer (1994) qui ont été utilisées (modèle *optimum*). Pour le chêne et le hêtre, les valeurs des paramètres issues d'une calibration européenne réalisée par Duputié et al. (2015) ont été reprises. C'est la version *sigmoïde* du modèle qui est utilisée pour le hêtre et une version légèrement modifiée du modèle *optimum* pour le chêne (voir de Wergifosse, 2021). Etant donné que les calibrations ont été réalisées en dehors de la Wallonie, elles sont en théorie moins performantes pour simuler le débourrement dans cette région. Néanmoins, les calibrations de Kramer (1994) ont été réalisées dans des régions relativement proches de la Wallonie (Pays-Bas et Ouest de l'Allemagne). De plus, la grande étendue géographique utilisée par Duputié et al. (2015) offre l'avantage de couvrir une plus grande étendue climatique. Leurs paramètres sont donc plus susceptibles d'avoir été calibrés sur des climats qui se rapprochent du climat futur en Wallonie. C'est pourquoi la calibration Wallonne réalisée par de Wergifosse et al. (2020a) pour le chêne et le hêtre n'a pas été utilisée.

3.3 Données

Différentes bases de données météorologiques/climatiques ont été utilisées. Premièrement, des données de températures journalières minimales et maximales spatialisées fournies par l'IRM (Institut Royal Météorologique, 2018; *Observational gridded data products*, ci-après "données spatialisées"). Ces données sont issues d'une interpolation spatiale par la méthode du krigeage à partir d'un réseau de stations d'observation réparties en Belgique. Elles couvrent la région Wallonne selon une grille systématique avec une résolution de ~ 5 km sur la période 1961-2019.

Deuxièmement, pour les cinq sites projetés (section 3.1), des données de température à un pas de temps horaire ont été utilisées. Des observations depuis différentes stations sont disponibles pour la période 1999-2019 (Réseau Pameseb, CRA-W/Agromet.be). Ont également été fournies par l'IRM les températures issues de la réanalyse ERA5 (*Fifth Reanalysis of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*; Hersbach et al., 2020) pour la période 1979-2019 et issues de deux modèles climatiques pour la période 1976-2005 (simulation historique) et la période 2006-2100 (projection). Les mêmes modèles que de Wergifosse et al. (2022) ont été utilisés, c'est-à-dire deux modèles climatiques régionaux (*Regional Climate Models - RCMs*) qui ont été forcés par les résultats de modèles climatiques globaux (*Global Climate Models - GCMs*). Le *GCM* CNRM-CM5 (Voltaire et al., 2013) a subi une réduction d'échelle dynamique par le *RCM* ALARO-0 (Giot et al., 2016) tandis que le *GCM* IPSL-CM5A (Dufresne et al., 2013) a subi une réduction d'échelle

dynamique par le *RCM* RCA4 (Samuelsson et al., 2011). Par simplicité, les combinaisons CNRM-CM5-ALARO-0 et IPSL-CM5A-RCA4 seront respectivement dénommées comme les modèles CNRM et IPSL dans la suite du travail.

Pour les projections, les modèles ont été forcés selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (RCP pour *Radiative Concentration Pathway*). Ces scénarios ont été établis pour faciliter la comparaison entre les études mais aussi pour faciliter la communication sur les résultats (Van Vuuren et al., 2011). Ils sont utilisés pour forcer les modèles climatiques et représentent des descriptions plausibles de l'évolution future des émissions de gaz à effet de serre, des polluants, de l'utilisation du sol, etc. (Van Vuuren et al., 2011). Le scénario RCP4.5 (RCP8.5) correspond à un forçage radiatif de 4.5 W/m^2 (8.5 W/m^2) en 2100 (Van Vuuren et al., 2011).

Enfin, la réanalyse et les deux modèles climatiques ont été corrigés par la méthode des quantiles (Maraun et Widmann, 2018) et le pas de temps de 3 heures a été discrétisé à 1 heure (pour être adapté au modèle HETEROFOR; de Wergifosse et al., 2022). Pour chacun des cinq sites, la réanalyse a été corrigée par les observations météorologiques. Ensuite, la même procédure a été appliquée aux deux modèles en utilisant les réanalyses désormais corrigées comme nouvelle référence de correction.

De plus, des observations phénologiques sur la période 2011-2021 ont été fournies par l'Observatoire Wallon de la Santé des Forêts (OWSF; SPW ARNE-DEMNA-DMF, 2022a). Les données contiennent le nom des placettes, leur localisation (en coordonnées), l'essence, l'année et le numéro du jour de l'année où a eu lieu l'observation du débourrement. Deux niveaux de débourrement y sont ciblés : lorsque 10% et 90% des arbres ont débourrés.

Enfin, également fournie par l'Observatoire Wallon de la Santé des Forêts (OWSF; SPW ARNE-DEMNA-DMF, 2022b), la dernière base de données qui a été utilisée concerne des observations non-systématiques de dégâts causés par le gel en Wallonie. Ces observations sont réparties sur la période 2011-2021. La base de données contient, entre autres, la localisation des dégâts (en coordonnées), la date, l'essence, et parfois l'organe atteint et des remarques.

Méthodologie

Les dates de débourrement ont été simulées avec le module phénologique du modèle HETEROFOR. Le reste des calculs, le traitement des données et les figures ont été réalisés avec le logiciel *R*. Les cartes ont été réalisées avec *R* ou *ArcGis*.

4.1 Validation du module phénologique

L’objectif de cette partie a été de valider, pour la Wallonie, les calibrations réalisées par Duputié et al. (2015) pour le chêne et le hêtre, et par Kramer (1994) pour le frêne et le mélèze. Celles-ci ayant été réalisées en dehors de la Wallonie, il convient d’évaluer leur capacité à simuler le débourrement dans cette région, à l’aide d’une base de données indépendante. Une validation européenne a déjà été réalisée par de Wergifosse et al. (2022). Cependant, la validation ne concernait que le chêne et le hêtre et utilisait une autre base de données d’une trentaine de sites européens couvrant une large gamme de conditions écologiques (de Wergifosse et al., 2022). Par conséquent, une seconde validation spécifique à la Wallonie reste pertinente. Le modèle phénologique a donc été appliqué à chaque site pour lequel des observations phénologiques étaient disponibles (OWSF, SPW ARNE-DEMNA-DMF, 2022a ; section 3.3) en utilisant les données météorologiques spatialisées (*Observational gridded data products* ; section 3.3) sur la période 2011-2019. Etant donné que seule l’information sur la température minimale et maximale journalières était disponible et qu’une température à un pas de temps horaire est nécessaire pour le modèle HETEROFOR, la température a été interpolée linéairement entre ce minimum et maximum. La distance entre le centre des cellules n’étant pas constante, les données météorologiques ne pouvaient être directement converties en données spatialement continues (raster). C’est pourquoi le débourrement, calculé en chaque élément, a été interpolé spatialement à partir des centres de cellules. L’interpolation a été pondérée par l’inverse de la distance. La valeur du débourrement interpolé a été extraite en chaque site appartenant au réseau d’observations. Finalement, les valeurs simulées et observées ont été comparées. Le débourrement moyen n’étant pas ciblé par les observations de l’OWSF, il a été considéré que celui-ci correspondait à la moyenne entre le débourrement de 10% et 90% des arbres (les deux dates ciblées par les observations).

La qualité des prévisions a été évaluée à l’aide du biais (erreur moyenne entre observations et prévisions) et d’autres mesures communément utilisées en géographie physique (Willmott, 1984) : la racine de l’erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error - RMSE*) et le coefficient de corrélation r^2 . La RMSE est calculée selon la formule (Willmott, 1984 ;

Goosse, 2015) :

$$\text{RMSE [jours]} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (4.1)$$

où n est le nombre d'observations, O_i est la date de débourrement observée i et P_i est la date de débourrement prédite i .

Enfin, le coefficient de corrélation r^2 ne tient pas compte du biais et n'est donc pas une mesure fiable de la performance du modèle (Willmott, 1984) mais permet d'évaluer à quel point les observations de la date de débourrement sont expliquées par les prévisions. Finalement, ces trois indicateurs ont été associés à une comparaison visuelle, en l'occurrence par un nuage de points entre observations et simulations, qui est une étape conseillée dans l'évaluation de la performance d'un modèle (Willmott, 1984 ; Goosse, 2015).

4.2 Détermination de la sensibilité propre aux espèces

Les espèces ne présentant pas la même sensibilité face au gel (Till, 1956 ; Sakai et Larcher, 1987), il convient de tenir compte de leur seuil de résistance lors de l'évaluation du risque de gel tardif. Le seuil de résistance au gel est souvent exprimé dans la littérature comme TL_X , la température léthale responsable de la mort de $X\%$ des tissus (Saxe et al., 2001). Le seuil le plus communément utilisé étant TL_{50} (par exemple Lenz et al., 2013 ; Lenz et al., 2016 ; Vitra et al., 2017). Une recherche dans la littérature de la valeur de résistance des feuilles a été réalisée et ce pour chaque espèce. De plus, des adaptations locales existent. La sensibilité face au gel varie entre les populations/provenances d'une même espèce (par exemple pour le mélèze : Day, 1951 ; pour le chêne sessile : Liepe, 1993 ; Ducouso et al., 1996 ; pour le hêtre européen : Kreyling et al., 2012 ; Hofmann et al., 2015). La recherche a donc été orientée vers des régions similaires à la Wallonie, ayant une latitude et une altitude proches de cette dernière, car ce sont ces deux facteurs géographiques qui sont supposés être les principaux responsables de la variabilité intraspécifique, selon l'hypothèse de Day (1951).

Pour déterminer une valeur de TL_{50} manquante pour le mélèze et ajuster les autres valeurs aux conditions locales de la Wallonie, la relation entre la date de débourrement et la résistance au gel a été utilisée. En effet, les espèces qui débourrent tôt présentent une résistance plus élevée que celles qui débourrent plus tardivement (Sakai et Larcher, 1987 ; Lenz et al., 2013 ; Vitasse et al., 2014a ; Muffler et al., 2016).

Une simple relation linéaire amenant rapidement à des valeurs de résistance aberrantes (comme des TL_{50} positives ou, à l'inverse, extrêmement faibles), une régression non linéaire à 4 paramètres a été réalisée. Celle-ci a déjà été utilisée dans un objectif similaire par Bigler et Bugmann (2018) :

$$TL_{50} [^{\circ}\text{C}] = \phi_1 + \frac{\phi_2 - \phi_1}{1 + \exp[(\phi_3 - x)/\phi_4]} \quad (4.2)$$

Avec ϕ_1 et ϕ_2 les asymptotes, ϕ_3 et ϕ_4 les paramètres libres et x la date de débourrement moyenne.

ϕ_1 est établi à 0°C comme étant la valeur maximale pour définir une gelée (tardive) et ϕ_2

est établi à -5.5°C , la valeur de résistance maximale des feuilles des espèces communes dans nos régions (en l’occurrence le charme commun ; Till, 1956). La date de débourrement moyenne a été calculée à partir des observations phénologiques de l’observatoire wallon de la Santé des Forêts (OWSF ; SPW ARNE-DEMNA-DMF, 2022a) entre 2011 et 2021. Etant donné qu’aucune placette ne présentait les quatre essences, il n’a pas été possible d’enlever l’influence de l’environnement local sur la date de débourrement moyenne. Néanmoins, il a été supposé que le nombre de sites était assez grand et spatialement réparti pour représenter la Wallonie et pour que l’influence de la localisation soit faible dans le calcul de la date de débourrement moyenne, en comparaison avec l’influence de l’espèce. Enfin, étant donné que les adaptations génétiques sont lentes pour les arbres (Savolainen et al., 2004), il a été supposé que la résistance au gel ne variera pas au cours des décennies à venir. Pour une espèce donnée, la même TL_{50} a donc été considérée, indépendamment de l’époque simulée.

4.3 Indicateurs de gelées tardives

Les gelées tardives sont distribuées de manière très hétérogène dans le temps et l’espace (Scheifinger et al., 2003). Par conséquent, l’absence de séries temporelles concernant des observations de leurs dégâts représente la difficulté fondamentale lors de leur étude et il est nécessaire de trouver une alternative (Scheifinger et al., 2003). C’est pourquoi, l’information sur le moment du débourrement, simulé par le module phénologique, et sur la sensibilité des espèces ont été combinées à l’information météorologique pour calculer différents indicateurs (substituts) pertinents pour évaluer le risque des forêts face aux gelées tardives. La fréquence d’années pour lesquelles il y a eu au moins un évènement de gel après débourrement (F) a été calculée. L’évènement de gel tardif étant relativement rare, cet indicateur est imparfait pour étudier l’évolution du risque. De plus, des désaccords importants dans le calcul de la fréquence à partir des différentes sources de données ont été relevés (section 5.3). Dès lors, des indicateurs supplémentaires, inspirés de la littérature, ont aussi été utilisés. Le nombre de jours séparant le débourrement et la dernière gelée impactante de l’année (calculée avec un seuil de 0°C ou correspondant à la TL_{50} ; voir ci-après), appelé la Période de Sécurité (PS ; Scheifinger et al., 2003 ; Marino et al., 2011 ; Lenz et al., 2016 ; Vitasse et al., 2018) a été calculé selon :

$$PS \text{ [jours]} = \text{Date de débourrement [jours]} - \text{Date de dernière gelée impactante [jours]} \quad (4.3)$$

D’ailleurs, les deux termes de cette différence ont parfois été évalués individuellement de sorte à séparer les deux tendances et pouvoir discuter séparément les limites du modèle phénologique et celles des modèles climatiques. Lorsque aucun évènement de gel impactant n’avait lieu entre le 1er Janvier et le solstice d’été, la date de dernière gelée a été établie à 0. Enfin, la marge de sécurité (MS) [$^{\circ}\text{C}$], c’est-à-dire la différence entre le seuil qui définit un gel impactant (calculée avec un seuil de 0°C ou correspondant à la TL_{50} ; voir ci-après) et la température minimale après débourrement (Marino et al., 2011 ; Lenz et al., 2013 ;

Lenz et al., 2016) a elle aussi été calculée selon :

$$MS [^{\circ}C] = \text{Température minimale après débourrement } [^{\circ}C] - \text{Seuil de gel impactant } [^{\circ}C] \quad (4.4)$$

PS et MS , contrairement à la fréquence F , permettent d'évaluer le risque de manière plus continue dans le temps (une valeur pour chaque année peut être calculée). De plus, ce sont des variables qui permettent de surveiller l'évolution du risque sans que l'évènement de gel tardif ait lieu pour autant. Par exemple, une MS qui diminuerait dans le futur mais resterait positive signifierait une augmentation du risque de gelées tardives qui ne serait pas forcément perçue par le calcul des fréquences.

Deux versions de chacun des trois indicateurs ont été calculées. La première version est simplifiée. Elle ne tient pas compte de la TL_{50} mais considère un seuil de $0^{\circ}C$ pour définir une gelée tardive (dans ce cas, MS est simplement la température minimale après débourrement). L'indice "0" est utilisé pour décrire les indicateurs simplifiés (F_0 , PS_0 et MS_0). Cette version offre l'avantage d'éviter l'incertitude sur la détermination de la TL_{50} et de rendre l'évènement moins rare, ce qui facilite son suivi. Cependant, cela veut aussi dire que les évènements considérés ne sont pas tous susceptibles d'être impactants dans des conditions réelles. De plus, selon ces indicateurs simplifiés, les espèces qui débourrent plus tôt seront toujours considérées comme étant plus à risque. Pour ces raisons, ces indicateurs n'ont été utilisés que dans un sous-ensemble d'analyses et une deuxième version a été calculée. Cette dernière considère la TL_{50} propre aux espèces (section 4.2) pour définir un évènement de gel. Les indicateurs sont en quelque sorte normalisés par rapport aux espèces. L'indice " TL " est utilisé pour décrire ces indicateurs (F_{TL} , PS_{TL} et MS_{TL}).

4.4 Validation des données météorologiques/climatiques

Dans la suite du travail, plusieurs sources de données climatiques différentes ont été utilisées pour évaluer le risque de gelées tardives. L'objectif de cette section a été d'évaluer la capacité de ces données à représenter les évènements de gel tardif. Il est intéressant d'avoir une idée de leur qualité au travers de leur concordance avec les observations météorologiques pour lesquelles il y a une plus grande confiance. Pour chaque combinaison site-espèce-année, les mêmes indicateurs ont été calculés à partir de sources de données différentes sur la période commune et pour les cinq sites. Idéalement, la valeur des indicateurs devrait être similaire quelle que soit la source des données utilisée. La concordance entre les différentes sources de données a été évaluée avec les mêmes indices de performance que dans la section 4.1 (nommés alors indices de concordance dans cette section). Le calcul des indices est le même, à la seule différence près qu'il s'agit d'une comparaison entre des résultats calculés à partir de sources de données différentes (observations météorologiques locales, données météorologiques spatialisées et interpolées, réanalyses et modèles climatiques) au lieu d'être une comparaison entre des observations et des simulations.

Premièrement, la concordance entre les résultats calculés à partir des observations météorologiques locales et ceux issus des réanalyses ERA5 a été évaluée. Il est intéressant d'avoir une idée de la qualité des réanalyses car elles ont servi d'intermédiaires à la correction des résultats des modèles climatiques. Les indicateurs ont été calculés sur la période commune

aux deux sources de données : la période 1999-2019. Deuxièmement, la même opération a été réalisée avec les données météorologiques spatialisées et interpolées aux cinq sites. Troisièmement, les indicateurs calculés à partir des deux modèles climatiques et ceux issus des observations météorologiques ont été comparés. Néanmoins, les simulations climatiques utilisées ne représentent que deux évolutions possibles du système (une simulation pour chaque modèle ; Goosse, 2015). Les simulations historiques n'ont pas la prétention de faire des prévisions météorologiques. Il ne faut donc pas s'attendre à ce que les résultats d'une année précise correspondent à ceux de cette même année selon les observations. Dès lors, c'est la valeur moyenne des indicateurs sur la période commune qui a été comparée (combinaisons site-espèce-période). De plus, la période commune entre les observations et les simulations historiques était très courte (1999-2005). Il a donc été décidé d'utiliser les projections qui commencent en 2006 pour allonger cette période (1999-2019). Les projections selon le scénario RCP8.5 ont été utilisées car ce sont les plus proches de la trajectoire qui a été suivie en réalité. Le choix du scénario ne devrait avoir que peu d'impact pour cette comparaison pour différentes raisons. En effet, les différences d'émissions entre les scénarios sont très faibles dans les premières années (Van Vuuren et al., 2011). De plus, c'est l'effet des émissions cumulées (modifiant la concentration atmosphérique) plus que des émissions instantanées qui induit un changement climatique (IPCC, 2021). Enfin, il existe un délai important entre les émissions et leur influence sur le climat (Ricke et Caldeira, 2014). Cette source de données étant de plus grande importance pour ce travail, la comparaison a également été détaillée sur la date de débourrement, la date de dernière gelée sous la TL_{50} et la fréquence F_{TL} . De plus, l'erreur absolue (EA) par rapport aux observations pour chaque combinaison site-espèce, en moyenne par site et en moyenne par espèce a également été calculée.

4.5 Simulation historique des indicateurs de gelées tardives

4.5.1 Évolution historique des indicateurs de gelées tardives

L'objectif de cette section a été d'évaluer si un changement dans le moment du débourrement et surtout dans le risque de gelées tardives a déjà eu lieu historiquement en Wallonie. A l'aide des données météorologiques spatialisées, le modèle phénologique a été appliqué, la PS_{TL} et la MS_{TL} ont été calculées en chaque point sur la période 1961-2019. Ensuite, la tendance (pente d'une régression linéaire) et sa significativité ont été calculées.

4.5.2 Adéquation des indicateurs avec des observations de dégâts

L'objectif de cette section a été d'étudier la concordance entre les indicateurs de gelées tardives et des dégâts en conditions réelles. Pour ce faire, la base de données de l'OWSF concernant les observations de dégâts a été utilisée. Elle a d'abord été filtrée de sorte que seuls les dégâts associés à des événements de gel tardif soient utilisés. Seules les observations qui concernaient les feuilles et/ou dont la mention "gel tardif"/"gelée tardive" apparaissait

en remarque ont été conservées. Ensuite, les dégâts sur les essences autres que les quatre d'intérêt ont été retirés. Néanmoins, afin de maximiser le nombre d'observations, il a été considéré que les espèces appartenant au même genre qu'une des espèces d'intérêt étaient conservées, étant donné leur proximité génétique. Par exemple, les dégâts qui concernaient des chênes pédonculés ont été associés au chêne sessile.

Les valeurs de la période de sécurité (PS_{TL}) et de la marge de sécurité (MS_{TL}) précédemment calculées (section 4.5.1) ont donc été interpolées spatialement selon la même méthode et pour les mêmes raisons que les dates de débourrement (section 4.1). Ensuite, ces indicateurs ont été calculés pour chaque site et année pour lesquels des dégâts dus à un gel tardif ont été observés. Les observations étant rares, d'autant plus après le filtre, et non-systématiques, l'adéquation ne peut pas être rigoureusement et statistiquement étudiée. Dès lors, la valeur de l'indicateur correspondant au lieu et à la date de dégâts observés a simplement été située sur la distribution totale de cet indicateur (toute la Wallonie sur la période 1961-2019). Idéalement, la valeur de l'indicateur où des dégâts ont été observés devrait pointer vers un risque de gel tardif élevé, c'est-à-dire une période de sécurité PS_{TL} et une marge de sécurité MS_{TL} faibles et même négatives.

4.6 Projection des indicateurs de gelées tardives

4.6.1 Comparaison entre la période historique et la période future

Pour évaluer l'évolution du risque de dommages en forêt liés aux gelées tardives suite au changement climatique, les différents indicateurs ont été calculés à partir de projections climatiques et comparés entre la période historique (1979-2005) et la période future (2070-2100). Pour les échéances de plusieurs dizaines d'années, les deux sources d'incertitudes principales des projections climatiques sont les incertitudes liées au modèle et celles liées au scénario (forçage ; Hawkins et Sutton, 2009). Ces dernières étant d'autant plus importantes que l'échéance des projections est longue (Hawkins et Sutton, 2009), telle que l'horizon 2100. Pour capturer ces incertitudes, il convient donc 1) d'utiliser différents modèles climatiques, 2) d'utiliser différents scénarios d'émissions (et autres perturbations anthropiques du climat). Par conséquent, les résultats issus de l'utilisation du modèle CNRM ont été comparés à ceux issus du modèle IPSL. De plus, les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ont été utilisés et les résultats ont été comparés. La comparaison a permis d'évaluer l'influence des émissions futures (et autres) sur le risque de gelées tardives.

L'utilisation de deux modèles et de deux scénarios n'est pas suffisante pour quantifier rigoureusement l'incertitude. Nombreux autres modèles et scénarios devraient être utilisés pour cette quantification. Toutes ces simulations et particulièrement leur réduction d'échelle sont laborieuses/coûteuses (en temps et en argent) et ne sont donc pas facilement accessibles. De plus, les simulations ne sont pas directement utilisables et nécessitent un travail important pour être adaptées au modèle HETEROFOR. Néanmoins, les deux modèles et scénarios à disposition ont déjà offert un aperçu de l'importance des incertitudes.

4.6.2 Tendance jusqu'en 2100

Les indicateurs sont sujets à des incertitudes ayant entre autres pour origine l'incertitude sur la capacité des modèles climatiques à représenter les événements de gel tardif ou encore celle sur la détermination des TL_{50} . Pour cette raison, il ne faut pas se contenter d'analyser uniquement la valeur absolue des indicateurs mais s'intéresser aussi à leur évolution. Dès lors, la tendance des indicateurs sur la période 2006-2100 a elle aussi été étudiée. L'hypothèse est que l'erreur sur les valeurs absolues des indicateurs reste relativement constante dans le temps. Dans ce cas, les tendances des indicateurs seraient (plus) faiblement biaisées. Une valeur par année étant nécessaire pour étudier la tendance, seules la *PS* et la *MS* ont pu être utilisées. Pour chaque combinaison espèce-site-modèle-scénario, une régression linéaire a été établie et sa pente (la tendance) a été calculée.

Résultats et Discussion

5.1 Validation du module phénologique

Le modèle de prévision du débourrement est le plus performant avec le mélèze (un biais quasi nul et une $RMSE = 4.24$ jours ; Figure 5.1). Initialement, la calibration du chêne souffrait d'un biais important ($biais = -5.02$ jours ; Annexe 1) bien que la tendance générale étaient bien représentée. En effet, la variabilité du débourrement prédit est en grande partie expliquée par le débourrement observé ($r^2 = 0.76$). Une rectification du paramètre $F^* = 20$ (section 3.2) a permis de corriger le biais ($biais = -0.34$ jours ; Annexe 1). La $RMSE$ a elle aussi été améliorée (de 6.58 à 5.08 jours). Seul le r^2 a été légèrement dégradé mais reste plus que satisfaisant (de 0.76 à 0.71). de Wergifosse et al. (2022) ont également évalué la performance du chêne à partir de 13 sites européens et ont finalement considéré que le débourrement était globalement bien simulé. Étonnamment, en ce qui concerne le chêne, le biais moyen et la tendance sont légèrement meilleurs dans notre cas, spécifique à la Wallonie. Le modèle s'est montré moins performant dans l'estimation du débourrement pour le hêtre. Les trois indicateurs de la qualité des simulations sont nettement moins bons que pour les deux espèces précédentes ($biais = 4.7$ jours, $RMSE = 8.59$ jours, $r^2 = 0.33$). Visuellement, il est clair que le modèle manque de sensibilité (Figure 5.1, la pente de l'ensemble de points est bien plus faible que la droite 1 :1). Le débourrement prédit varie entre le jour 100 et 120 tandis que les observations varient entre le jour 100 et 140. Ce sont donc surtout les débournements tardifs qui sont les moins bien simulés. Une correction a également été envisagée pour cette espèce. Pour des raisons techniques, les calculs nécessitaient beaucoup de temps. C'est pourquoi seuls quelques paramètres ont été modifiés lors de la recherche d'une meilleure calibration : F_b , F_c et $T_{b_{for}}$ (section 3.2). Des calibrations nécessitant des paramètres F^* et C^* extrêmes auraient potentiellement améliorés les résultats. Néanmoins, bien que le modèle phénologique nécessite des calibrations et soit par conséquent considéré comme hybride (de Wergifosse, 2021), il repose en partie sur des concepts physiques (biologiques ; tels que les *chilling and forcing periods*). Des valeurs aberrantes concernant les accumulations de chaleur et froideur (F^* et C^*) n'ont donc pas été retenues. De tels paramètres auraient potentiellement des comportements inattendus dans des conditions climatiques nouvelles. De plus, la calibration réalisée par Kramer (1994 ; modèle *optimum*) a également été testée. Cette modification n'a pas non plus fourni des résultats probants. Il a donc été décidé de conserver la calibration initiale, malgré ses faiblesses. Les résultats sont d'ailleurs bien différents de ceux obtenus par de Wergifosse et al. (2022). Leurs résultats étaient bien meilleurs et pointaient également

vers une trop faible sensibilité mais de moindre importance. Enfin, les indicateurs de performance du modèle de débourrement pour le frêne ne sont pas commentés car peu d'observations étaient disponibles. Néanmoins, ces rares observations semblent indiquer une sous-estimation (anticipation) du débourrement selon le modèle. Comme pour le hêtre, le modèle pour le frêne pourrait manquer de sensibilité. Une confiance plus faible est donc accordée aux résultats à venir concernant le hêtre et le frêne.

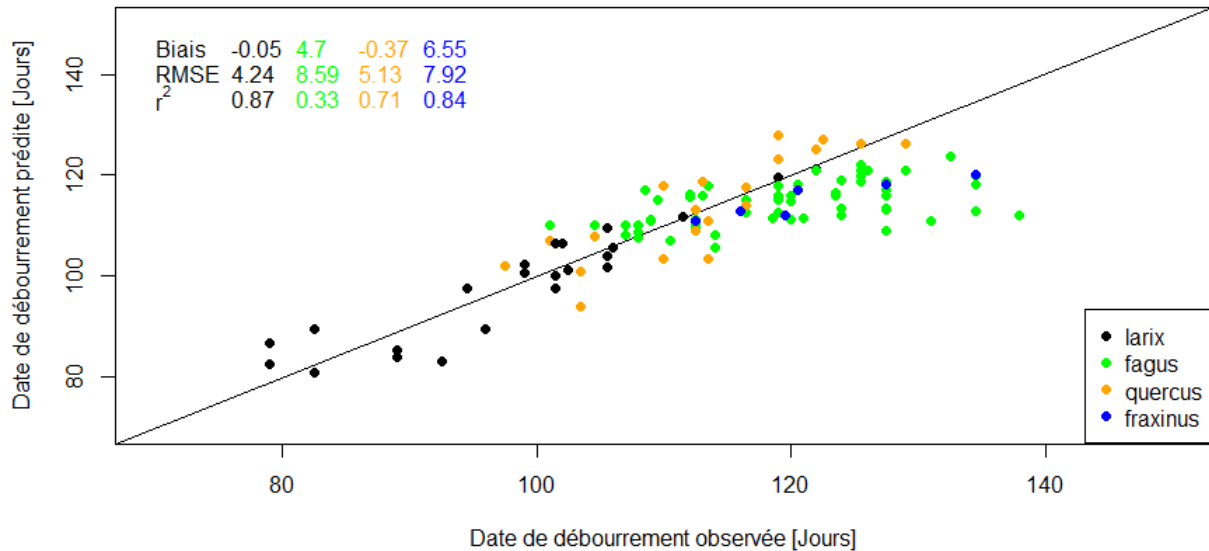


FIGURE 5.1 – Comparaison entre la date de débourrement observée et la date de débourrement prédite [jours]. La qualité des prévisions est indiquée par le biais, la RMSE et le r^2 . Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

Les mauvais résultats concernant le hêtre sont plutôt étonnants étant donné que le modèle a été validé à l'échelle européenne par de Wergifosse et al. (2022). Le même modèle phénologique ayant été utilisé dans leur étude, les différences de résultat doivent être issues des données phénologiques de validation et/ou des données météorologiques. L'observation imparfaite des dates de débourrement ou l'approximation du débourrement moyen (comme étant la moyenne entre les cibles 10% et 90%) pourraient jouer un rôle. Néanmoins, il est fort probable que les données météorologiques soient la principale source du problème étant donné leurs imperfections (également relevées dans la section 5.3). Cependant, la particularité du problème réside dans la différence de résultats entre les espèces. Il est surprenant que le modèle soit validé pour le chêne et le mélèze et pas pour le hêtre. Les espèces étant plus ou moins sensibles à des phases phénologiques différentes (et donc à des périodes de l'année différentes), il est possible la qualité des données météorologiques diffère dans la représentation des températures plus ou moins chaudes.

De plus, l'application du modèle au contexte Wallon pourrait aussi être défailante et une source d'erreurs. La calibration qui a été réalisée à l'échelle européenne pourrait ne pas être adaptée à la situation plus locale de la Wallonie. Cependant, il est difficile d'expliquer pourquoi la calibration fonctionne bien pour le chêne. Une des hypothèses serait une plus grande variation génotypique entre les populations (entre la population wallonne et les autres) de hêtre que de chêne (ou du moins entre la population wallonne et celles utilisées par Duputié et al. (2015) pour la calibration). L'application de modèles

phénologiques locaux à des échelles régionales ou continentales est un défi de taille (Piao et al., 2019). Il est fort probable que l'inverse, c'est-à-dire l'application d'un modèle régional à une situation locale, le soit aussi, d'autant plus qu'aucune observation utilisée pour la calibration Européenne ne soit issue de la Wallonie.

De plus, le modèle phénologique en lui-même pourrait être imparfait. De manière générale, il existe encore de nombreux problèmes avec la modélisation phénologique (Piao et al., 2019). Par conséquent, cette dernière est sujette à de nombreuses améliorations. Le modèle pourrait potentiellement être amélioré en considérant également la photopériode (de Wergifosse et al., 2020a) même si son implication phénologique est moins bien établie (Chuine et Régnière, 2017). La sensibilité à la photopériode dépendrait des espèces et de la latitude (Zohner et al., 2016). Néanmoins, elle pourrait compenser un manque de températures froides (*chilling*) nécessaire pour briser l'endodormance et reportant le débourrement (Vitasse et Basler, 2013 ; Basler et Körner, 2014), une compensation qui n'est actuellement pas considérée dans le modèle. D'autres facteurs abiotiques, tels que la disponibilité en lumière et en eau, et facteurs biotiques tels que la compétition ont potentiellement un effet sur la phénologie et ne sont actuellement pas considérés dans les modèles (Tang et al., 2016 ; Piao et al., 2019). Finalement, une compréhension plus mécaniste de la phénologie et de ses liens avec les processus physiologiques est encore requise (Tang et al., 2016).

Une dernière critique qui peut être faite au modèle concerne l'absence d'une évaluation propre à (la fin de) l'endodormance. Les dates de fin de l'endodormance sont difficiles à mesurer car les méthodes sont destructives, laborieuses et compliquées (Chuine et al., 2016). Par conséquent, les observations de telles dates sont rares et absentes des paramétrisations qui ne reposent que sur les dates de débourrement (fin de l'écodormance ; Chuine et al., 2016). L'effet du réchauffement sur l'endodormance (tendant à freiner l'avancement du débourrement) n'est peut-être pas correctement considéré dans le modèle. Sans une double paramétrisation, il est difficile de vérifier qu'il n'y ait pas une forme d'annulation des erreurs (une phase simulée trop courte qui serait compensée par l'autre phase simulée trop longue). Ce manque est d'autant plus problématique qu'une réduction de l'accumulation de températures froides (*chilling*) liée à l'augmentation des températures a déjà été relevée (Schwartz et Hanes, 2010) et pourrait contrebalancer l'avancement du débourrement (Fu et al., 2015). En effet, Fu et al. (2015) ont montré que l'avancement phénologique par unité de réchauffement (jours/°C) a diminué sur la période 1980 à 2013 en étudiant des espèces communes en Europe dont le hêtre, le frêne et le chêne (pédoncule). Par conséquent, il se pourrait que l'avancement de la date du débourrement projeté soit surestimé. C'est pourquoi, en l'absence d'une paramétrisation de l'endodormance, il est parfois conseillé d'utiliser des modèles à une phase (Chuine et al., 2016). L'absence de cette paramétrisation est d'autant plus importante que l'importance relative de l'endodormance sur le moment du débourrement pourrait augmenter avec le réchauffement (Linkosalo, 2008). Au final, il est difficile d'évaluer le bénéfice net de l'incorporation de la *chilling period* dans le modèle. Tandis que son incorporation rend le modèle plus mécaniste et apte à simuler le futur, elle implique également un risque de complexification contre-productive lorsqu'elle n'est pas paramétrisée avec des observations.

5.2 Détermination de la sensibilité propre aux espèces

Till (1956) a évalué la résistance au gel des jeunes feuilles à Gottingen, dans le centre de l'Allemagne (51.5413° N) entre 200 et 360 mètres d'altitude. Plusieurs essences communes en Europe ont été étudiées, parmi lesquelles : le hêtre commun, le chêne sessile et le frêne. Les premiers dégâts commencent à partir de -2.5°C et une TL_{50} de -3°C a été estimée pour le hêtre. Depuis, ce seuil à plusieurs fois été utilisé pour définir une gelée tardive associée à cette essence présente en Allemagne (Mayer et al., 1988 ; Dittmar et al., 2006 ; Principe et al., 2017). En ce qui concerne le frêne, une valeur de -2°C pour une TL_{20} et -3°C pour une TL_{80} ont été estimées (Till, 1956). La TL_{50} est donc supposée proche de -2.5°C . Aucune valeur explicite de TL_{50} n'a été trouvée pour le chêne. Néanmoins, des dégâts sont observables pour cette espèce à partir de -2.5°C ($\sim TL_{10}$; Till, 1956). Ce qui correspond avec les observations des premiers dégâts à $\sim -3^{\circ}\text{C}$ et une température critique entre -4°C et -8°C par Liepe (1993). Néanmoins, ce dernier a étudié un peuplement de chênes sessiles de seulement 1 an. Etant donné que les jeunes arbres sont plus sensibles (de Wergifosse, 2021), ce sont plutôt les valeurs hautes qu'il faudrait retenir pour des arbres matures. Faute d'informations supplémentaires, c'est finalement une valeur de $TL_{50} = -4^{\circ}\text{C}$ qui a été retenue.

Enfin, aucune valeur de résistance des aiguilles face au gel n'a été trouvée pour le mélèze dans une région dont les conditions seraient proches de la Wallonie bien que l'espèce ait été bien étudiée dans d'autres régions (p. ex. dans les Alpes : Bigler et Bugmann, 2018). L'équation 4.2 a donc été utilisée. C'est finalement la combinaison des paramètres $\phi_3 = 122$ et $\phi_4 = -10$ qui a permis le meilleur ajustement de la courbe aux TL_{50} de la littérature (Figure 5.2). Les valeurs de TL_{50} déterminées par l'équation (4.2) sont indiquées dans la table 5.1. La valeur de -5.1°C estimée par régression pour le mélèze semble cohérente avec des mesures réalisées pour cette même espèce dans des conditions montagneuses. Une TL_{50} de -6.4°C et -6.7°C ont été mesurées par Taschler et al. (2004) et Martin et al. (2010) respectivement. Il est fort probable que le mélèze de ces régions se soit adapté aux températures plus froides. D'ailleurs, Day (1951) a déjà montré des différences de sensibilité pour le mélèze en fonction de la provenance.

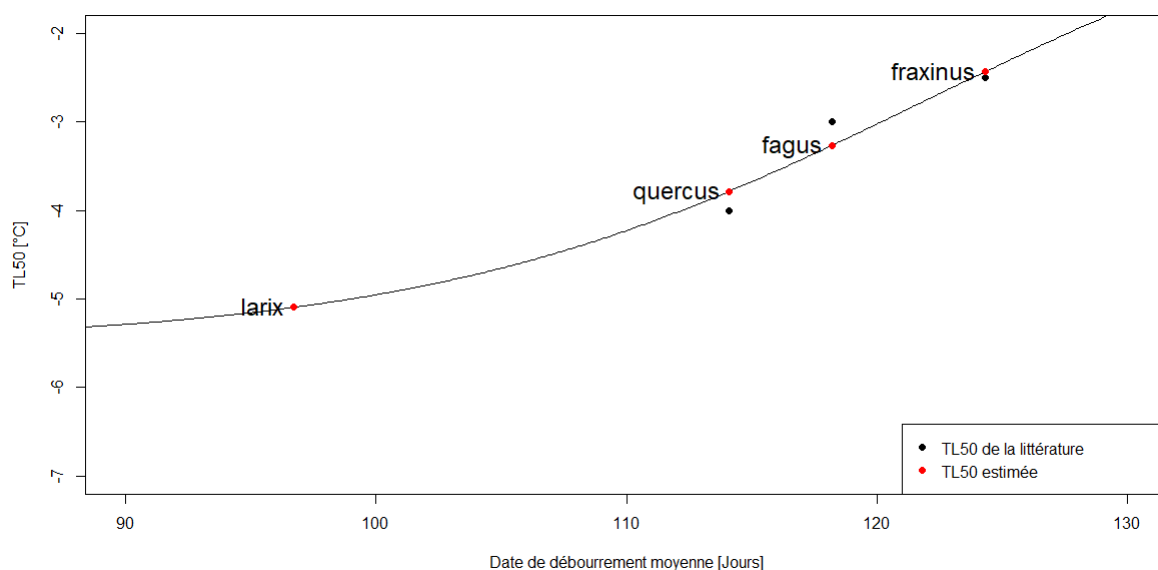


FIGURE 5.2 – Relation entre la date de débourrement moyenne [jours] et le seuil de résistance TL_{50} [°C]. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

Finalement, la classification de la résistance des feuilles estimée par cette méthode correspond relativement bien avec la classification qualitative à l'échelle de l'Europe de la sensibilité des essences face aux gelées tardives faite par Leuschner et Ellenberg (2017). Le frêne et le hêtre sont classés comme ayant une sensibilité élevée tandis que le chêne présente une sensibilité modérée à élevée. Enfin le mélèze est classé comme ayant une sensibilité aux gelées tardives modérée.

TABLE 5.1 – Table-résumé de la détermination de la résistance des espèces face aux gelées tardives (température létale, TL_{50}).

Espèce	Date de débourrement moyenne [Jours]	TL50 déduite de la littérature [°C]	Sources	TL50 estimée par régression [°C]
Frêne	124.3	-2.5	Till (1956)	-2.4
Hêtre	118.2	-3	Till (1956), Mayer (1988), Dittmar et al. (2006), Principe et al. (2017)	-3.3
Chêne	114.1	-4	Till (1956), Liepe (1993)	-3.8
Mélèze	96.7	/	/	-5.1

La détermination des seuils de sensibilité reste imparfaite. Expérimentalement, de telles mesures sont difficiles/laborieuses à réaliser (estimation visuelle ou mesure de la conductivité électrique; voir par exemple Lenz et al., 2013) et il a donc été nécessaire d'utiliser la littérature. De plus, la détermination du seuil manquant à l'aide des dates de débourrement a été faite avec seulement trois observations (le minimum pour une régression non linéaire). C'est pourquoi les valeurs absolues des trois indicateurs calculés par la suite (section 5.5.1) sont à interpréter avec précaution.

5.3 Validation des données météorologiques/climatiques

Par rapport à la période de sécurité (PS_{TL}) calculée sur base des observations météorologiques, celle obtenue à partir des données météorologiques spatialisées et interpolées aux cinq sites a un biais moyen de 13.52 jours, la RMSE est de 25.75 jours et le r^2 de 0.35 (Figure 5.3). La PS_{TL} est surestimée pour les faibles valeurs selon les observations mais, à l'inverse, sous-estimée pour les hautes valeurs. La concordance est meilleure en ce qui concerne la marge de sécurité (MS_{TL}) avec un biais de 0.99 °C, la RMSE de 1.63 °C et le r^2 de 0.55 (Figure 5.4). Le biais est visuellement très clair. La MS_{TL} est bien souvent sous-estimée par les données météorologiques spatialisées.

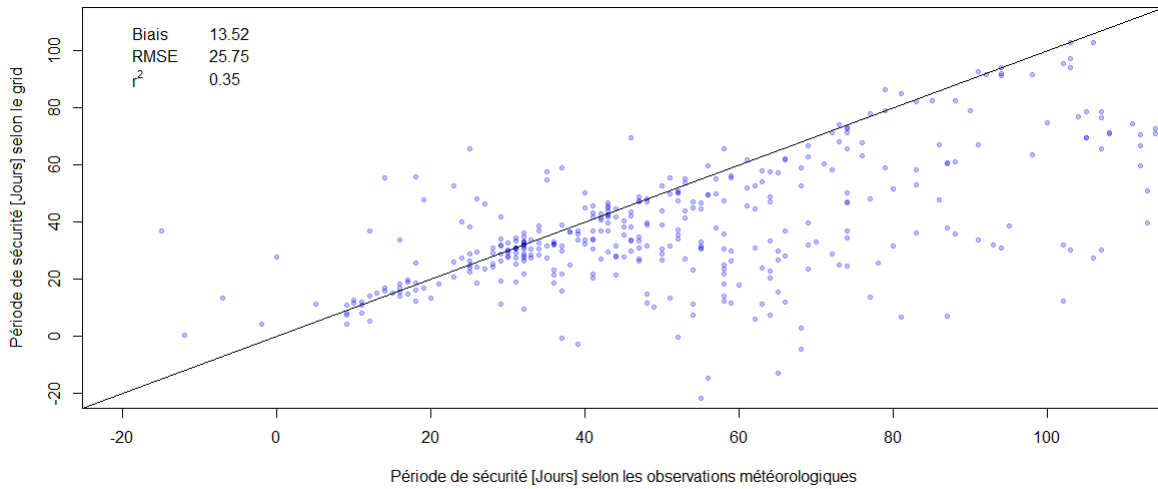


FIGURE 5.3 – Comparaison entre la Période de Sécurité (PS_{TL}) calculée selon les observations météorologiques et celle calculée selon les données météorologiques spatialisées. La concordance entre les sources de données est indiquée par le biais, la RMSE et le r^2 .

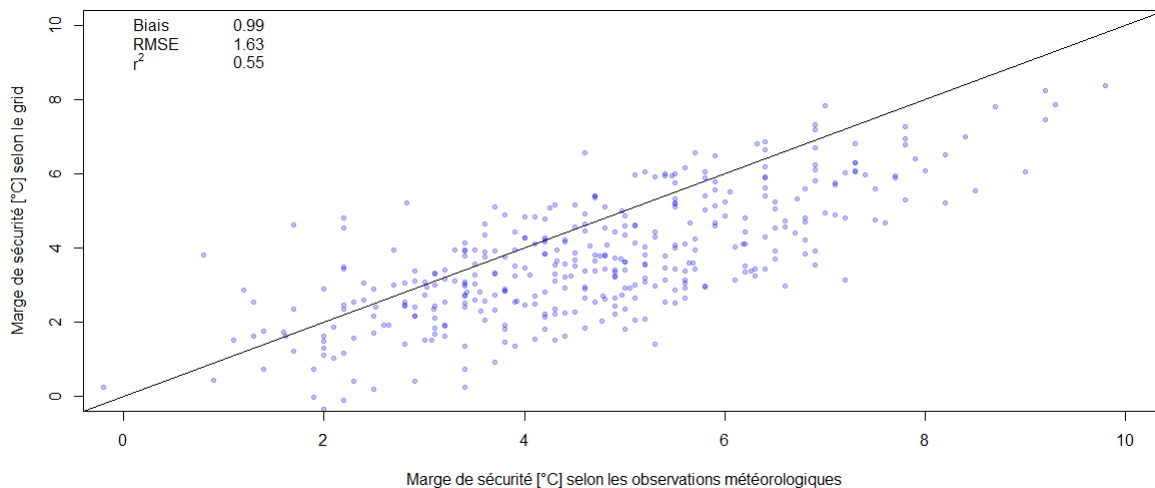


FIGURE 5.4 – Comparaison entre la Marge de Sécurité (MS_{TL}) calculée selon les observations météorologiques et celle calculée selon les données météorologiques spatialisées. La concordance entre les sources de données est indiquée par le biais, la RMSE et le r^2 .

Par rapport à la période de sécurité (PS_{TL}) calculée sur base des observations mé-

téorologiques, celle obtenue à partir des réanalyses ERA5 a un biais moyen de 2 jours, la RMSE est de 19.48 jours et le r^2 de 0.5 (Figure 5.5). La correction des réanalyses a été légèrement bénéfique selon la RMSE et le r^2 . Néanmoins, le biais est passé de 0.63 à 2 jours. La concordance est meilleure en ce qui concerne la marge de sécurité (MS_{TL} ; Figure 5.6). Après correction, le biais moyen est de -0.12 °C, la RMSE de 0.99 °C et le r^2 de 0.74. La correction des réanalyses a été bénéfique à la représentation de la MS_{TL} étant donné que les trois paramètres de concordance ont été améliorés par la correction.

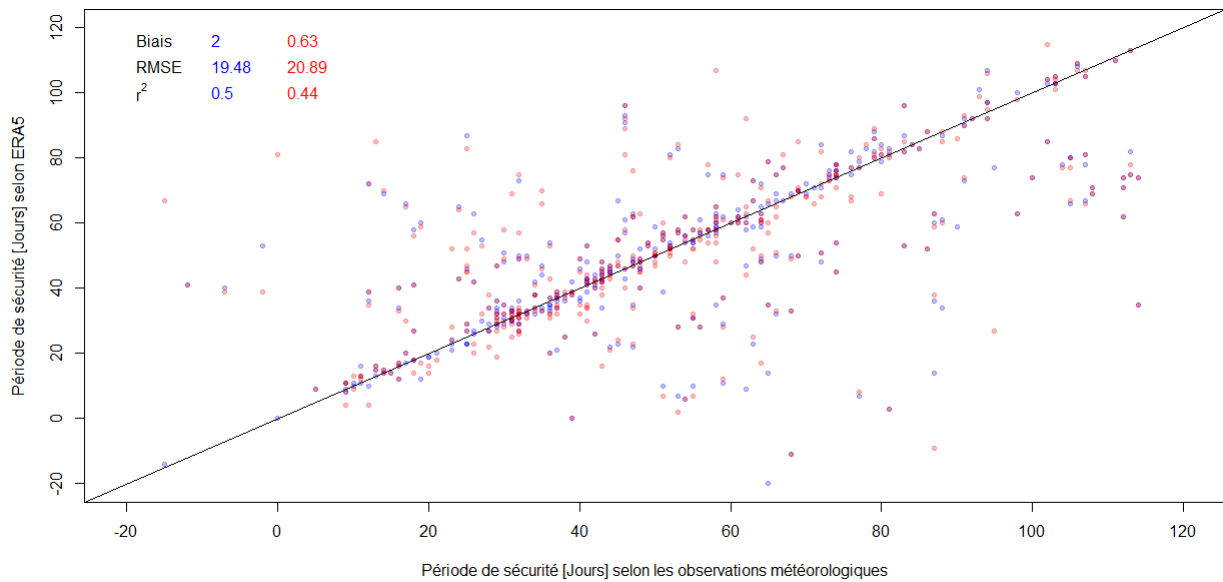


FIGURE 5.5 – Comparaison entre la Période de Sécurité (PS_{TL}) calculée selon les observations météorologiques et celle calculée selon les réanalyses ERA 5 corrigées (bleu) et non corrigées (rouge). La concordance entre les sources de données est indiquée par le biais, la RMSE et le r^2 .

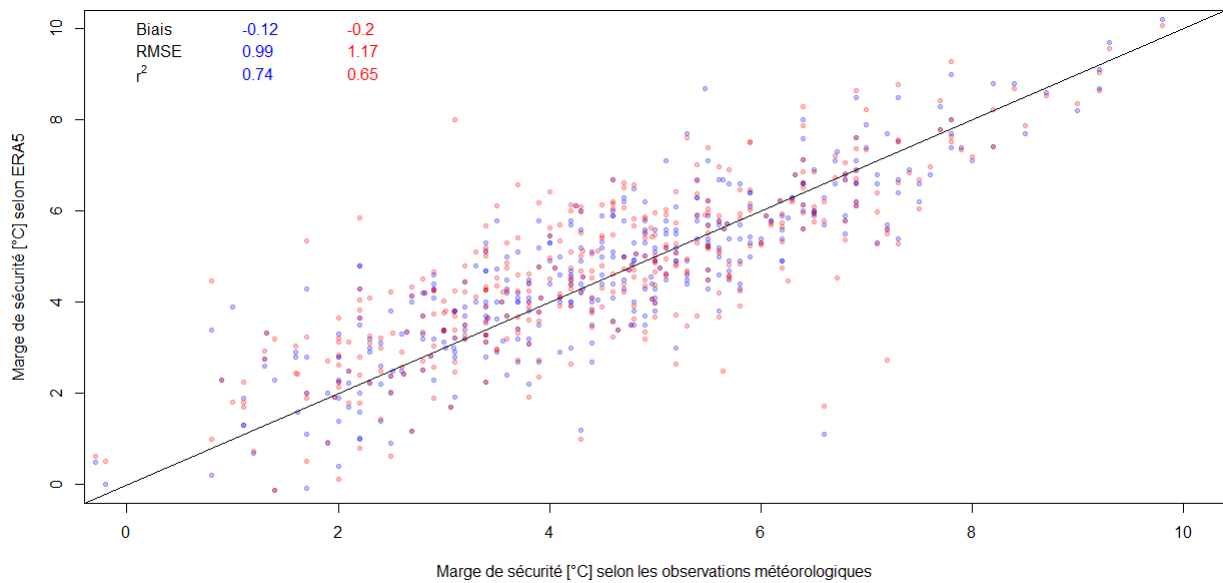


FIGURE 5.6 – Comparaison entre la Marge de Sécurité (MS_{TL}) calculée selon les observations météorologiques et celle calculée selon les réanalyses ERA 5 corrigées (bleu) et non corrigées (rouge). La concordance entre les sources de données est indiquée par le biais, la RMSE et le r^2 .

Concernant les modèles climatiques régionaux corrigés IPSL et CNRM, il y a un désaccord important avec les observations dans le calcul de la fréquence d'évènements de gel tardif (F_{TL} ; Table 5.2). Par conséquent, la fréquence est considérée comme un indicateur peu efficace pour étudier le risque de gelées tardives. La concordance avec les observations dans la représentation de la PS_{TL} moyenne (sur la période 1999-2019) est bien meilleure pour le modèle IPSL que le modèle CNRM (Figure 5.7). En effet, les quatre indices de concordance sont meilleurs pour le modèle IPSL (biais = -0.83 jours, RMSE = 5.73 jours, $r^2 = 0.73$, EA = 4.43 jours; Figure 5.7 et Annexe 2.a) que le modèle CNRM (biais = 10.49 jours, RMSE = 12.71 jours, $r^2 = 0.33$, EA = 10.74; Figure 5.7 et Annexe 2.b). La tendance des résultats concernant le modèle IPSL est très proche de la droite 1 :1 mais non-parallèle pour le modèle CNRM. De plus, il est visuellement clair que ce dernier tend à sous estimer la période de sécurité. Les résultats s'expliquent par la concordance avec les observations de la date de débourrement (Annexe 3) et de la date de dernière gelée sous la TL_{50} (Annexe 4). Pour le modèle CNRM, un biais négatif (surestimation) est clairement visible pour les deux variables. Néanmoins, celui-ci est plus important pour la date de dernière gelée que pour la date de débourrement. Il en résulte une sous-estimation de la PS_{TL} . En ce qui concerne le modèle IPSL, les deux concordances sont plus fortes individuellement. Les trois indices sont meilleurs pour les deux variables avec ce modèle (Annexes 3-4).

Étonnamment, et à l'inverse de la période, la marge de sécurité (MS_{TL}) est toujours sous estimée par le modèle IPSL (biais = 1.45; Figure 5.8) et toujours surestimée par le modèle CNRM (biais = -1.37). Ce comportement différent entre les deux indicateurs peut être expliqué par l'évolution de la température minimale selon les deux modèles, en comparaison avec celle des observations météorologiques. La PS est plus sensible aux températures minimales avant débourrement tandis que la MS est plus sensible aux températures minimales après débourrement. Dès lors, en considérant un débourrement moyen le 110ème jour de l'année (correspondant grossièrement à la Table 5.1), le modèle CNRM (IPSL) présente une température minimale avant (après) débourrement plus faible que celle des observations. Enfin, de manière absolue, les deux modèles ont une concordance similaire avec les observations sur la représentation de la MS_{TL} (RMSE, r^2 et EA très proches entre les deux modèles). Dans les deux cas, la tendance est relativement corrélée avec les observations, c'est à dire parallèle à la droite 1 :1.

TABLE 5.2 – Fréquence de gelées tardives (F_{TL}) [$année^{-1}$] sur la période 1999-2019 calculée selon a) les observations météorologiques, b) le modèle IPSL c) le modèle CNRM.

a) Observations Météorologiques					b) Modèle IPSL					c) Modèle CNRM				
	larix	fagus	quercus	fraxinus		larix	fagus	quercus	fraxinus		larix	fagus	quercus	fraxinus
Chimay	0.05	0.05	0.05	0.00	Chimay	0.00	0.00	0.00	0.05	Chimay	0.00	0.00	0.00	0.00
Eupen	0.05	0.00	0.00	0.00	Eupen	0.00	0.05	0.00	0.11	Eupen	0.00	0.00	0.00	0.00
LLN	0.00	0.00	0.00	0.00	LLN	0.00	0.00	0.00	0.00	LLN	0.00	0.00	0.00	0.00
Virton	0.05	0.00	0.00	0.00	Virton	0.00	0.00	0.00	0.00	Virton	0.00	0.00	0.00	0.00
Wellin	0.00	0.00	0.00	0.00	Wellin	0.00	0.00	0.00	0.05	Wellin	0.05	0.00	0.00	0.00

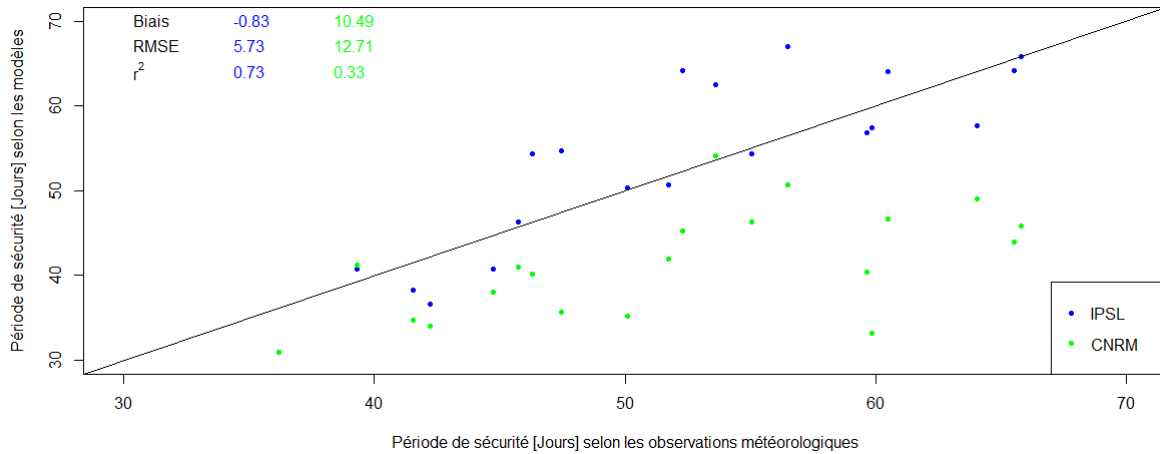


FIGURE 5.7 – Comparaison entre la Période de Sécurité moyenne sur la période 1999-2019 (PS_{TL}) calculée selon les observations météorologiques et celle calculée selon les modèles climatiques IPSL (bleu) et CNRM (vert). La concordance entre les sources de données est indiquée par le biais, la RMSE et le r^2 .

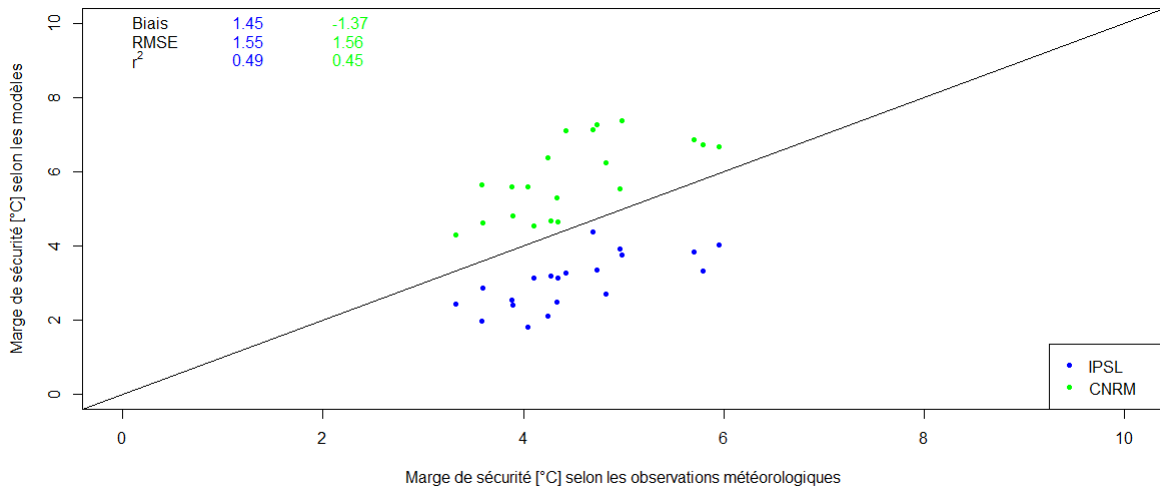


FIGURE 5.8 – Comparaison entre la Marge de Sécurité (MS_{TL}) moyenne sur la période 1999-2019 calculée selon les observations météorologiques et celle calculée selon les modèles climatiques IPSL (bleu) et CNRM (vert). La concordance entre les sources de données est indiquée par le biais, la RMSE et le r^2 .

Globalement, pour toutes les sources de données, l'adéquation avec les observations météorologiques est imparfaite et est meilleure avec la marge de sécurité qu'avec la période de sécurité. Il n'est pas étonnant que la concordance soit faible entre les observations et les données météorologiques spatialisées et interpolées aux cinq sites. De manière générale, l'interpolation statistique des températures minimales est très difficile étant donné leur forte variabilité spatiale (Scheifinger et al., 2003 ; Kollas et al., 2014). La concordance avec les réanalyses et les observations est elle aussi imparfaite. Néanmoins, les réanalyses ne représentaient qu'un intermédiaire de correction. La concordance entre les observations et les modèles climatiques est de plus grande importance, surtout après les corrections qui n'avaient pas pour objectif la bonne représentation des températures extrêmes (de Wergifosse et al., 2022). Bien qu'il y ait généralement un biais non négligeable entre les résultats issus des observations et des modèles (pour la PS et la MS), l'élément de plus

grande importance, c'est-à-dire la tendance, est relativement concordante, au moins pour le modèle IPSL. Enfin, le biais important représente un élément de plus en faveur d'une considération avec précaution des valeurs absolues calculées par la suite (section 5.5.1). Le modèle CNRM ayant montré une moins bonne concordance que le modèle IPSL en général, il a été décidé que seuls les résultats du modèle IPSL concernant les valeurs absolues (section 5.5.1) seraient montrés afin de réduire le nombre d'analyses.

5.4 Simulation historique des indicateurs de gelées tardives

5.4.1 Évolution historique du débourrement et des indicateurs de gelées tardives

Il semblerait qu'un changement dans la date de débourrement ait déjà eu lieu historiquement. En effet, le modèle a simulé une avancée de cette date pour toute la Wallonie sur la période 1961-2019 (Annexe 6). Les tendances simulées sont toujours significatives, à l'exception des faibles valeurs dans le Sud-Est de la Wallonie, pour le hêtre et le frêne. Selon les simulations, l'avancée aurait été plus importante pour le mélèze et le chêne (de -0.4 à -0.1 jours/an selon la région) que pour le hêtre et le frêne (de -0.2 à 0 jours/an selon la région). Le patron spatial est relativement similaire entre les espèces. L'avancée de la date de débourrement augmente grossièrement selon un axe Sud-Est à Nord-Ouest. Les plus faibles avancées pour le hêtre et le frêne sont probablement liées au manque de sensibilité du modèle phénologique discutée précédemment (section 5.1). D'ailleurs, les valeurs sont plus cohérentes entre le chêne, le mélèze et la littérature témoignant d'un avancement entre 2.5 et 5.4 jours par décennie en Europe sur la période historique (Chmielewski et Rötzer, 2001 ; Menzel et al., 2006 ; Stockli et Vidale, 2004 ; Jeong et al., 2011 ; Fu et al., 2014).

De cette avancée dans le moment du débourrement et des changements dans la distribution des dernières gelées (Section 2.1, Figure 2.1) résulteraient des modifications dans le risque de gelées tardives. Premièrement, la période de sécurité aurait évolué de manière hétérogène en Wallonie (Figure 5.9). La tendance varie entre -0.9 et 0.9 jours/an selon l'endroit et l'espèce. Pour le chêne et le mélèze, la *PS* aurait majoritairement diminuée et ce principalement dans le Sud-Est. En ce qui concerne les deux autres essences, à l'inverse, la *PS* aurait plutôt augmenté sur la période 1960-2018. Néanmoins, une tendance à la diminution dans certaines régions, et principalement le Sud-Est, est aussi bien visible. Deuxièmement, la marge de sécurité aurait elle aussi évolué de manière hétérogène sur la période 1960-2018. La tendance varie entre -0.06 et 0.04 °C/an selon l'endroit et l'espèce (Figure 5.10). L'évolution de la marge de sécurité est en accord avec la période de sécurité. Globalement, les mêmes patrons spatiaux que pour la *PS* sont observables.

Cependant, les résultats de cette partie sont à interpréter avec précaution car la fiabilité des données météorologiques spatialisée à représenter les valeurs extrêmes n'est pas certaine. Pour rappel, la concordance avec les observations météorologiques locales était relativement faible (section 5.3).

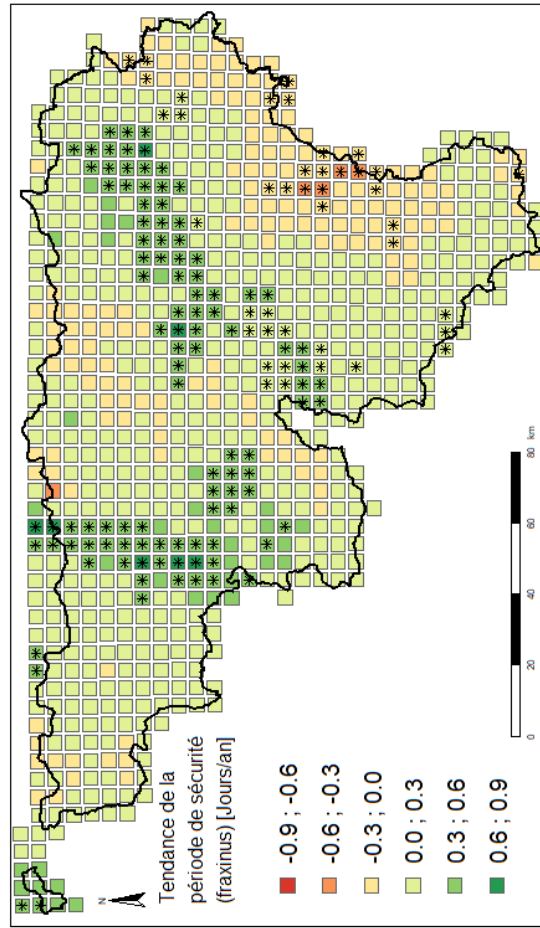
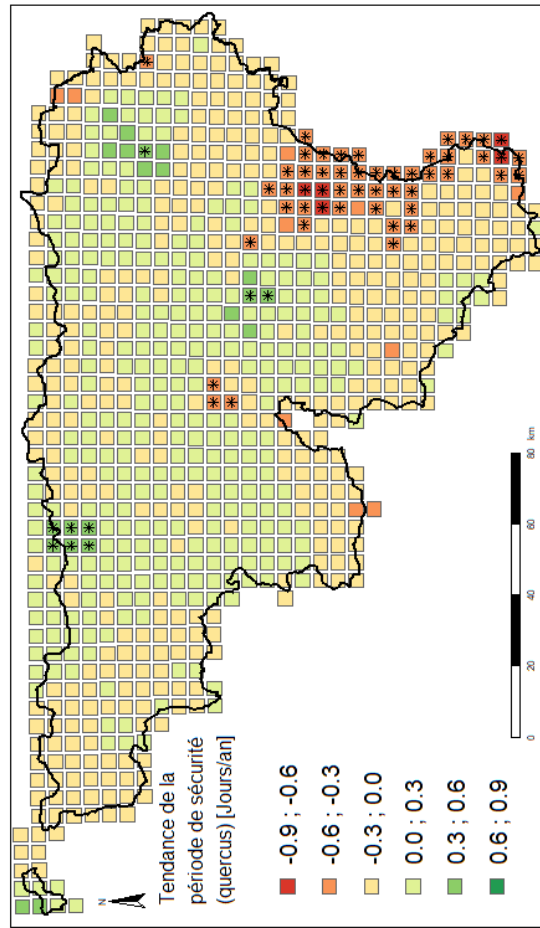
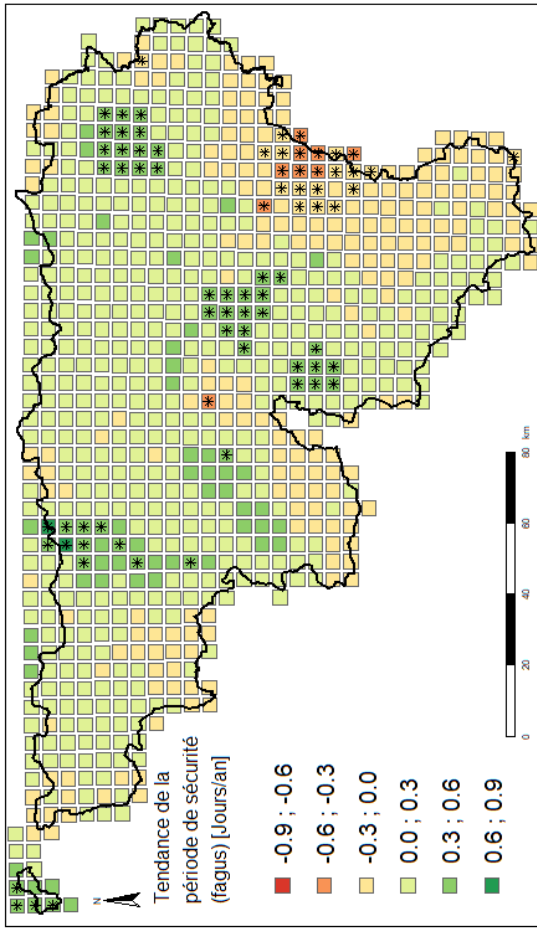
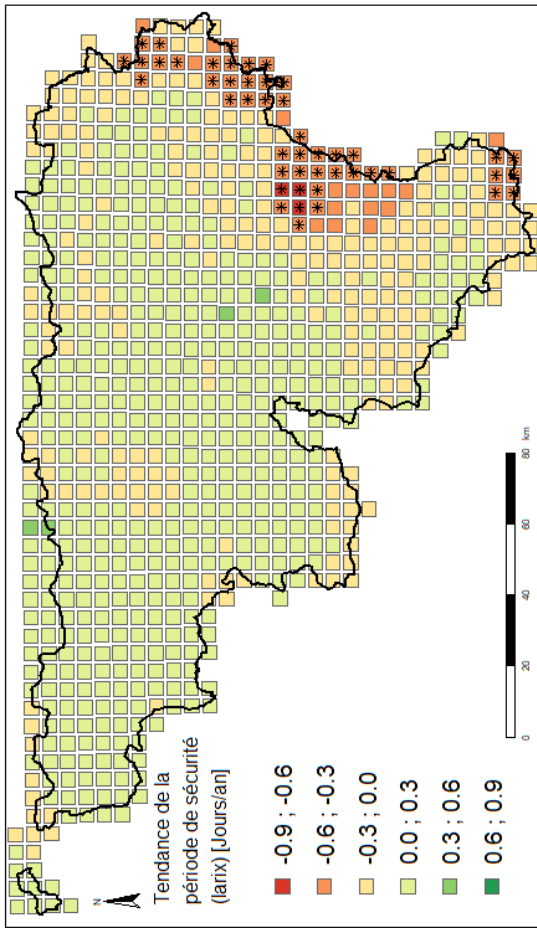


FIGURE 5.9 – Tendance de la période de sécurité (P_{STL}) [jours/an] sur la période 1961-2019. Une étoile indique une tendance significative (p -valeur < 0.05). Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

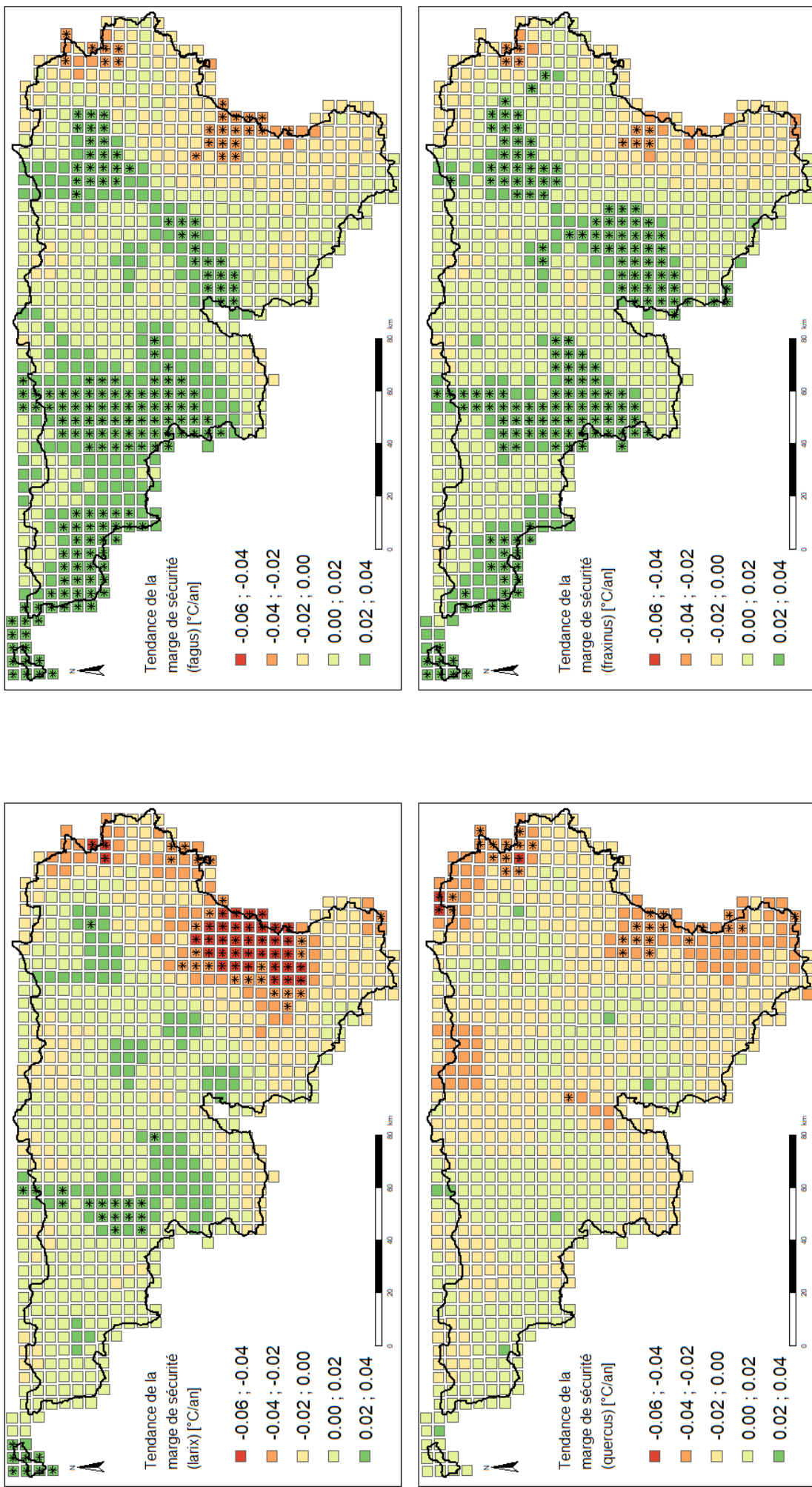


FIGURE 5.10 – Tendence de la marge de sécurité ($MSTL$) [$^{\circ}C/an$] sur la période 1961-2019. Une étoile indique une tendance significative (p -valeur < 0.05). Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

5.4.2 Adéquation des indicateurs avec des observations de dégâts

Il ne semble pas y avoir de cohérence entre les quelques évènements de gel tardif observés et la valeur des indicateurs PS_{TL} et MS_{TL} qui leur a été associées (Figures 5.11 et 5.12). En effet, pour tous les sites où des dégâts ont été observés, la valeur de l'indicateur est supérieure à 0, le seuil pourtant supposé faire la distinction entre un évènement et un non-évènement de gel tardif. Certains évènements sont d'ailleurs plutôt situés sur la droite de la distribution où les valeurs indiquent pourtant une grande sécurité face aux gelées tardives. Même en considérant la PS_0 et la MS_0 , un évènement de dégâts a été situé dans des valeurs positives qui indiquent pourtant qu'aucune gelée au sens strict (seuil de 0°C) n'a eu lieu après le débourrement (du chêne en l'occurrence ; Annexes 7 et 8).

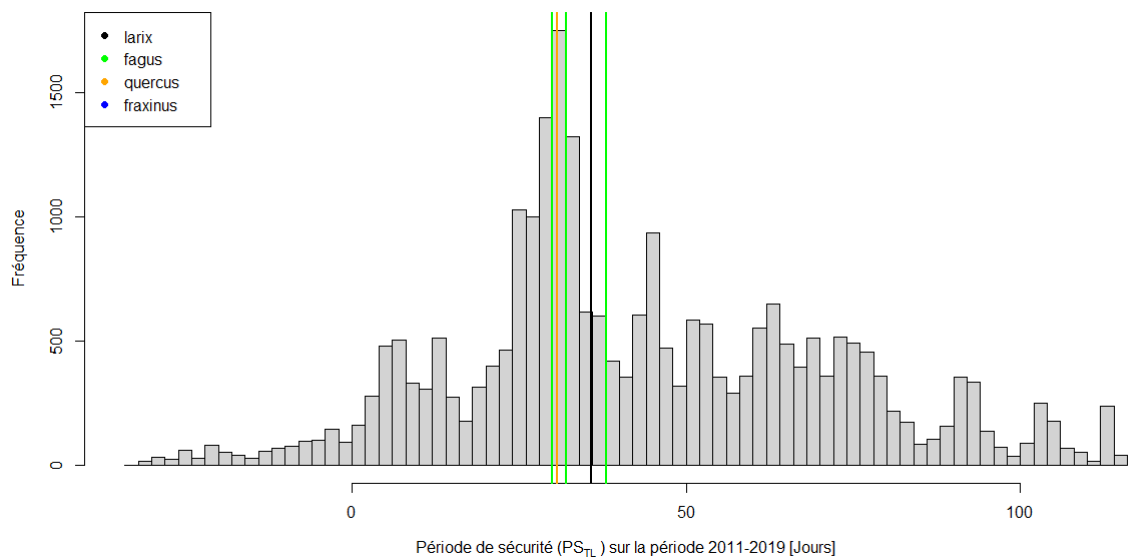


FIGURE 5.11 – Distribution de la période de sécurité (PS_{TL}) sur la période 2011-2019 [jours]. La position des droites verticales indique la valeur de l'indicateur calculée pour un site et l'année où des dégâts ont été observés. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

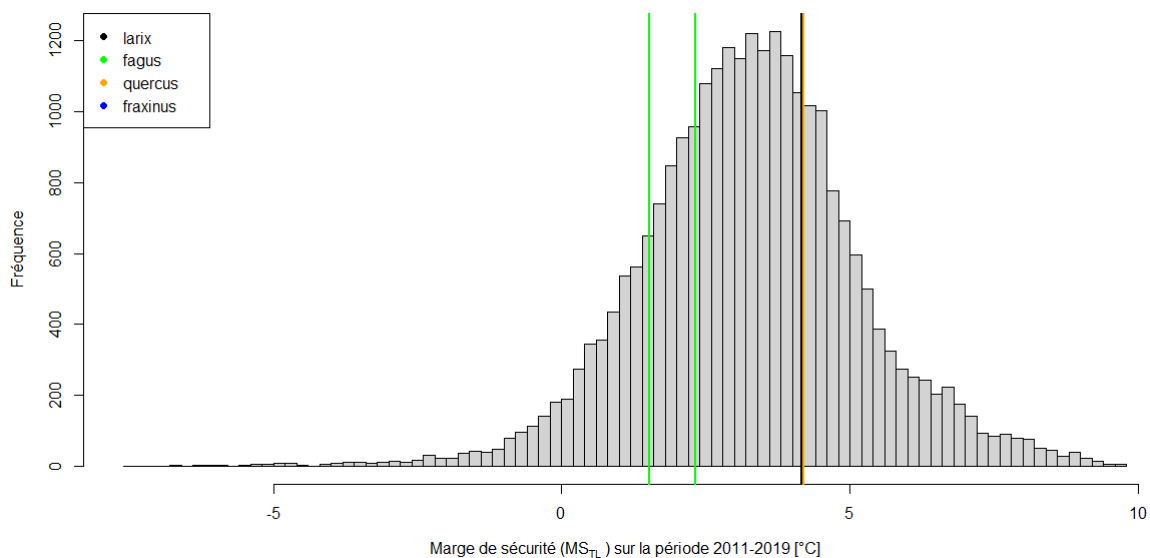


FIGURE 5.12 – Distribution de la marge de sécurité (MS_{TL}) sur la période 2011-2019 [$^{\circ}\text{C}$]. La position des droites verticales indique la valeur de l'indicateur calculée pour un site et l'année où des dégâts ont été observés. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette très mauvaise adéquation entre les indicateurs de gelées tardives et des dégâts en conditions réelles. Pour discuter celles-ci, l'un des évènements de gel observés, celui concernant le hêtre représenté sur les Figures 5.11 et 5.12 et les Annexes 7 et 8 est utilisé. La première hypothèse concerne l'erreur sur le modèle phénologique. Néanmoins, il a été montré que celui-ci est plutôt efficace pour simuler le débourrement du chêne. D'ailleurs, l'erreur sur le modèle devrait atteindre près de 20 jours pour expliquer cette mauvaise adéquation (Figures 5.11), une valeur bien au-delà de l'erreur la plus grande observée lors de la validation (Figure 5.1). De plus, une observation du débourrement dans un site à quelques kilomètres a été réalisée cette même année. L'écart entre le site observé et celui simulé est de seulement 5 jours. Il est donc peu probable que l'erreur du modèle phénologique soit à l'origine de cette mauvaise adéquation. La deuxième hypothèse concerne le mélange des espèces du même genre (qui avait été utilisé afin d'augmenter le nombre d'observations ; section 4.5.2) et la détermination du seuil de sensibilité. Néanmoins, cette hypothèse est rejetée car même les indicateurs simplifiés (PS_0 et MS_0 ; Annexes 7 et 8) se sont révélés positifs pour le chêne. Il reste deux hypothèses liées au matériel pouvant expliquer la mauvaise adéquation. La base de données concernant des dégâts de gel est imparfaite. L'attribution des dégâts au gel n'est pas toujours rigoureusement établie. Enfin, l'hypothèse principale concerne les conditions météorologiques locales qui ne seraient pas perçues par la trop faible résolution spatiale des données météorologiques. En Wallonie, les problèmes de gelées tardives semblent plutôt être des phénomènes très localisés (en tous cas concernant les arbres non fruitiers, à en juger par l'absence de communication dans ce sens), contrairement à d'autres régions du monde ou de tels évènements peuvent aussi être généralisés. En 2007 par exemple, l'Est des États-Unis a été frappé par un évènement de gel à très grande échelle (sur plusieurs états) et dévastateur (Gu et al., 2008). La végétation naturelle et les cultures ont été affectées, résultant en des pertes économiques importantes (Gu et al., 2008). En Wallonie, la topographie pourrait être responsable de ces conditions météorologiques locales particulières et plus propices aux gelées. Si le nombre d'observations avait été plus grand et permettait une étude rigoureuse, il aurait été intéressant d'étudier la topographie de ces sites avec un modèle numérique de terrain à haute résolution spatiale (par un exemple un LIDAR). Des informations qui peuvent être extraites des modèles de terrain sont d'ailleurs utilisées dans la prédiction des températures minimales à fine échelle (Le Roux et al., 2017). La courbure (concavité ou convexité) est également d'importance dans l'étude du risque de gelées (Lindkvist et al., 2000). De plus, durant les nuits à ciel dégagé et vent faible, le refroidissement in situ par rayonnement est favorisé (Lindkvist et al., 2000). Dans de telles conditions, la température des feuilles peut être jusqu'à 3°C inférieure à la température de l'air environnant (Leuning et Cremer, 1988). Cette variation de température à une micro-échelle ne peut bien évidemment pas être perçue par les données météorologiques. Au final, dans notre cas, le calcul des indicateurs sur toute la Wallonie avec ces données météorologiques spatialisées n'est probablement pas valide à l'échelle d'une placette.

5.5 Projection des indicateurs de gelées tardives

5.5.1 Comparaison entre la période historique et la période future

Pour rappel, les résultats de cette section ne concernent que le modèle IPSL. Le modèle CNRM a été écarté pour sa moins bonne concordance avec les observations météorologiques concernant la représentation des valeurs absolues des indicateurs. Les événements de gel tardif ont été simulés comme peu courants sur la période historique (1979-2005), avec une fréquence F_{TL} moyenne inférieure à 0.04 (Figure 5.13). Les F_{TL} maximales avoisinent 0.08 dans le cas du hêtre et du frêne. La F_{TL} est extrêmement faible pour le mélèze et nulle pour le chêne. Pour la période future (2070-2100), selon le scénario RCP4.5, la fréquence d'évènements est encore plus faible pour toutes les espèces, à l'exception du chêne. La F_{TL} est nulle pour le hêtre et le frêne. Selon le scénario RCP8.5, aucun évènement de gel tardif n'a été simulé, quels que soient le site ou l'espèce. Par conséquent, toutes les fréquences sont nulles.

En ce qui concerne la période de sécurité PS_{TL} , la médiane (et la moyenne) reste largement supérieure à 0 jour quels que soient l'espèce ou le scénario (Figure 5.14). Pour un scénario donné, elle est plus faible pour *Fraxinus* que pour les autres espèces. Pour toutes les espèces et quel que soit le scénario RCP, la médiane est bien supérieure sur la période future. Néanmoins, la variabilité reste relativement grande pour toutes les espèces selon le scénario RCP4.5, ce qui amène à l'occurrence de quelques évènements de gel tardif dans le cas de *Larix* et *Quercus* (correspondant aux fréquences relevées précédemment). A l'exception de *Larix*, la PS_{TL} médiane augmente encore plus selon le scénario RCP8.5 et la variabilité ne suffit plus pour que des évènements aient lieu. Étonnamment, la variabilité pour *Larix* selon ce même scénario est très faible et donc le risque d'évènements est bien inférieur que dans le scénario RCP4.5, malgré des valeurs médianes très proches.

Concernant la marge de sécurité MS_{TL} , comme pour la PS_{TL} , la médiane (et la moyenne) reste largement supérieure à 0 °C quels que soient l'espèce ou le scénario (Figure 5.15). Pour un scénario donné, elle est plus faible pour *Fraxinus* que pour les autres espèces. Là aussi, la médiane est plus élevée dans le futur, même si l'effet est moins marqué que pour la PS_{TL} et que les valeurs sont très similaires entre les deux scénarios RCP, à l'exception de *Fraxinus*. La variabilité reste également importante dans le futur.

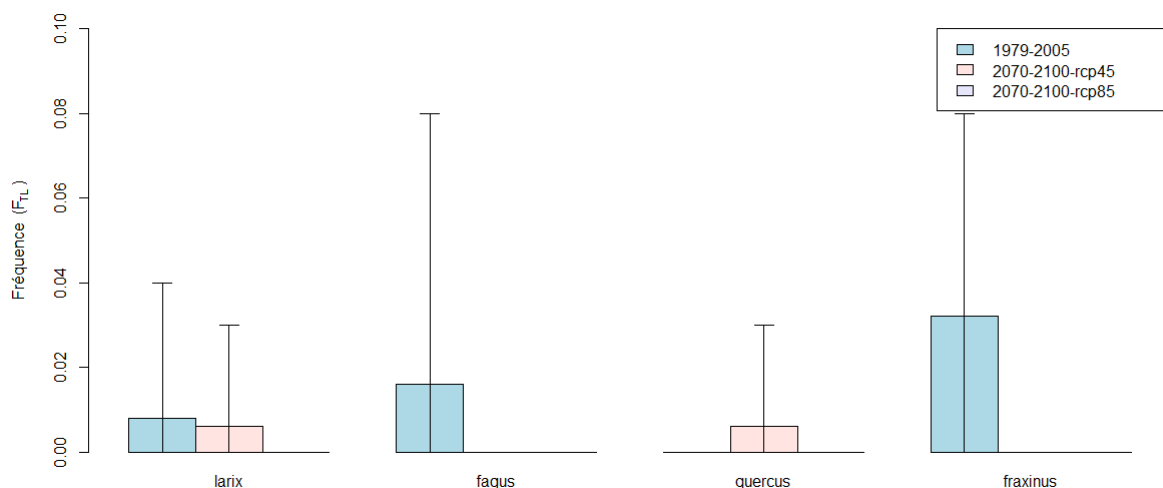


FIGURE 5.13 – Fréquence de gelées tardives (F_{TL}) [$année^{-1}$] moyennée sur les 5 sites pour la période historique (1979-2005) et la période future (2070-2100) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (modèle IPSL). Les extrémités des moustaches indiquent le maximum parmi les cinq sites. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

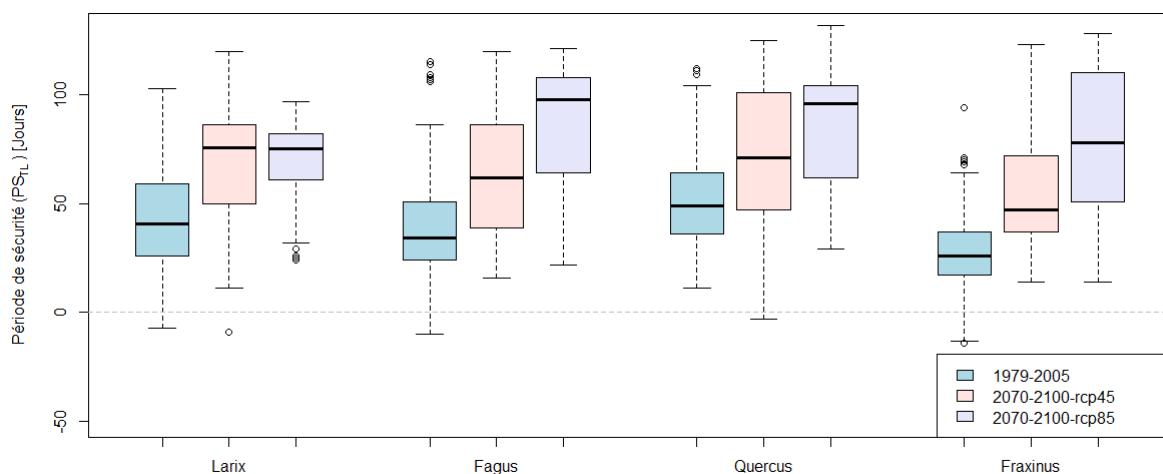


FIGURE 5.14 – Période de sécurité (P_{STL}) [jours] (5 sites) pour la période historique (1979-2005) et la période future (2070-2100) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (modèle IPSL). La droite horizontale épaisse indique la médiane, la dimension verticale des boîtes indique l'étendue interquartile et la dimension verticale des moustaches représente $1.5 \times$ l'étendue interquartile. Les points correspondent aux *outliers*. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

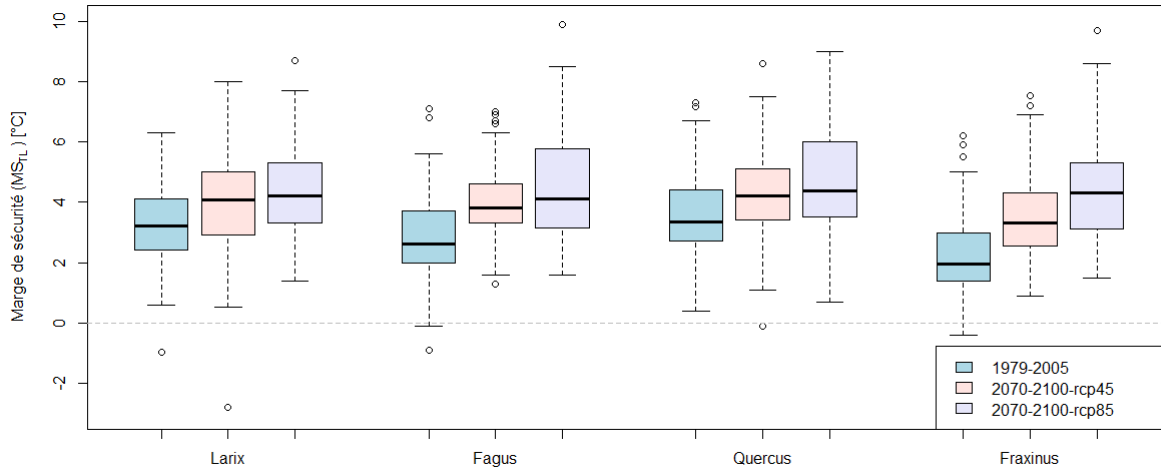


FIGURE 5.15 – Marge de sécurité (MS_{TL}) [°C] (5 sites) pour la période historique (1979-2005) et la période future (2070-2100) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (modèle IPSL). La droite horizontale épaisse indique la médiane, la dimension verticale des boîtes indique l'étendue interquartile et la dimension verticale des moustaches représente $1.5 \times$ l'étendue interquartile. Les points correspondent aux *outliers*. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

Pour un scénario donné, la différence (pour les trois indicateurs) entre les espèces est fortement dépendante de la détermination du seuil de résistance qui, pour rappel, est sujette à d'importantes incertitudes. Par exemple, le frêne pourrait être injustement considéré comme l'espèce la plus à risque à cause d'une résistance estimée trop faible. Les données de dégâts dus au gel sont rares mais auraient permis de valider ou non ce résultat. Cependant, la différence relative entre les scénarios, pour une espèce donnée, est déjà une information très intéressante en elle-même. Il est visuellement clair que les distributions entre la période actuelle et la période future se décalent vers de plus grandes PS et MS et ce d'autant plus que le scénario de réchauffement est intense. La différence entre les scénarios de réchauffement est plus marquée pour la PS que la MS. Or cette dernière avait été considérée comme un indicateur plus en adéquation avec les observations météorologiques que la PS (section 5.3). Il est également important de noter que les fréquences sont extrêmement faibles et par conséquent, les différences entre les périodes et scénarios pourraient résulter du simple hasard, d'autant plus qu'une seule évolution plausible du climat a été utilisée. D'ailleurs, les fréquences calculées à partir du modèle CNRM (qui avait été écarté pour sa moins bonne concordance avec les observations météorologiques mais représente malgré tout une deuxième évolution plausible) sont bien différentes (Annexe 9 ; les résultats concernant les deux autres indicateurs étaient beaucoup plus en accord). Néanmoins, pour différentes raisons (test concernant plus de deux groupes, distributions hautement non normalement distribuées et asymétriques, valeurs non paires entre les périodes/scénarios), la différence statistique entre les périodes/scénarios pour la PS et la MS (et donc indirectement la fréquence) n'a pas été étudiée. De plus, dans le cas de la fréquence, le nombre d'évènements a été considéré comme trop faible. Par conséquent, il n'était pas attendu que le résultat des tests habituellement utilisés (même parmi les tests non-paramétriques) fournisse une réponse fiable, d'autant plus que les différences sont au moins supportées par l'analyse visuelle et que la significativité statistique a été testée pour les tendances dans la partie suivante.

5.5.2 Tendances jusqu'en 2100

Pour toutes les simulations dont les tendances concernant la date de dernière gelée sous la TL_{50} et sur la date de débourrement étaient significatives, l'avancement de la dernière gelée a été plus importante que l'avancement du débourrement, à une exception près (Figure 5.16). Les tendances de la dernière gelée et du débourrement sont globalement plus faibles selon le scénario RCP4.5 que le scénario RCP8.5. De plus, les tendances sont plus dispersées pour le scénario RCP8.5, témoignant d'une plus grande variabilité des deux tendances.

En regroupant les 5 sites, toutes les tendances de la période de sécurité PS_{TL} sont significativement positives, quels que soient l'espèce, le modèle ou le scénario (Figure 5.17). Les résultats pointent donc très clairement vers une diminution du risque de gelées tardives dans le futur. Les deux modèles s'accordent à simuler une tendance plus importante avec le scénario RCP8.5 qu'avec le RCP4.5, signifiant que la diminution du risque serait d'autant plus importante que le réchauffement sera grand. Globalement, les tendances simulées sont proches entre les deux modèles même si elles tendent à être plus importantes selon le modèle CNRM pour le scénario RCP8.5. Pour rappel, les modèles climatiques sont l'une des sources d'incertitude. Par conséquent, la cohérence entre le modèle CNRM et IPSL pointe vers une plus grande robustesse des résultats. Enfin, pour un modèle donné, les différences entre les deux scénarios sont les plus grandes pour *Fraxinus* et les plus faibles pour *Larix*. Cette différence est très certainement en lien avec les seuils de résistance respectifs et par conséquent la distribution des différents niveaux (intensités) de gelées entre les scénarios. Quand la résistance au gel des espèces augmente, les incertitudes sur l'évolution du risque issues des scénarios diminuent.

La distinction entre les sites révèle que certaines combinaisons site-espèce n'ont pas montré de tendance significative de la PS_{TL} , particulièrement selon le scénario RCP4.5 et le site d'Eupen (Figure 5.19). Il semblerait que la localisation et le modèle aient moins d'influence sur l'évolution de la PS_{TL} que le scénario. L'effet de l'espèce est quant à lui plus contrasté.

En regroupant les 5 sites, certaines tendances de la marge de sécurité MS_{TL} n'ont pas été significatives, particulièrement pour *Quercus* et le scénario RCP4.5 du modèle CNRM (Figure 5.18). Néanmoins, la direction du changement, c'est-à-dire une diminution du risque, est en accord avec la PS_{TL} . Là aussi, les deux modèles s'accordent à simuler une tendance plus importante avec le scénario RCP8.5 qu'avec le RCP4.5, à l'exception de *Quercus*. La différence entre les deux scénarios tend à être plus importante pour le modèle CNRM que le modèle IPSL.

La distinction entre les sites révèle que certaines tendances de la MS_{TL} ne sont pas significatives, particulièrement avec le scénario RCP4.5 du modèle CNRM pour toutes les espèces et avec ce même scénario et le modèle IPSL pour *Larix* (Figure 5.20). Tout comme pour la PS_{TL} , il semblerait que la localisation ait peu d'influence sur l'évolution de la MS_{TL} , contrairement au scénario. Cependant, l'effet du modèle est plus prononcé que pour la PS_{TL} .

Des validations précédemment réalisées (du module phénologique : section 5.1 et des modèles climatiques : section 5.3) résultait une confiance plus grande pour le chêne et le mélèze (par rapport au hêtre et au frêne) et pour la MS (par rapport à la PS). Dès lors, la diminution du risque de gelées tardives dans le futur pourrait être surestimée. En effet, pour les deux indicateurs, il n'est pas étonnant d'observer une diminution du risque plus forte pour *Fagus* et *Fraxinus*. Etant donné que le modèle phénologique manquait de sensibilité, l'avancement du débourrement a avancé moins rapidement pour ces deux espèces. D'ailleurs, les différences entre les espèces sont probablement plus en lien avec ce manque de sensibilité qu'avec leur comportement naturel et leur seuil de sensibilité. De plus, la MS a globalement montré des évolutions plus faibles et moins significatives, particulièrement pour le chêne et le mélèze.

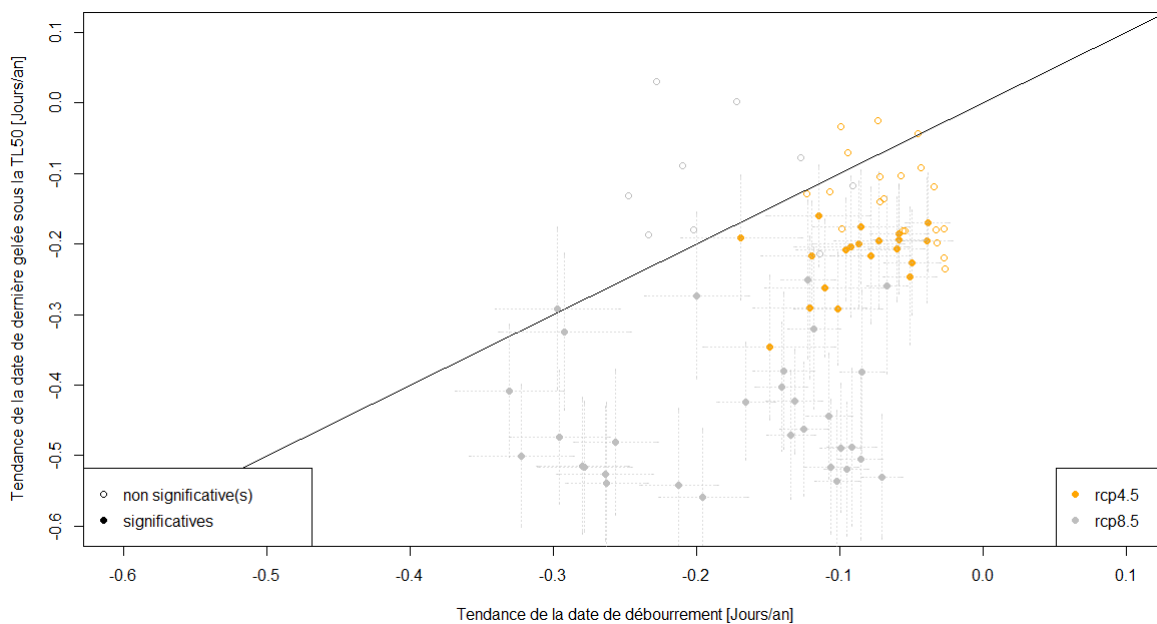


FIGURE 5.16 – Tendence de la date de débourrement [jours/an] et de la date de dernière gelée sous la TL_{50} [jours/an] sur la période 2006-2100 selon les scénarios RCP4.5 (orange) et RCP8.5 (gris) des modèles IPSL et CNRM. Chaque observation correspond à une combinaison site-espèce. Les cercles indiquent qu'au moins une des deux tendances était non significative (p -valeur > 0.05). Les points indiquent que les deux tendances étaient significatives (p -valeur < 0.05). Les droites pointillées représentent l'erreur standard de la régression.

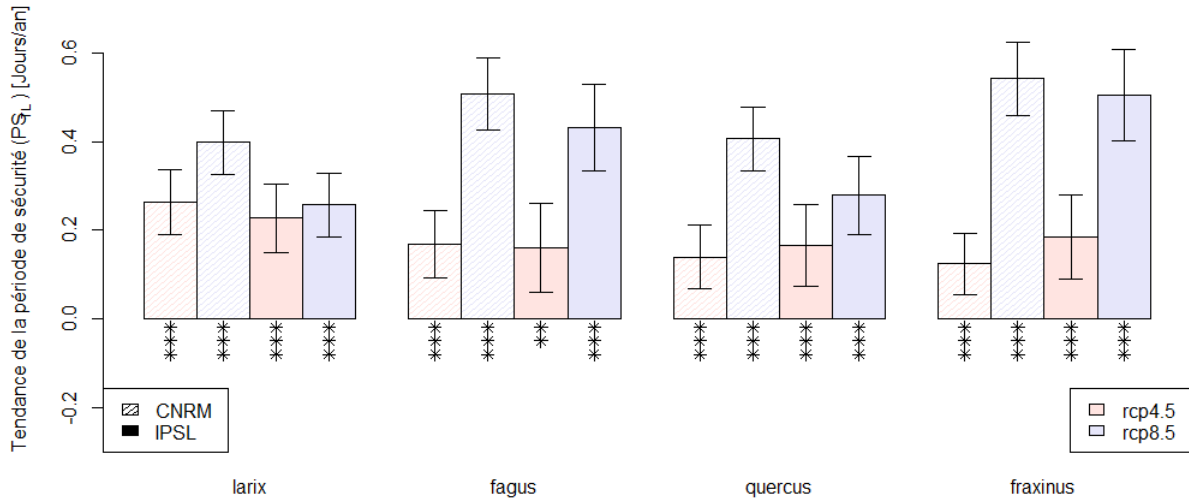


FIGURE 5.17 – Tendance de la période de sécurité (P_{STL}) [jours/an] (5 sites) sur la période 2006-2100 selon le modèle CNRM (hachuré sur fond blanc) et le modèle IPSL (fond coloré), selon les scénarios RCP4.5 (orange) et RCP8.5 (mauve). Les moustaches représentent l'intervalle de confiance à 95% (calculé comme étant $1.96 * l'$ erreur standard de la régression). Les étoiles indiquent le niveau de significativité : (p-valeur) $*** < 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05$. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

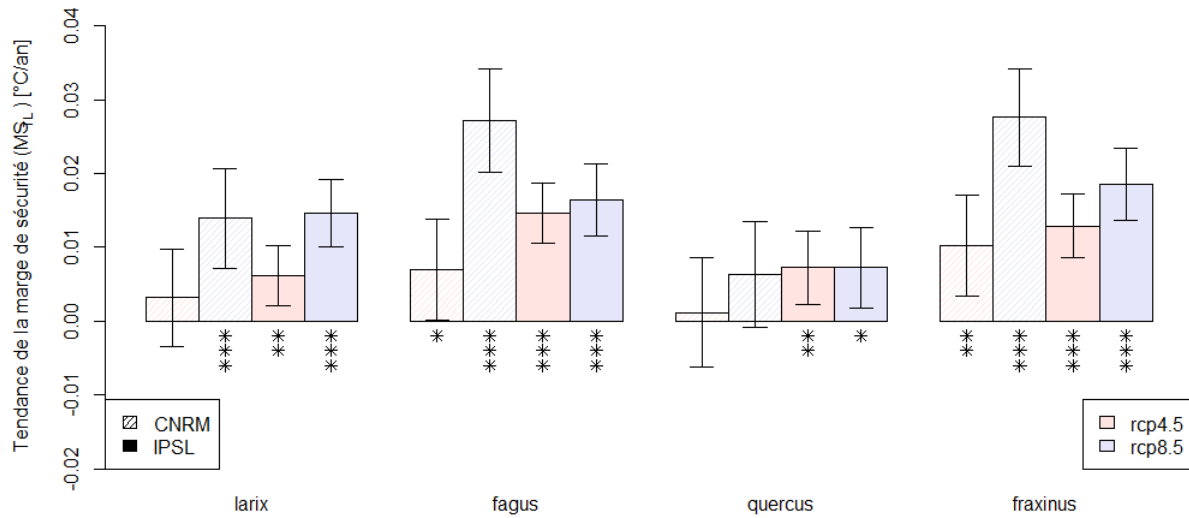


FIGURE 5.18 – Tendance de la marge de sécurité (M_{STL}) [°C/an] (5 sites) sur la période 2006-2100 selon le modèle CNRM (hachuré sur fond blanc) et le modèle IPSL (fond coloré), selon les scénarios RCP4.5 (orange) et RCP8.5 (mauve). Les moustaches représentent l'intervalle de confiance à 95% (calculé comme étant $1.96 * l'$ erreur standard de la régression). Les étoiles indiquent le niveau de significativité : (p-valeur) $*** < 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05$. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

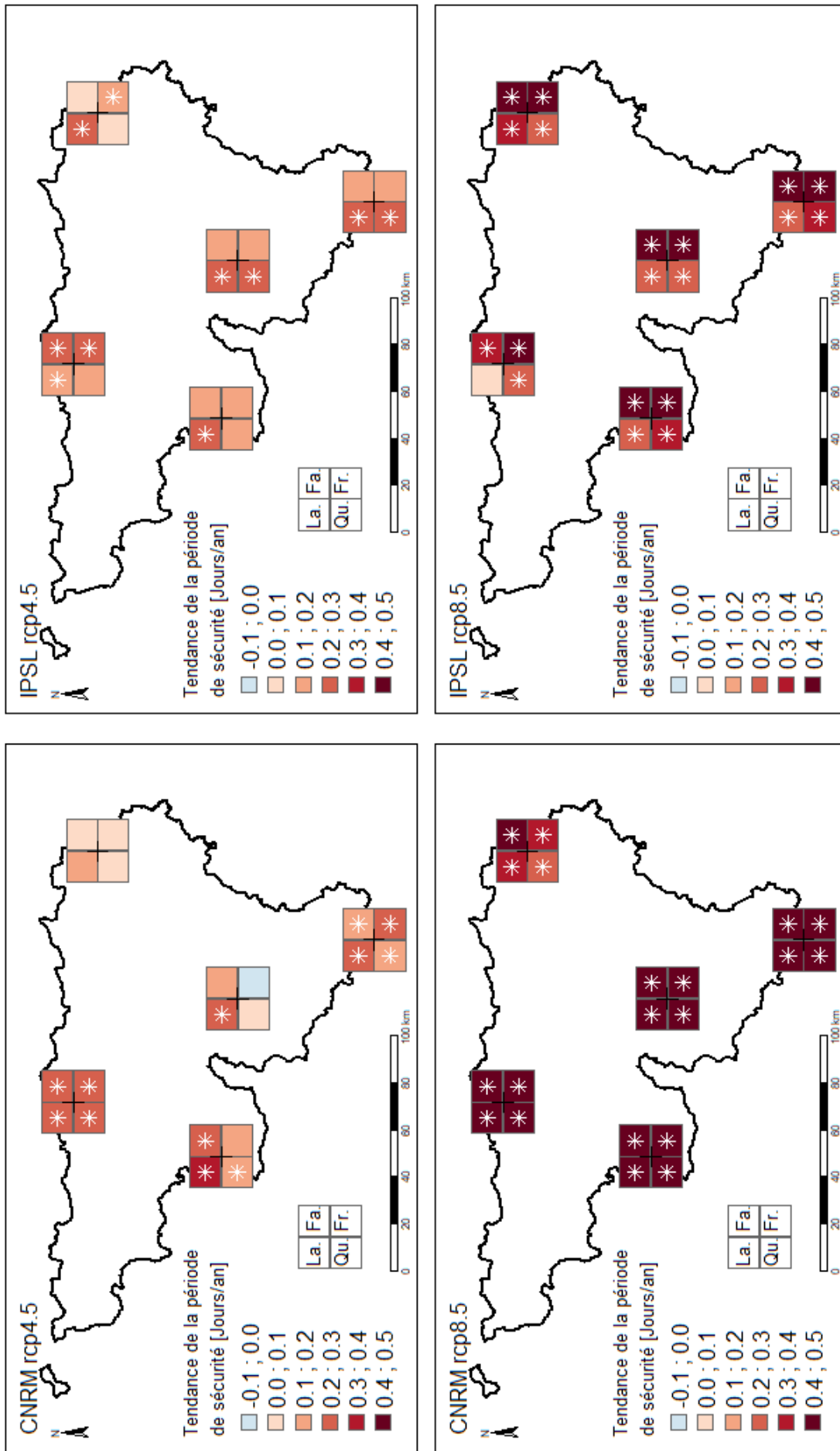


FIGURE 5.19 – Tendance de la période de sécurité (P_{STL}) [jours/an] pour les sites de Chimay, Eupen, LLN, Wellin et Virton sur la période 2006-2100 selon les modèles CNRM (gauche) et IPSL (droite) et selon les scénarios RCP4.5 (haut) et RCP8.5 (bas). Une étoile indique une tendance significative (p-valeur < 0.05). La. - *Larix Decidua*, Fa. - *Fagus Sylvatica*, Qu. - *Quercus petraea*, Fr. - *Fraxinus Excelsior*.

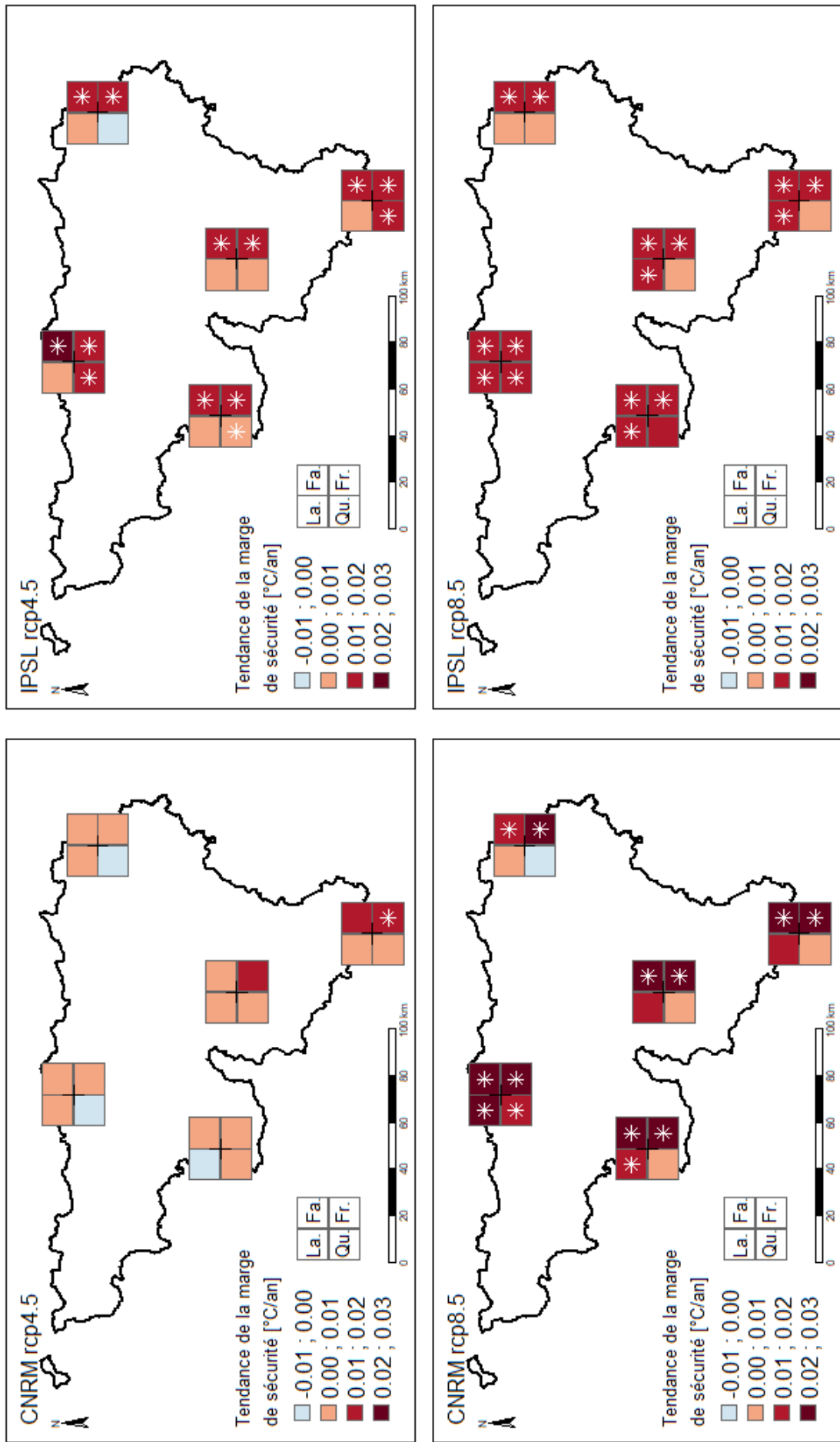


FIGURE 5.20 – Tendance de la marge de sécurité (MS_{TL}) [°C/an] pour les sites de Chimay, Eupen, LLN, Wellin et Virton sur la période 2006-2100 selon les modèles CNRM (gauche) et IPSL (droite) et selon les scénarios RCP4.5 (haut) et RCP8.5 (bas). Une étoile indique une tendance significative (p-valeur < 0.05). La. - *Larix Decidua*, Fa. - *Fagus Sylvatica*, Qu. - *Quercus petraea*, Fr. - *Fraxinus Excelsior*.

Finalement, il est important de rappeler que, comme tous les modèles, le module phénologique est imparfait, est incomplet et son application au futur repose sur l'hypothèse que le comportement de l'arbre face au réchauffement restera le même dans le futur (section 5.1). De plus, la capacité des modèles climatiques à représenter les événements extrêmes est elle aussi imparfaite, à en juger par la concordance avec les observations météorologiques (section 5.3). Néanmoins, malgré la persistance de ces incertitudes, il est intéressant de noter qu'aucune combinaison site-espèce-scénario-modèle-indicateur ne présente une tendance négative (qui pointerait vers une augmentation du risque) qui soit significative. Les tendances sont non significatives ou bien significativement positives. L'évènement étant déjà très rare actuellement, il devrait le rester ou l'être encore plus dans le futur. En Wallonie, ce genre d'évènements, lorsqu'ils ont lieu, sont très localisés. Il ne s'agit pas d'évènements généralisés qui touchent une vaste région (contrairement à d'autres régions du monde ; voir Gu et al., 2008). Par conséquent, ce genre d'évènements devrait rester très rare et localisé dans le futur. Même en considérant les nombreuses incertitudes, il est peu probable que le changement climatique ait un effet sur les gelées tardives dont la direction et l'amplitude devrait inquiéter les forestiers wallons. Enfin, bien que les évènements de gel tardif aient le potentiel d'affecter la croissance/productivité des forêts (Dittmar et al., 2006 ; Gu et al., 2008 ; Vanoni et al., 2016 ; Principe et al., 2017), en Wallonie, la rareté future de tels évènements ne devrait que très peu impacter l'augmentation de la productivité projetée par de Wergifosse et al. (2020b).

Conclusion

En conclusion, le module phénologique du modèle HETEROFOR s'est avéré très performant pour simuler le débourrement du chêne et du mélèze en Wallonie. Néanmoins, les résultats sont nettement moins bons dans le cas du hêtre (et probablement du frêne) dont le modèle manquait de sensibilité. Les principales hypothèses relatives à ces mauvais résultats concernent la qualité des données météorologiques spatialisées et le modèle phénologique en lui-même, qui pourrait être amélioré de diverses façons. Ensuite, une détermination de la sensibilité propre aux espèces face aux gelées tardives et cohérente avec la littérature a permis une distinction entre les espèces lors du calcul des indicateurs de gelées tardives. La validation des données climatiques a révélé que la fréquence est un indicateur peu efficace pour étudier le risque de gelées tardives étant donné le manque de concordance important dans son calcul à partir des différentes sources de données. Les deux autres indicateurs que sont la période et la marge de sécurité (PS_{TL} et MS_{TL}) sont plus concordants. En effet, bien qu'un biais important subsiste entre ces indicateurs calculés à partir des observations météorologiques locales et à partir des modèles climatiques, la caractéristique d'importance pour étudier le futur, c'est-à-dire la tendance est relativement bien représentée. Enfin, aucune adéquation rigoureuse entre des indicateurs de gelées tardives et des dégâts observés en conditions réelles n'a été trouvée. Néanmoins, il a été rappelé que le système d'observations des dégâts est imparfait et que les données météorologiques spatialisées n'ont pas la résolution suffisante pour étudier ce genre d'évènements très localisés. Par conséquent, ce résultat ne rejette pas pour autant l'efficacité de la méthodologie pour étudier l'évolution du risque de gelées tardives à l'échelle de la Wallonie.

Finalement, en ce qui concerne la question de recherche principale, même en considérant les nombreuses incertitudes, les résultats de ce mémoire pointent vers une diminution du risque de gelées tardives en forêt wallonne avec le changement climatique. C'est la seconde hypothèse (section 2.6), selon laquelle, dans le futur, l'avancement de la date de dernière gelée serait plus important que celui du débourrement, qui est retenue. Le facteur d'incertitude ayant le plus d'effet sur l'évolution du risque reste le scénario de réchauffement. La diminution du risque serait d'autant plus importante que le réchauffement sera grand. L'effet du modèle a été un peu plus marqué pour la MS_{TL} que pour la PS_{TL} . L'effet de l'espèce est relativement important mais est à considérer avec précaution car il est probablement en lien avec le manque de sensibilité concernant le modèle phénologique du hêtre et du frêne. Enfin, aucune combinaison site-espèce-scénario-modèle-indicateur ne présente une augmentation du risque qui soit significative. Les tendances sont non

significatives ou bien significativement positives (pointant vers une diminution du risque). La distinction des tendances entre les sites semble également indiquer que l'effet de la localisation sur l'évolution du risque est relativement faible en comparaison avec l'effet du scénario. Dans nos régions, les gelées tardives concernant les forêts sont et devraient rester des événements très rares et localisés dans le futur. Il est peu probable que le changement climatique ait un effet sur les gelées tardives dont la direction et l'amplitude devrait inquiéter les forestiers wallons.

Références

- Allen, C. D., Breshears, D. D., McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8), 1-55.
- Allstadt, A. J., Vavrus, S. J., Heglund, P. J., Pidgeon, A. M., Thogmartin, W. E., Radeloff, V. C. (2015). Spring plant phenology and false springs in the conterminous US during the 21st century. *Environmental Research Letters*, 10(10), 104008.
- Augsburger, C. K. (2009). Spring 2007 warmth and frost : phenology, damage and refoliation in a temperate deciduous forest. *Functional Ecology*, 23(6), 1031-1039.
- Augsburger, C. K. (2013). Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years : spring damage risk is increasing. *Ecology*, 94(1), 41-50.
- Basler, D., Körner, C. (2014). Photoperiod and temperature responses of bud swelling and bud burst in four temperate forest tree species. *Tree physiology*, 34(4), 377-388.
- Bauhus, J., Van der Meer, P., Kanninen, M. (2010). *Ecosystem goods and services from plantation forests*. Earthscan Forestry Library. London, UK, Earthscan. 240p ISBN : 9781849711685.
- Bigler, C., Bugmann, H. (2018). Climate-induced shifts in leaf unfolding and frost risk of European trees and shrubs. *Scientific Reports*, 8(1), 1-10.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change : forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449.
- Cannell, M. G. R., Smith, R. I. (1983). Thermal time, chill days and prediction of budburst in *Picea sitchensis*. *Journal of applied ecology*, 20, 951-963.
- Cannell, M. G. R., Smith, R. I. (1986). Climatic warming, spring budburst and forest damage on trees. *Journal of Applied Ecology*, 23, 177-191.
- Chamberlain, C. J., Cook, B. I., García de Cortázar-Atauri, I., Wolkovich, E. M. (2019). Rethinking false spring risk. *Global Change Biology*, 25(7), 2209-2220.
- Charrier, G., Chuine, I., Bonhomme, M. Améglio, T. (2018). Assessing frost damages using dynamic models in walnut trees : Exposure rather than vulnerability controls frost risks. *Plant, Cell Environment*, 41, 1008–1021.
- Chevin, L. M., Collins, S., Lefèvre, F. (2013). Phenotypic plasticity and evolutionary demographic responses to climate change : taking theory out to the field. *Functional Ecology*, 27(4), 967-979.

- Chmielewski, F.M., Rötzer, T. (2001). Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(2), 101–112.
- Chuine, I. (2000). A unified model for budburst of trees. *Journal of theoretical biology*, 207(3), 337-347.
- Chuine, I., Kramer, K., Hänninen, H. (2003). *Plant Development Models. Phenology : An Integrative Environmental Science*, 217-235.
- Chuine, I., Bonhomme, M., Legave, J. M., García de Cortázar Atauri, I., Charrier, G., Lacoite, A., Améglio, T. (2016). Can phenological models predict tree phenology accurately in the future? The unrevealed hurdle of endodormancy break. *Global Change Biology*, 22(10), 3444-3460.
- Chuine, I., Régnière, J. (2017). Process-based models of phenology for plants and animals. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 159-182.
- Dai, J., Wang, H., Ge, Q. (2013). The decreasing spring frost risks during the flowering period for woody plants in temperate area of eastern China over past 50 years. *Journal of Geographical Sciences*, 23(4), 641-652.
- Day, W. R. (1951). The susceptibility to injury by experimental freezing of strains of European larch (*Larix decidua* Mill.) of varying geographical origin. *Forestry : An International Journal of Forest Research*, 24(1), 39-56.
- de Wergifosse, L. (2021). *Simulating Tree Growth Response to Climate Change in Structurally-complex Oak and Beech Stands Across Europe*. UCLouvain, Louvain-la-Neuve.
- de Wergifosse, L., André, F., Beudez, N., de Coligny, F., Goosse, H., Jonard, F., Ponette, Q., Titeux, H., Vincke, C. Jonard, M. (2020a). HETEROFOR 1.0 : a spatially explicit model for exploring the response of structurally complex forests to uncertain future conditions–Part 2 : Phenology and water cycle. *Geoscientific Model Development*, 13(3), 1459-1498.
- de Wergifosse, L., André, F., Goosse, H., Caluwaerts, S., de Cruz, L., de Troch, R., ... Jonard, M. (2020b). CO2 fertilization, transpiration deficit and vegetation period drive the response of mixed broad-leaved forests to a changing climate in Wallonia. *Annals of Forest Science*, 77(3), 1-23.
- de Wergifosse, L., André, F., Goosse, H., Boczon, A., Cecchini, S., Ciceu, A., ... Jonard, M. (2022). Simulating tree growth response to climate change in structurally diverse oak and beech forests. *Science of the total environment*, 806, 150422.
- Dittmar, C., Fricke, W., Elling, W. (2006). Impact of late frost events on radial growth of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Southern Germany. *European Journal of Forest Research*, 125(3), 249-259.
- Ducousso, A., Guyon, J. P., Kremer, A. (1996). Latitudinal and altitudinal variation of bud burst in western populations of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt) Liebl). *Annals of forest science*, 53, 775-782
- Dufour-Kowalski, S., Courbaud, B., Dreyfus, P., Meredieu, C., De Coligny, F. (2012). Capsis : an open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of forest science*, 69(2), 221-233.
- Dufresne, J. L., Foujols, M. A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., ... Vuichard, N. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model : from CMIP3 to CMIP5. *Climate dynamics*, 40(9), 2123-2165.

- Duputié, A., Rutschmann, A., Ronce, O., Chuine, I. (2015). Phenological plasticity will not help all species adapt to climate change. *Global change biology*, 21(8), 3062-3073.
- Estiarte, M., Peñuelas, J. (2015). Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change : effects on nutrient proficiency. *Global change biology*, 21(3), 1005-1017.
- Fu, Y. H., Piao, S., Op de Beeck, M., Cong, N., Zhao, H., Zhang, Y., ... Janssens, I. A. (2014). Recent spring phenology shifts in western Central Europe based on multiscale observations. *Global ecology and biogeography*, 23(11), 1255-1263.
- Fu, Y. H., Zhao, H., Piao, S., Peaucelle, M., Peng, S., Zhou, G., ... Janssens, I. A. (2015). Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 526(7571), 104-107.
- Franks, S. J., Weber, J. J., Aitken, S. N. (2014). Evolutionary and plastic responses to climate change in terrestrial plant populations. *Evolutionary applications*, 7(1), 123-139.
- Gamfeldt, L., Snäll, T., Bagchi, R., Jonsson, M., Gustafsson, L., Kjellander, P., ... Bengtsson, J. (2013). Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature communications*, 4(1), 1-8.
- Giot, O., Termonia, P., Degrauwe, D., De Troch, R., Caluwaerts, S., Smet, G., ... Van Schaeybroeck, B. (2016). Validation of the ALARO-0 model within the EURO-CORDEX framework. *Geoscientific Model Development*, 9(3), 1143-1152.
- Goosse, H. (2015). *Climate system dynamics and modeling*. Cambridge University Press.
- Gu, L., Hanson, P. J., Post, W. M., Kaiser, D. P., Yang, B., Nemani, R., ... Meyers, T. (2008). The 2007 eastern US spring freeze : increased cold damage in a warming world?. *BioScience*, 58(3), 253-262.
- Hänninen, H. (1990). Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions, *Acta For. Fenn.*, 213, 1-47.
- Hänninen, H. (1991). Does climatic warming increase the risk of frost damage in northern trees?. *Plant, Cell Environment*, 14(5), 449-454.
- Hawkins, E., Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), 1095-1108.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Hofmann, M., Durka, W., Liesebach, M., Bruelheide, H. (2015). Intraspecific variability in frost hardiness of *Fagus sylvatica* L. *European Journal of forest research*, 134(3), 433-441.
- 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. *Global Change Biology*, 18(7), 2365-2377.
- Inouye, D. W. (2000). The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecology letters*, 3(5), 457-463.

- Institut Royal Météorologique (IRM). (2018). Observational gridded data products in Belgium. Unpublished data, directly provided by IRM.
- IPCC, 2021 : Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX : new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14(2), 563-578.
- Jacob, D., Kotova, L., Teichmann, C., Sobolowski, S. P., Vautard, R., Donnelly, C., ... van Vliet, M. T. (2018). Climate impacts in Europe under+ 1.5 C global warming. *Earth's Future*, 6(2), 264-285.
- Jeong, S. J., Ho, C. H., Gim, H. J., Brown, M. E. (2011). Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008. *Global change biology*, 17(7), 2385-2399.
- Jonard, M., André, F., de Coligny, F., de Wergifosse, L., Beudez, N., Davi, H., Ligot, G., Ponette, Q., Vincke, C. (2020). HETEROFOR 1.0 : a spatially explicit model for exploring the response of structurally complex forests to uncertain future conditions—Part 1 : Carbon fluxes and tree dimensional growth. *Geoscientific Model Development*, 13(3), 905-935.
- Kollas, C., Körner, C., Randin, C. F. (2014). Spring frost and growing season length co control the cold range limits of broad leaved trees. *Journal of Biogeography*, 41(4), 773-783.
- Kramer, K. (1994). A modelling analysis of the effects of climatic warming on the probability of spring frost damage to tree species in The Netherlands and Germany. *Plant, Cell and Environment*, 17(4), 367-377.
- Kramer, K. (1996). Phenology and growth of European trees in relation to climate change. PhD thesis, Institute for Forestry and Nature Research in Wageningen, The Netherlands.
- Kreyling, J., Thiel, D., Nagy, L., Jentsch, A., Huber, G., Konnert, M., Beierkuhnlein, C. (2012). Late frost sensitivity of juvenile *Fagus sylvatica* L. differs between southern Germany and Bulgaria and depends on preceding air temperature. *European Journal of Forest Research*, 131(3), 717-725.
- Lang, G. A. (1987). Dormancy : a new universal terminology. *HortScience.*, 25, 817-820.
- Lang, G. A., Early, J., Martin, G. C., Darnell, R. L. (1987). Endo-, para-, and ecodormancy : physiological terminology and classification for dormancy research. *HortScience*, 22(3), 371-377.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., ... Zheng, B. (2018). Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data*, 10(4), 2141-2194.
- Lenz, A., Hoch, G., Vitasse, Y., Körner, C. (2013). European deciduous trees exhibit similar safety margins against damage by spring freeze events along elevational gradients. *New Phytologist*, 200(4), 1166-1175.
- 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.
- Le Roux, R., De Resseguier, L., Corpetti, T., Jégou, N., Madelin, M., Van Leeuwen, C., Quénot, H. (2017). Comparison of two fine scale spatial models for mapping temperatures inside winegrowing

- areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 159-169.
- Leuning, R., Cremer, K. W. (1988). Leaf temperatures during radiation frost Part I. Observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42(2-3), 121-133.
- Leuschner, C., Ellenberg, H. (2017). Abiotic conditions, flora, ecosystem functions and recent human influence. In *Ecology of Central European Forests* (pp. 119-347). Springer.
- Liepe, K. (1993). Growth-chamber trial on frost hardiness and field trial on flushing of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl). *Ann Sci For*, 50, 208s-214s
- Lieth, H. (1974). Purposes of a phenology book. In *Phenology and seasonality modeling* (pp. 3-19). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Lindkvist, L., Gustavsson, T., Bogren, J. (2000). A frost assessment method for mountainous areas. *Agricultural and forest meteorology*, 102(1), 51-67.
- Linkosalo, T., Carter, T. R., Häkkinen, R., Hari, P. (2000). Predicting spring phenology and frost damage risk of *Betula* spp. under climatic warming : a comparison of two models. *Tree Physiology*, 20(17), 1175-1182.
- Linkosalo, T., Lappalainen, H. K., Hari, P. (2008). A comparison of phenological models of leaf bud burst and flowering of boreal trees using independent observations. *Tree physiology*, 28(12), 1873-1882.
- Liu, Q., Piao, S., Janssens, I. A., Fu, Y., Peng, S., Lian, X., Ciais P., Ranga B., Myneni, J. Wang, T. (2018). Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. *Nature communications*, 9(1), 1-8.
- Liu, Q., Piao, S., Fu, Y. H., Gao, M., Peñuelas, J., Janssens, I. A. (2019). Climatic warming increases spatial synchrony in spring vegetation phenology across the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 46(3), 1641-1650.
- Ma, Q., Huang, J. G., Hänninen, H., Berninger, F. (2019). Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming. *Global change biology*, 25(1), 351-360.
- Maraun, D. and Widmann, M. (2018). *Statistical downscaling and bias correction for climate research*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Marino, G. P., Kaiser, D. P., Gu, L., Ricciuto, D. M. (2011). Reconstruction of false spring occurrences over the southeastern United States, 1901–2007 : an increasing risk of spring freeze damage?. *Environmental Research Letters*, 6(2), 024015.
- Martin, M., Gavazov, K., Koerner, C., Haettenschwiler, S., Rixen, C. (2010). Reduced early growing season freezing resistance in alpine treeline plants under elevated atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 16(3), 1057-1070.
- Mayer, H., König, C., Rall, A. (1988). Identifikation von Witterungsereignissen mit pflanzenphysiologischer Streßwirkung für Waldbäume. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 107(1), 131-140.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., ... Zust, A. N. A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global change biology*, 12(10), 1969-1976.

- Mina, M., Bugmann, H., Cordonnier, T., Irauschek, F., Klopčič, M., Pardos, M., Cailleret, M. (2017). Future ecosystem services from European mountain forests under climate change. *Journal of Applied Ecology*, 54(2), 389-401.
- Miura, S., Amacher, M., Hofer, T., San-Miguel-Ayanz, J., Thackway, R. (2015). Protective functions and ecosystem services of global forests in the past quarter-century. *Forest Ecology and Management*, 352, 35-46.
- Mori, A. S. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forests : management and restoration founded on ecological theory. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 7-11.
- Muffler, L., Beierkuhnlein, C., Aas, G., Jentsch, A., Schweiger, A. H., Zohner, C., Kreyling, J. (2016). Distribution ranges and spring phenology explain late frost sensitivity in 170 woody plants from the Northern Hemisphere. *Global Ecology and Biogeography*, 25(9), 1061-1071.
- Murray, M. B., Cannell, M. G. R., Smith, R. I. (1989). Date of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming. *Journal of Applied Ecology*, 26, 693-700.
- Nicholls, N. and Alexander, L. (2007). Has the climate become more variable or extreme? Progress 1992-2006. *Progress in Physical Geography*, 31(1), 77-87.
- Ningre, F. and Colin, F. (2007). Frost damage on the terminal shoot as a risk factor of fork incidence on common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science*, 64(1), 79-86.
- Observatoire Wallon de la Santé des Forêts (OWSF) et SPW ARNE-DEMNA-DMF. (2022a). Observations des dates de débourrement en Wallonie entre 2011 et 2021. Données non publiées, directement fournies par l'OWSF.
- Observatoire Wallon de la Santé des Forêts (OWSF) et SPW ARNE-DEMNA-DMF. (2022b). Observations de dégâts par le gel en Wallonie entre 2011 et 2021. Données non publiées, directement fournies par l'OWSF.
- Parmesan, C., Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37-42.
- Peñuelas, J., Rutishauser, T., Filella, I. (2009). Phenology feedbacks on climate change. *Science*, 324(5929), 887-888.
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I. A., Fu, Y., Dai, J., ... Zhu, X. (2019). Plant phenology and global climate change : Current progresses and challenges. *Global change biology*, 25(6), 1922-1940.
- Príncipe, A., van der Maaten, E., van der Maaten-Theunissen, M., Struwe, T., Wilmking, M., Kreyling, J. (2017). Low resistance but high resilience in growth of a major deciduous forest tree (*Fagus sylvatica* L.) in response to late spring frost in southern Germany. *Trees*, 31(2), 743-751.
- Reaumur, R. D. (1735). Observation du thermometer, faites à Paris pendant l'année 1735, compares avec celles qui ont été faites sous la ligne, à l'Isle de France, à Alger et en quelques-unes de nos isles de l'Amérique. Paris : Mémoires de l'Académie des Sciences, 1735.
- Ricke, K. L. and Caldeira, K. (2014). Maximum warming occurs about one decade after a carbon dioxide emission. *Environmental Research Letters*, 9(12), 124002.
- Rigby, J. R. and Porporato, A. (2008). Spring frost risk in a changing climate. *Geophysical Research Letters*, 35(12), p. L12703

Sakai, A. and Larcher, W. (1987). Frost survival of plants : responses and adaptation to freezing stress. Springer-Verlag, Berlin. 321 pp.

Samuelsson, P., Jones, C. G., Willén, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U. L. F., ... Wyser, K. (2011). The Rossby Centre Regional Climate model RCA3 : model description and performance. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63(1), 4-23.

Sarvas, R. (1974). Investigations on the annual cycle of development of forest trees. II. Autumn dormancy and winter dormancy. *Commun. Instituti For. Fenn.*, 84, 1–101.

Savolainen, O., Bokma, F., García-Gil, R., Komulainen, P., Repo, T. (2004). Genetic variation in cessation of growth and frost hardiness and consequences for adaptation of *Pinus sylvestris* to climatic changes. *Forest Ecology and Management*, 197(1-3), 79-89.

Saxe, H., Cannell, M. G., Johnsen, Ø., Ryan, M. G., Vourlitis, G. (2001). Tree and forest functioning in response to global warming. *New phytologist*, 149(3), 369-399.

Scheifinger, H., Menzel, A., Koch, E., Peter, C. (2003). Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 74(1), 41-51.

Schwartz, M. D., Ahas, R., Aasa, A. (2006). Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global change biology*, 12(2), 343-351.

Schwartz, M. D., Hanes, J. M. (2010). Continental scale phenology : warming and chilling. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1595-1598.

Seneviratne, S.I., Nicholls, D., Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera, and X. Zhang, 2012 : Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In : *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.

Service public de Wallonie (SPW). (2015). Géoportail de la Wallonie. Carte bioclimatique de Wallonie (BIOCLIM). <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/9d18f60b-9652-4c5c-bcc2-01560224eccc.html>. Consulté le 9 Avril 2022.

Stöckli, R. and Vidale, P. L. (2004). European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 25(17), 3303-3330.

Tang, J., Körner, C., Muraoka, H., Piao, S., Shen, M., Thackeray, S. J., Yang, X. (2016). Emerging opportunities and challenges in phenology : a review. *Ecosphere*, 7(8), e01436.

Taschler, D., Beikircher, B., Neuner, G. (2004). Frost resistance and ice nucleation in leaves of five woody timberline species measured in situ during shoot expansion. *Tree Physiology*, 24(3), 331-337.

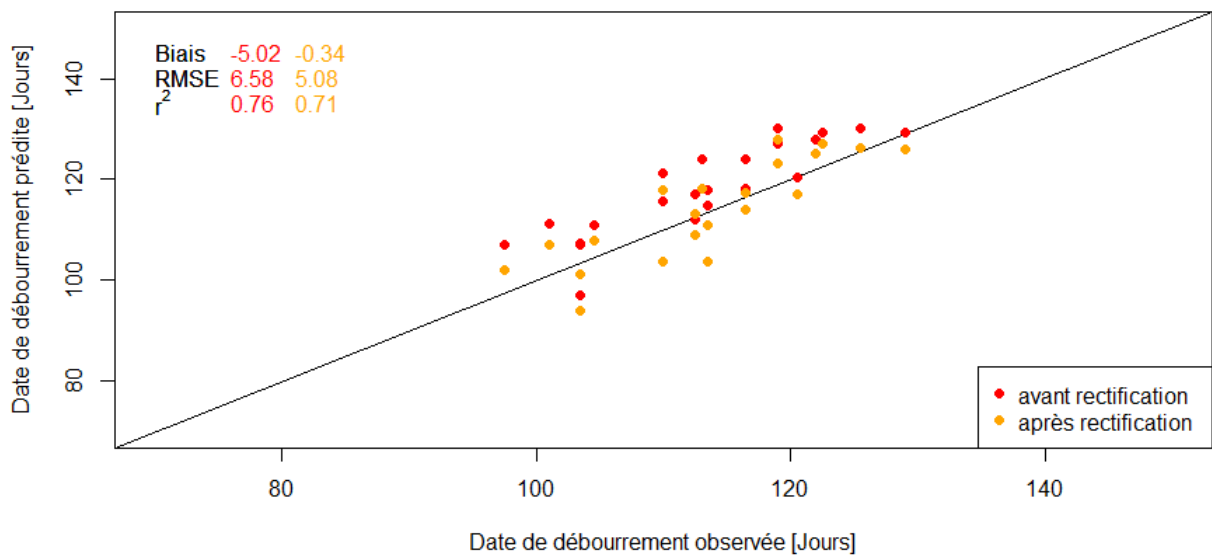
- Teskey, R., Wertin, T., Bauweraerts, I., Ameye, M., McGuire, M. A., Steppe, K. (2015). Responses of tree species to heat waves and extreme heat events. *Plant, cell and environment*, 38(9), 1699-1712.
- Till, O. (1956). Über die frosthärte von pflanzen sommergrüner laubwälder. *Flora Oder Allgemeine Botanische Zeitung*, 143(4), 499-542.
- Van der Perre, R., Bythell, S., Bogaert, P., Claessens, H., Ridremont, F., Tricot, C., Vincke, C. Ponette, Q. (2015). La carte bioclimatique de Wallonie : un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières. *Forêt. Nature*, 135, 47-58.
- Vanoni, M., Bugmann, H., Nötzli, M., Bigler, C. (2016). Drought and frost contribute to abrupt growth decreases before tree mortality in nine temperate tree species. *Forest Ecology and Management*, 382, 51-63.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways : an overview. *Climatic change*, 109(1), 5-31.
- Vitasse, Y. and Basler, D. (2013). What role for photoperiod in the bud burst phenology of European beech. *European Journal of Forest Research*, 132(1), 1-8.
- Vitasse, Y., Lenz, A., Hoch, G., Körner, C. (2014a). Earlier leaf out rather than difference in freezing resistance puts juvenile trees at greater risk of damage than adult trees. *Journal of Ecology*, 102(4), 981-988.
- Vitasse, Y., Lenz, A., Körner, C. (2014b). The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees. *Frontiers in Plant Science*, 5, 541.
- 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.
- Vitra, A., Lenz, A., Vitasse, Y. (2017). Frost hardening and dehardening potential in temperate trees from winter to budburst. *New Phytologist*, 216(1), 113-123.
- Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., ... Chauvin, F. (2013). The CNRM-CM5. 1 global climate model : description and basic evaluation. *Climate dynamics*, 40(9), 2091-2121.
- Walther, G. R. (2003). Plants in a warmer world. *Perspectives in plant ecology, evolution and systematics*, 6(3), 169-185.
- Williams, S. E., Shoo, L. P., Isaac, J. L., Hoffmann, A. A., Langham, G. (2008). Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS biology*, 6(12), e325.
- Willmott, C. J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. In *Spatial*

statistics and models (pp. 442-460). Springer, Dordrecht.

Zhu, L., Meng, J., Li, F., You, N. (2019). Predicting the patterns of change in spring onset and false springs in China during the twenty-first century. *International journal of biometeorology*, 63(5), 591-606.

Zohner, C. M., Benito, B. M., Svenning, J. C., Renner, S. S. (2016). Day length unlikely to constrain climate-driven shifts in leaf-out times of northern woody plants. *Nature Climate Change*, 6(12), 1120-1123.

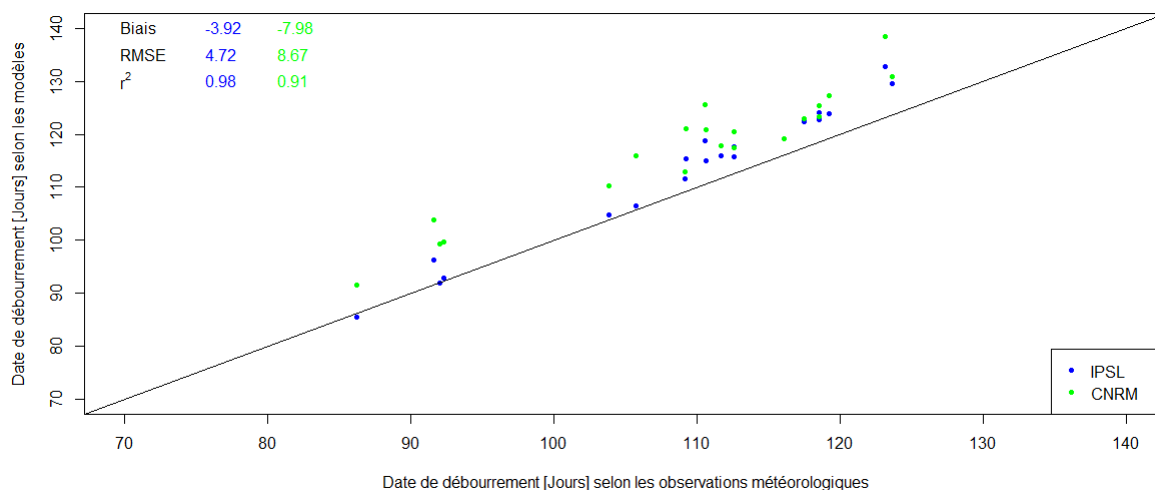
Annexes



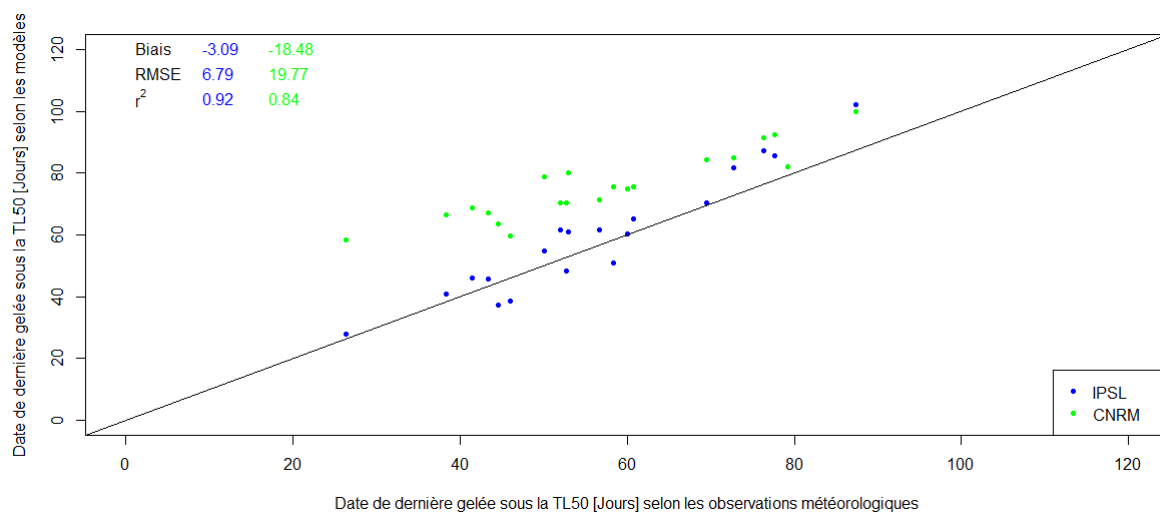
ANNEXE 1 – Comparaison entre la date de débourrement observée et la date de débourrement prédite [jours], pour le chêne, avant et après rectification de la calibration. La qualité des prévisions est indiquée par le biais, la RMSE et le r^2 .

a) Erreur absolue						b) Erreur absolue					
	larix	fagus	quercus	fraxinus	moyenne		larix	fagus	quercus	fraxinus	moyenne
Date de débourrement [Jours]						Date de débourrement [Jours]					
Chimay	0.16	3.29	4.45	4.19	3.02	Chimay	7.26	4.98	10.29	4.71	6.81
Eupen	0.83	4.70	9.69	6.03	5.31	Eupen	10.14	8.01	15.27	7.24	10.16
LLN	0.73	2.48	1.04	3.01	1.81	LLN	5.43	3.69	6.46	3.16	4.68
Virton	0.65	4.19	6.17	4.92	3.98	Virton	7.44	6.09	11.85	5.55	7.73
Wellin	4.66	5.14	8.29	5.50	5.90	Wellin	12.24	7.93	14.98	6.92	10.52
moyenne	1.41	3.96	5.93	4.73	4.00	moyenne	8.50	6.14	11.77	5.52	7.98
Date de dernière gelée [Jours]						Date de dernière gelée [Jours]					
Chimay	7.39	4.31	7.46	2.75	5.48	Chimay	19.03	14.78	17.28	2.80	13.47
Eupen	0.26	7.93	0.71	14.71	5.90	Eupen	14.95	14.88	14.77	12.49	14.27
LLN	1.65	2.44	2.38	9.42	3.97	LLN	32.12	23.65	28.02	18.21	25.50
Virton	7.42	4.82	4.38	8.93	6.39	Virton	13.58	14.77	17.67	12.25	14.57
Wellin	4.45	7.94	4.74	11.02	7.04	Wellin	27.18	27.21	28.79	15.12	24.58
moyenne	4.23	5.49	3.93	9.37	5.76	moyenne	21.37	19.06	21.31	12.17	18.48
Période de sécurité [Jours]						Période de sécurité [Jours]					
Chimay	7.23	1.01	11.91	1.44	5.40	Chimay	11.77	9.80	6.98	1.91	7.62
Eupen	0.57	3.23	8.98	8.67	5.36	Eupen	4.80	6.87	0.51	5.25	4.36
LLN	2.38	0.04	1.34	6.42	2.54	LLN	26.69	19.96	21.55	15.05	20.81
Virton	8.07	0.63	10.55	4.01	5.82	Virton	6.14	8.68	5.82	6.70	6.84
Wellin	0.22	2.81	3.55	5.52	3.02	Wellin	14.94	19.28	13.82	8.20	14.06
moyenne	3.69	1.54	7.27	5.21	4.43	moyenne	12.87	12.92	9.74	7.42	10.74
Marge de sécurité [°C]						Marge de sécurité [°C]					
Chimay	0.72	1.35	1.16	1.61	1.21	Chimay	1.02	1.72	2.69	2.07	1.88
Eupen	1.07	1.49	0.30	0.88	0.94	Eupen	0.41	0.91	2.44	0.96	1.18
LLN	1.04	1.92	1.88	2.46	1.82	LLN	0.58	0.73	1.17	0.95	0.86
Virton	1.22	2.11	1.22	2.13	1.67	Virton	0.29	1.42	2.41	2.13	1.56
Wellin	0.96	1.85	1.39	2.23	1.61	Wellin	0.44	0.95	2.54	1.55	1.37
moyenne	1.00	1.74	1.19	1.86	1.45	moyenne	0.55	1.15	2.25	1.53	1.37

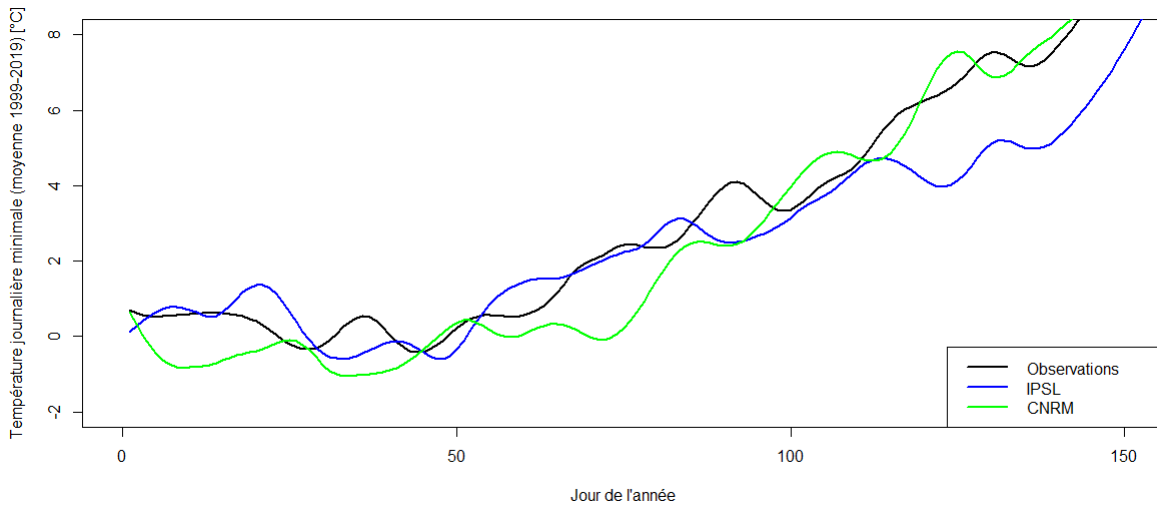
ANNEXE 2 – Erreur absolue entre les observations météorologiques et a) le modèle IPSL, b) le modèle CNRM pour la date de débourrement [jours], la date de dernière gelée sous la TL_{50} [jours], la période de sécurité ($PSTL$) [jours] et la marge de sécurité ($MSTL$) [°C]. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.



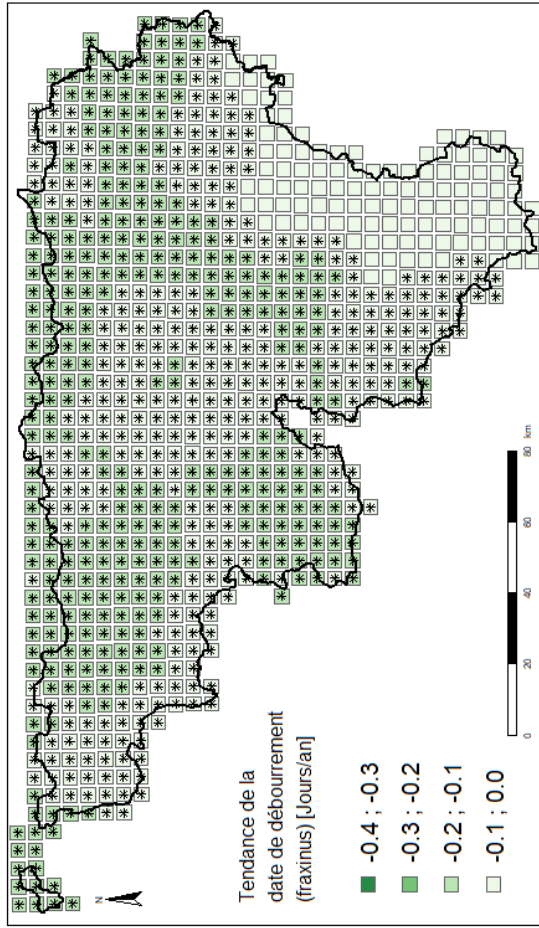
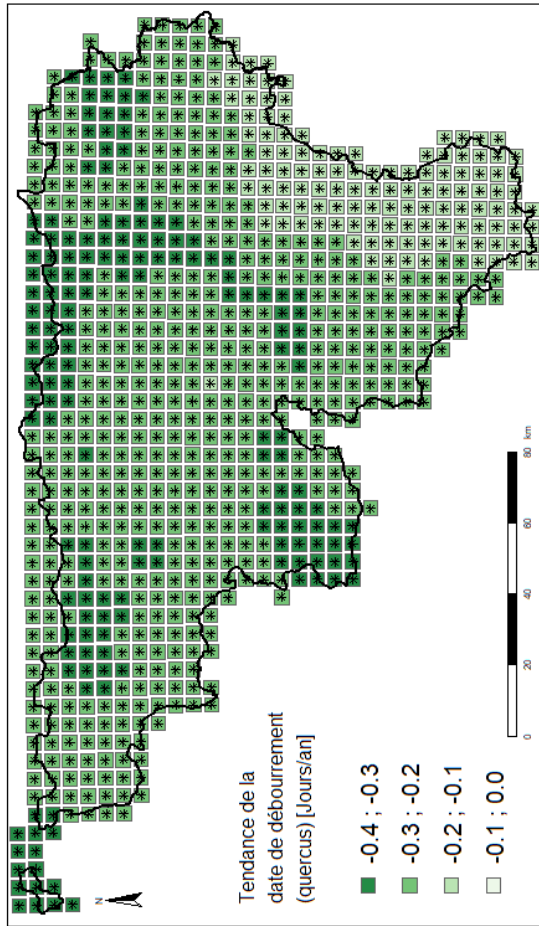
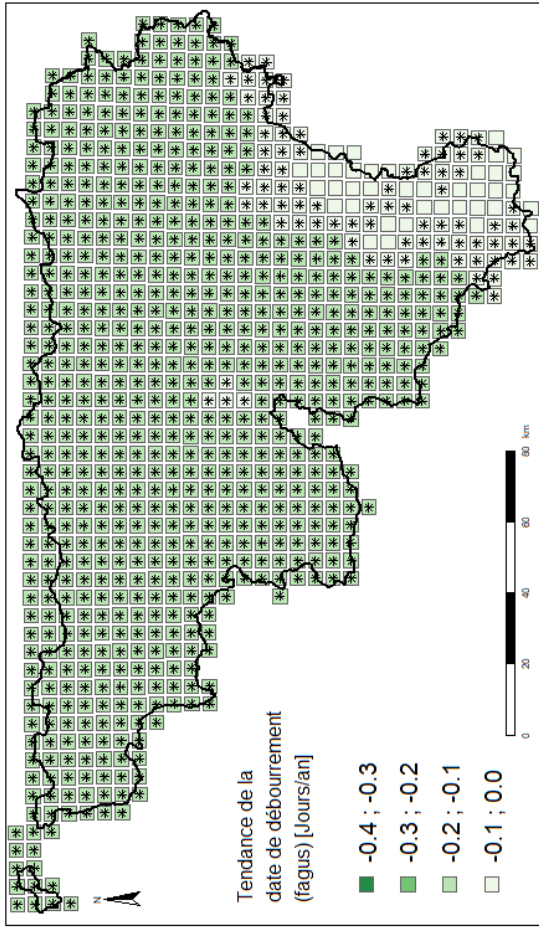
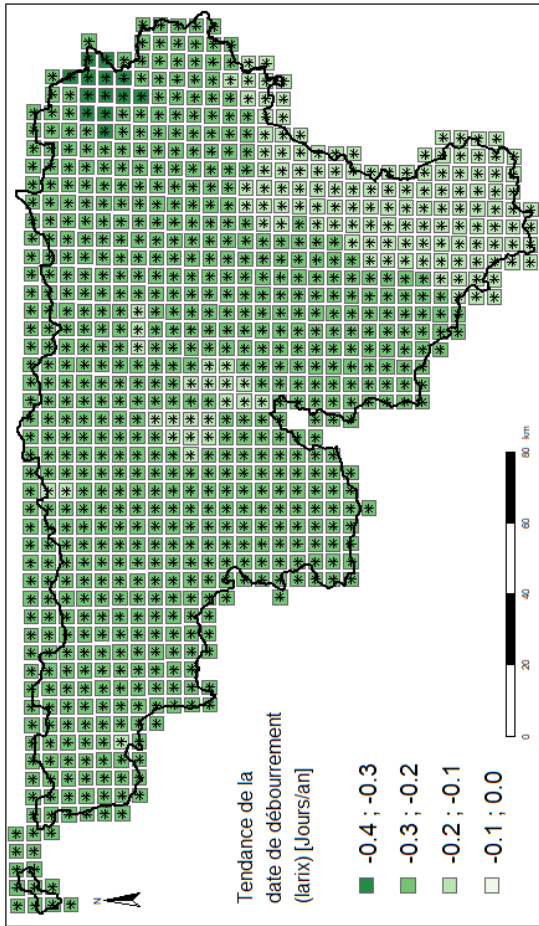
ANNEXE 3 – Comparaison entre la date de débourrement [jours] calculée selon les observations météorologiques et celle calculée selon les modèles climatiques IPSL (bleu) et CNRM (vert). La concordance entre les sources de données est indiquée par le biais, la RMSE et le r^2 .



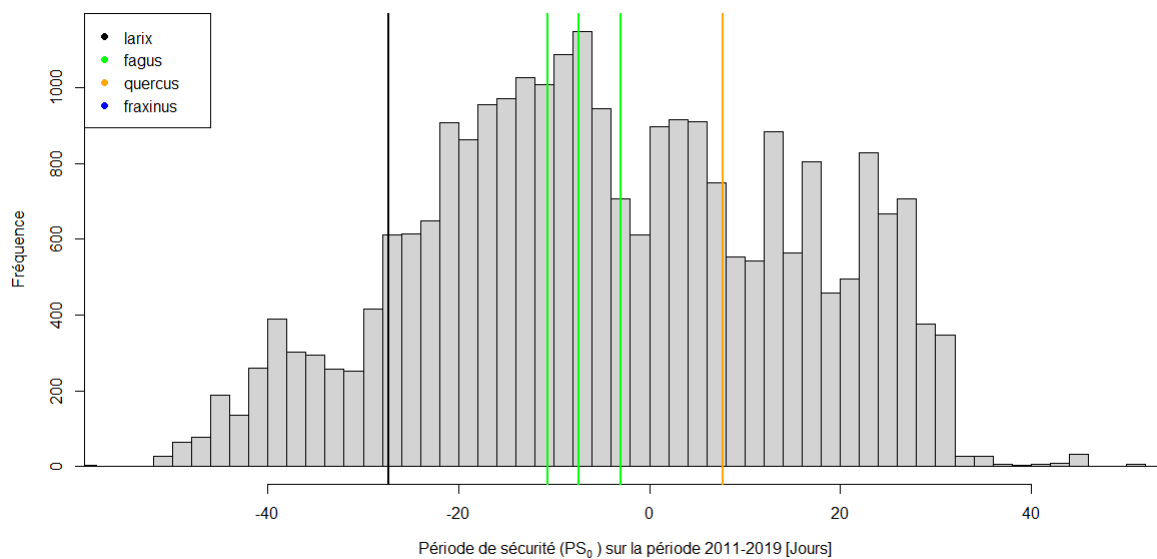
ANNEXE 4 – Comparaison entre la date de dernière gelée sous la TL_{50} [jours] selon les observations météorologiques et celle calculée selon les modèles climatiques IPSL (bleu) et CNRM (vert). La concordance entre les sources de données est indiquée par le biais, la RMSE et le r^2 .



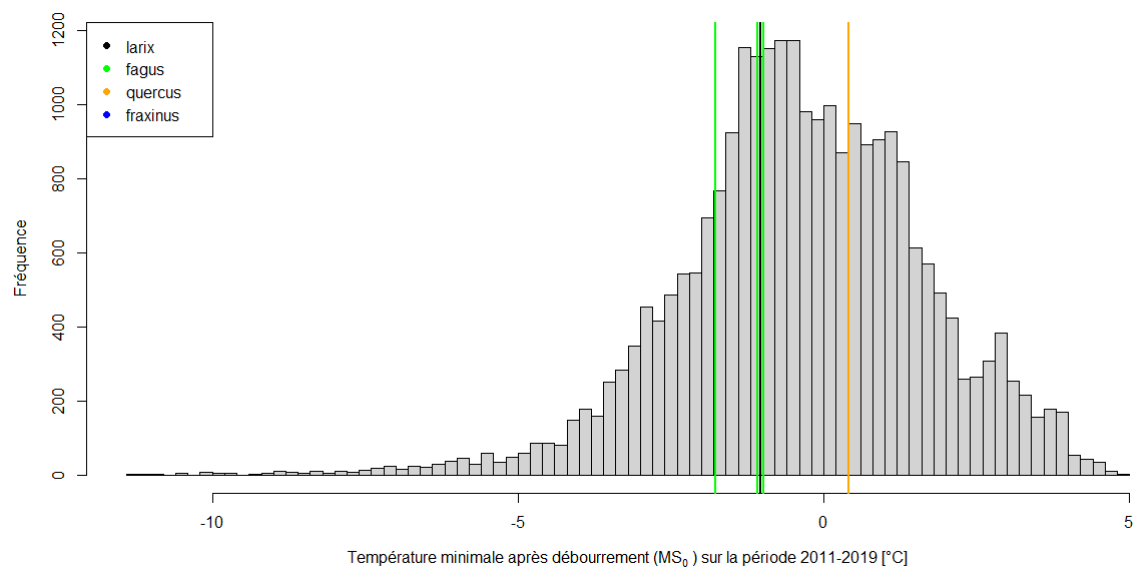
ANNEXE 5 – Température minimale moyennée sur la période 1999-2019 [°C] pour le site de Chimay selon les observations météorologiques (noir), le modèle IPSL (bleu) et le modèle CNRM (vert).



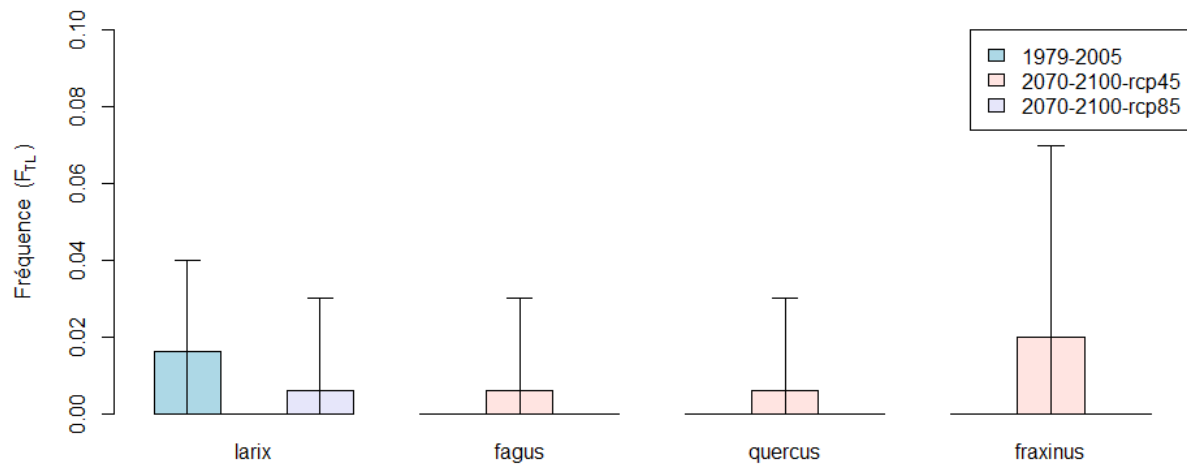
ANNEXE 6 – Tendance de la date de débournement [jours/an] sur la période 1961-2019. Une étoile indique une tendance significative (p-valeur < 0.05). Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.



ANNEXE 7 – Distribution de la période de sécurité (PS_0) sur la période 2011-2019 [jours]. La position des droites verticales indique la valeur de l'indicateur calculée pour un site et l'année où des dégâts ont été observés. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.



ANNEXE 8 – Distribution de température minimale après débournement (marge de sécurité MS_0) sur la période 2011-2019 [°C]. La position des droites verticales indique la valeur de l'indicateur calculée pour un site et l'année où des dégâts ont été observés. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.



ANNEXE 9 – Fréquence de gelées tardives (F_{TL}) moyennée sur les 5 sites pour la période historique (1979-2005) et la période future (2070-2100) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (modèle CNRM). Les extrémités des moustaches indiquent le maximum parmi les cinq sites. Larix - mélèze, Fagus - hêtre, Quercus - chêne, Fraxinus - frêne.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des sciences

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