

Faculté des bioingénieurs

Réponse du douglas au climat en Wallonie via une approche dendrochronologique

Auteur : Alexis Van Eecke

Promoteurs : Quentin Ponette et Camille Guisset

Lecteurs : Charles De Cannière et Xavier Draye

Année académique 2021-2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur en gestion des forêts et des espaces naturels

Remerciements

Camille, comment te remercier ? Depuis que je suis rentré à l'unif, j'ai toujours eu des échos comme quoi le mémoire est une épreuve horrible, épuisante, bourrée de stress, angoissante... Bref, le pire du pire. Mais grâce à toi, c'est tout le contraire que j'ai vécu. Ta disponibilité, ta réactivité, ton dynamisme et ta bonne humeur ont fait en sorte que je puisse surfer sur ce mémoire. C'était tellement agréable de se sentir soutenu et de savoir que tu serais toujours disponible pour répondre à toutes mes questions. Il n'y a jamais eu de temps mort grâce à ta réactivité et ça m'a permis d'avancer rapidement. Finalement, je n'ai jamais ressenti une once de stress, de fatigue ou d'énervement tout au long de ce processus. Merci également pour le temps que tu as passé à relire les différentes parties de mon mémoire. Si l'occasion se présente, je ne peux qu'encourager un futur mémorant à travailler avec toi. Juste MERCI !

Monsieur Ponette, on n'a pas eu l'occasion de se voir énormément mais vous étiez toujours présent lors des rendez-vous importants pour apporter une autre vision et proposer des suggestions intéressantes. Grâce à elles, j'ai pu aller explorer des pistes inconnues pour améliorer mes propos. Un immense merci pour cela et pour le temps que vous avez consacré à la relecture.

Olivier et François, vous êtes les king du carottage (même si l'un est meilleur que l'autre mais je ne dirai pas lequel sous peine de terribles représailles). Plus sérieusement, un grand merci pour les belles carottes que vous m'avez fournies car pas de carotte = pas de mémoire.

Madame Vincke, merci pour avoir assisté à certaines réunions en y apportant des pistes d'amélioration supplémentaires.

Morgane, merci pour ton script R indispensable à l'obtention de mes résultats les plus importants.

Monsieur Titeux, merci pour vos informations pertinentes sur l'effet du gel sur le douglas.

Maman et Aurélie, merci pour la chasse aux fautes d'orthographe et de compréhension.

Table des matières

1) Introduction	1
1.1) Contexte	1
1.2) Objectifs	1
2) Etat de l'art	3
2.1) Changements climatiques	3
2.1.1) Situation en Europe	3
2.1.2) Impact sur les forêts tempérées européennes.....	3
2.1.3) Réponses des forêts aux perturbations	5
2.1.4) Adaptation de la gestion sylvicole	6
2.2) Caractéristiques générales du douglas	8
2.3) Potentiel d'avenir du douglas	11
2.4) Douglas en Wallonie	12
2.4.1) Distribution du douglas en Wallonie.....	12
2.4.2) Sylviculture et productivité	14
2.4.3) Etat sanitaire du douglas en Wallonie	14
2.5) Dendrochronologie	16
2.5.1) Etape 1 : Choix des gradients, placettes et arbres échantillonnés	18
2.5.2) Etape 2 : Prélèvement des échantillons	18
2.5.3) Etape 3 : Préparation des carottes et mesures des accroissements annuels	19
2.5.4) Etape 4 : Interdatation et analyse des séries brutes de largeurs de cerne	19
2.5.5) Etape 5 : Standardisation des séries brutes de largeurs de cerne.....	19
2.5.6) Etape 6 : Calcul de la chronologie moyenne	21
2.5.7) Etape 7 : Calcul des fonctions de réponse et de corrélation.....	21
3) Matériels et méthodes.....	22
3.1) Sites d'étude.....	22
3.1.1) Sélection des peuplements	22
3.1.2) Caractérisation des peuplements	24
3.2) Données météo	26
3.3) Campagne d'échantillonnage.....	29
3.3.1) Sélection des arbres	29
3.3.2) Carottage.....	30

3.4) Traitement des carottes.....	31
3.4.1) Mesure des cernes	31
3.4.2) Interdatation.....	32
3.4.3) Calcul des années caractéristiques	33
3.4.4) Standardisation.....	35
3.4.5) Fonction de corrélation de type Bootstrap	38
3.5) Facteurs climatiques	39
3.6) Impact des sécheresses	41
4) Résultats	42
4.1) Chronologies moyennes brutes et standardisées	42
4.2) Années caractéristiques.....	46
4.3) Fonction de corrélation	47
4.4) Impact des sécheresses	54
5) Discussion	56
5.1) Années caractéristiques.....	56
5.2) Réponse du douglas au climat	57
5.2.1) Influence des températures	57
5.2.2) Influence des précipitations	59
5.2.3) Influence du climat de l'année précédente.....	60
5.3) Effet de la densité.....	61
5.4) Impact des sécheresses	61
5.4.1) Perspectives d'amélioration.....	63
5.5) Conséquences pour la gestion forestière	65
6) Conclusion.....	68
Bibliographie.....	70

Table des figures

Figure 1 : Triangle des pathologies des plantes.....	3
Figure 2 : Distribution du douglas en Europe en Amérique du Nord	8
Figure 3 : Ecogramme d'aptitude du douglas.....	10
Figure 4 : Distribution spatiale du douglas en Wallonie	13
Figure 5 : Symptômes observés sur douglas et causés par la rouille suisse, la cécidomyie et Sirococcus	16
Figure 6 : Synthèse des facteurs influençant la variabilité de la largeur de cerne.....	18
Figure 7 : Illustration des trois fréquences de signal sur une chronologie	20
Figure 8 : Localisation des peuplements en Wallonie	26
Figure 9 : Comparaison des sites selon la température moyenne annuelle et les précipitations totales annuelles sur la période 1954-2020	27
Figure 10 : Evolution des précipitations estivales et hivernales pour le site CDS et sur la période 1954-2020.....	28
Figure 11 : Comparaison des sites selon le déficit hydrique climatique annuel sur la période 1954-2020.....	29
Figure 12 : Carottage à la tarière de Pressler à moteur et extraction d'une carotte	30
Figure 13 : Rebouchage d'un trou avec une baguette en bois traitée et du baume.....	31
Figure 14 : Planage d'une carotte au microtome	31
Figure 15 : Interface du logiciel CooRecorder	33
Figure 16 : Chronologies moyennes brutes des différents sites	44
Figure 17 : Chronologies moyennes standardisées des différents sites.....	45
Figure 18 : Fonction de corrélation avec fenêtre statique entre la croissance et la température minimale pour TI1	47
Figure 19 : Illustration des concepts de résistance, résilience et récupération.....	65

Table des tableaux

Tableau 1 : Compatibilité bioclimatique entre l'aire d'origine et la Wallonie	9
Tableau 2 : Evolution de la surface des douglasaies en Wallonie	12
Tableau 3 : Critères de sélection des peuplements	22
Tableau 4 : Caractéristiques générales des peuplements	25
Tableau 5 : Facteurs climatiques testés pour la fonction de corrélation avec la fenêtre statique.....	40
Tableau 6 : Statistiques générales sur les chronologies brutes et standardisées	43
Tableau 7 : Années caractéristiques les plus significatives	46
Tableau 8 : BCC entre la croissance et la température maximale	49
Tableau 9 : BCC entre la croissance et la température minimale	50
Tableau 10 : BCC entre la croissance et la température moyenne	51
Tableau 11 : BCC entre la croissance et les précipitations.....	52
Tableau 12 : BCC entre la croissance et SPEI.....	53
Tableau 13 : Impact des sécheresses printanières sur la croissance du douglas.....	54
Tableau 14 : Impact des sécheresses estivales sur la croissance du douglas	54
Tableau 15 : Conditions climatiques des années caractéristiques 1996 et 1997 par rapport à la période de référence 1954-2020	56
Tableau 16 : Corrélations entre les températures maximale, moyenne et minimale, les précipitations et le SPEI pour le site de CDS	59
Tableau 17 : Différence climatique entre les trois années de sécheresse et la période de référence 1954-2020 pour les peuplements de Libin.....	62

Listes des acronymes

AC1 :	AutoCorrélation d'ordre 1
BCC :	coefficient de corrélation Bootstrap ou <i>Bootstrapped Correlation Coefficient</i>
C :	Croissance pendant la période de sécheresse
C _{ap} :	Croissance moyenne pendant la période post-sécheresse
C _{av} :	Croissance moyenne pendant la période pré-sécheresse
CNSW :	Carte Numérique des Sols de Wallonie
CRN :	chronologie moyenne standardisée
EPS :	<i>Expressed Population Signal</i>
ETO :	EvapoTranspiration de référence
ETP :	EvapoTranspiration Potentielle
GIEC :	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
IRM :	Institut Royal Météorologique de Belgique
IT :	<i>Interval Trend</i>
NW :	<i>Normalization in a moving Window</i>
OWSF :	Observatoire Wallon de la Santé des Forêts
P :	Précipitations
PPN :	Productivité Primaire Nette
PY :	année caractéristique ou <i>Pointer Year</i>
P-ETP :	déficit hydrique climatique
RGC :	<i>Relative Growth Change</i>
RUM :	Réserve en eau Utile Maximale
SM :	Sensibilité Moyenne
SPEI :	<i>Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index</i>
zChron :	<i>extreme values of chronology</i>

1) Introduction

1.1) Contexte

Dans un contexte climatique changeant (températures, précipitations, événements extrêmes...), l'avenir des arbres et des forêts est incertain. D'un côté, la productivité des espèces ligneuses augmente grâce à l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ (Houllier et al., 2006) et à l'allongement de la saison de végétation (Linderholm, 2006) mais de l'autre, leur vitalité est compromise en raison des maladies, des ravageurs, des sécheresses ou encore des incendies de plus en plus fréquents et sévères (Orazio et al., 2014). Il est donc difficile de donner une réponse claire sur la réaction de la forêt au climat. Surtout que chaque essence va réagir différemment à ces changements en fonction de ses caractéristiques propres (structure anatomique, traits fonctionnels, capacité d'adaptation...).

Ainsi, en Wallonie, une attention toute particulière est posée sur le douglas, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, car il s'agit de la deuxième essence résineuse la plus représentée dans cette région (OEWB, 2021). Considérée pendant longtemps comme une espèce ayant un potentiel d'avenir face aux changements climatiques, cette idée est remise en question aujourd'hui à cause de différents problèmes détectés depuis 2013. Parmi ceux-ci figurent des champignons, la rouille suisse et *Sirococcus conigenus*, et un insecte, la cécidomyie du douglas, qui provoquent défoliations et nécroses pouvant mener à la mort des individus infectés. Les peuplements adultes semblent être relativement épargnés mais les plantations en souffrent beaucoup, ce qui fait craindre le pire pour le futur du douglas en Wallonie (OWSF, 2021).

Plus généralement, depuis quelques années en Europe, le douglas fait de plus en plus l'objet d'études concernant sa vulnérabilité face aux sécheresses (Lévesque et al., 2015; Sergent et al., 2014; Vejpusková et Čihák, 2019). Réputé comme ayant une bonne résistance aux déficits hydriques, cette capacité est aujourd'hui débattue en raison des sécheresses récurrentes et sévères de ces dernières années qui ont impacté sa croissance. Celle exceptionnelle de 2003 est souvent utilisée comme référence dans ces études. En Wallonie, il manque cruellement d'informations à ce sujet car aucune recherche n'a porté exclusivement sur le douglas. Il est donc temps de pallier ce problème.

1.2) Objectifs

Le but principal de cette étude est donc de décrire et de comprendre la réponse en croissance radiale du douglas au climat en Wallonie pour savoir quels sont les impacts du climat sur cette essence. A côté de cela, deux objectifs secondaires ont également été investigués. Le premier traite de l'effet de la densité des peuplements sur cette réponse. Cette densité pouvant affecter la compétition et l'accès aux ressources (hydrique notamment) (Aussenac, 2000), il est raisonnable de penser qu'elle soit un facteur influençant la croissance. L'eau est d'autant plus importante qu'elle est liée au second sous-objectif qui concerne l'impact des sécheresses

sur le douglas. Ces évènements climatiques ponctuels étant de plus en plus fréquents et sévères, leurs conséquences sur la croissance des arbres sont devenues un sujet d'attention partout en Europe. À terme, ce travail vise à renseigner les acteurs forestiers sur l'avenir possible ou compromis du douglas en Wallonie.

Pour remplir ces objectifs, l'approche dendrochronologique a été utilisée. Cette méthode, basée sur l'analyse des largeurs des cernes annuels de croissance et sur leur datation, permet d'étudier l'impact du climat et de l'environnement sur la croissance des arbres (Lebourgeois et Mérian, 2012). L'influence d'une sécheresse sur un arbre pourrait se voir via un cerne plus étroit que d'habitude l'année en question ou celles qui suivent.

Cette étude commence par un état de l'art avec les effets des changements climatiques sur les forêts et leurs réactions, les caractéristiques générales du douglas et sa situation plus particulière en Wallonie ainsi qu'une description succincte des différentes étapes de la dendrochronologie. Il s'ensuit une explication de la méthodologie employée avec la sélection des sites d'étude ainsi que la récolte et le traitement des échantillons. La section suivante traite des principaux résultats obtenus. Pour finir, ceux-ci sont discutés en lien avec les trois objectifs de ce travail. Les conséquences pour la sylviculture du douglas sont également abordées.

2) Etat de l'art

2.1) Changements climatiques

2.1.1) Situation en Europe

Les changements climatiques sont en train de perturber l'équilibre de la Terre. Le GIEC (2014) annonce une augmentation globale des températures, des modifications dans les régimes pluviométriques ainsi qu'une augmentation de la fréquence et de la sévérité des événements climatiques extrêmes. Dans le dernier rapport, ces tendances sont confirmées avec notamment, une augmentation globale de 1,1°C durant les 10 dernières années par rapport à l'ère préindustrielle ainsi que des précipitations moyennes en hausse dans plusieurs régions dont l'Europe (GIEC, 2021). Des événements extrêmes récents illustrent ces changements comme la sécheresse exceptionnelle de l'été 2018 (IRM, n.d.) ou encore les importantes inondations de juillet 2021 (IRM, n.d.) qui ont, toutes deux, touché plusieurs pays européens. Les conséquences de ces changements sont multiples et affectent tous les organismes vivants sur Terre. Les animaux et les êtres humains sont le plus souvent cités comme victimes du dérèglement climatique mais il ne faut pas oublier que les végétaux sont également impactés.

2.1.2) Impact sur les forêts tempérées européennes

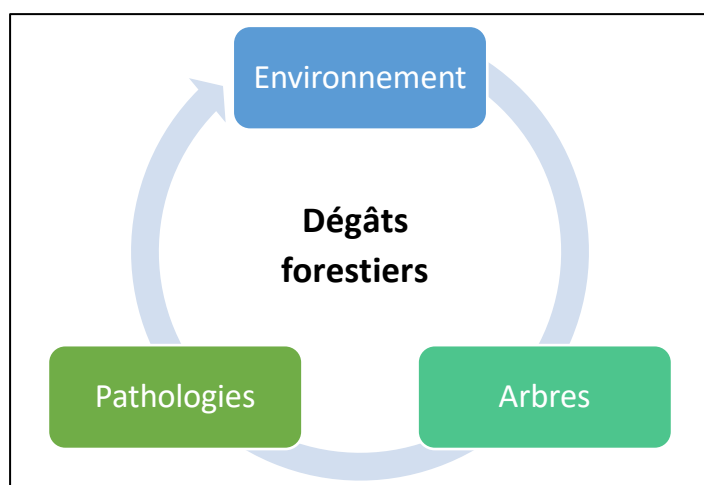


Figure 1 : Triangle des pathologies des plantes (Orazio et al., 2014)

La forêt est composée de trois éléments : l'environnement, les arbres et les pathologies (Figure 1). En temps normal, ceux-ci sont à l'équilibre mais lorsqu'une perturbation arrive, un ou plusieurs de ces éléments peuvent être affectés et modifier cet équilibre. Les changements climatiques, perturbations majeures, jouent sur les trois en même temps et ont des impacts positifs et négatifs sur les forêts tempérées européennes

(Orazio et al., 2014). Concernant les impacts négatifs, le risque biotique est accru. Les arbres et les ravageurs ont toujours été en interaction. D'un côté, certains insectes et champignons provoquent des dépérissements en mangeant les feuilles ou en provoquant des pourritures. De l'autre, les arbres s'adaptent progressivement en développant des mécanismes de défense pour survivre. Cette adaptation se fait normalement sur le long terme mais le contexte actuel fait que les arbres n'ont plus assez de temps pour réagir. Ainsi, les ravageurs bénéficient d'un climat plus favorable à leur prolifération. La hausse globale des températures est le facteur principal les favorisant. Leur aire de distribution étant dépendante des températures, ils peuvent donc couvrir un plus grand territoire (Robinet et al., 2010). En

outre, les hivers moins rigoureux favorisent la survie des larves. Il y a également des risques abiotiques avec les événements extrêmes plus fréquents et plus sévères comme les incendies, les tempêtes et les sécheresses. Ceux-ci peuvent provoquer des dégâts aux forêts et favoriser en même temps les ravageurs. Pour ne prendre qu'un exemple, l'épicéa a été affaibli par les sécheresses successives, ce qui a profité aux scolytes qui ont décimé d'énormes surfaces de cette essence (Nageleisen et al., 2009). Les gestionnaires forestiers ont aussi participé indirectement à ces attaques en gérant ces forêts d'épicéas de façon monospécifique. Sans diversité, synonyme de meilleure résistance, l'insecte s'est propagé plus facilement et plus rapidement.

Concernant les impacts positifs des changements climatiques, la productivité des arbres est en hausse (+ 50% à 160% pour le sapin, l'épicéa commun, le hêtre et les chênes indigènes dans le Nord-Est de la France sur 140 ans) grâce à l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique (Houllier et al., 2006) et grâce à l'allongement de la saison de végétation (+ 5,5 jours entre 1980-1989 et 1990-2000 au Royaume-Uni, + 8 jours en 80 ans en Estonie) provoqué par l'augmentation des températures (Linderholm, 2006). Cependant, il faut préciser que ces avantages ont aussi leurs incertitudes concernant notamment la qualité technologique du bois ainsi que l'impact des gelées tardives et des sécheresses printanières. Tous ces éléments montrent bien que l'avenir des forêts est incertain. Il y a des effets positifs d'une part et des effets négatifs de l'autre, ce qui rend la fiabilité des prédictions difficile à estimer.

L'incertitude concernant l'avenir des forêts est d'autant plus importante que tous les arbres qui la composent ne réagissent pas de la même manière. En fait, leur réponse dépend notamment de l'essence et de sa capacité d'adaptation. Le hêtre commun (*Fagus sylvatica* L.), par exemple, est considéré comme une essence vulnérable dans le contexte des changements climatiques (Petit et al., 2017) et ce, pour plusieurs raisons (Landmann et al., 2007). La première est qu'il ne supporte pas les sols secs ou gorgés d'eau, ce qui risque de devenir plus fréquent avec l'augmentation des précipitations hivernales et la diminution des précipitations estivales annoncées (European Environment Agency, 2017). Ensuite, que ce soit au stade juvénile ou adulte, il est très sensible aux canicules et aux sécheresses. Son enracinement moyennement profond l'expose également aux tempêtes et leur vent violent. Les tempêtes Lothar et Martin de 1999 en sont le parfait exemple. En France, le hêtre était l'espèce la plus impactée, que ce soit en termes de surface à reconstituer (42%) ou de surface détruite (13,8%) (Colin, 2002). Enfin, comme toutes les espèces, le hêtre subit des attaques de plusieurs ravageurs. Parmi ceux-ci, le petit scolyte du hêtre (*Taphrorychus bicolor*) reste dans les mémoires en raison de dégâts considérables causés au début des années 2000 (Huart et Rondeux, 2001). Ceci s'est matérialisé en volumes récoltés nettement supérieurs à la normale (OEWB, 2021). Il ne faut pas non plus négliger les interactions entre ces différents éléments. Les tempêtes de 1999 ont provoqué des trouées dans les hêtraies, ce qui a exposé

brutalement les arbres à la lumière abondante et aux vagues de chaleur de l'été 2003 (IRM, n.d.). Des coups de soleil avec décollement d'écorce et des mortalités dans les houppiers ont été constatés en 2004 (Landmann et al., 2007). Malgré tout ceci, les essences vulnérables comme le hêtre pourront tout de même subsister tant qu'elles sont en station.

Contrairement au hêtre, le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carr.) est une essence ligneuse présentant un bon potentiel d'avenir dans le contexte des changements climatiques. Originaire d'Afrique du Nord, ce cèdre est une espèce héliophile qui peut supporter des températures allant de -25°C (en dormance) à 41°C. Son enracinement est très puissant, ce qui lui permet d'aller chercher de l'eau en profondeur dans le sol, et sa longue saison de végétation s'étale d'avril à octobre. Toutes ces qualités font que cet arbre a une bonne résistance face à la sécheresse climatique et édaphique. Il faut toutefois préciser qu'il présente aussi quelques limites comme sa sensibilité au brouillard, à la neige et aux gelées (tardives et précoces), ainsi que son besoin important en eau. Malgré son intérêt certain, il est encore peu présent en Europe. En Wallonie, par exemple, il a commencé à être planté depuis le début des années 2000 et occupait une surface de seulement 14 ha en 2020. Les résultats sont néanmoins encourageants car sur 569 arbres évalués, 554 ont été considérés comme non dépérissants (Pirronitto et al., 2020). Les exemples du hêtre commun et du cèdre de l'Atlas ci-dessus montrent bien que chaque essence réagit différemment à aux perturbations en fonction de ses caractéristiques propres. Il est donc compliqué de prédire l'évolution des forêts en général.

2.1.3) Réponses des forêts aux perturbations

Les arbres peuvent réagir de trois façons différentes aux changements climatiques : l'adaptation, la migration ou l'extinction (Bussotti et al., 2015). Le terme "extinction", utilisé par ces auteurs, est un terme fort qui ne reflète pas l'idée développée ici. Il sera donc remplacé par "dépérissement". Son explication est toutefois facilement compréhensible. A l'instar d'espèces animales disparues comme le loup de Tasmanie chassé intensivement par les humains, certaines essences forestières dépérissent dans certaines zones, sans parler d'extinction pour autant, en raison des perturbations intenses et récurrentes. Par exemple, la canicule de 2003 et les sécheresses qui ont suivi ont causé de nombreux dépérissements dans les peuplements de pin sylvestre et de sapin dans le sud des Alpes françaises (Vennetier, 2012). Un exemple d'extinction pourrait être associé à *Cryphonectria parasitica*, un champignon asiatique introduit en Amérique du Nord qui a éliminé la quasi-totalité des châtaigniers d'Amérique en peu de temps (Rigling et Prospero, 2018). Cependant, cet événement n'est pas dû aux changements climatiques mais comme expliqué précédemment, l'aire de distribution des ravageurs grandit avec l'augmentation des températures. Il n'est donc pas impensable que le cas nord-américain se reproduise en Europe.

La migration, processus généralement attribué aux animaux, est également possible chez les végétaux. Toutefois, la vitesse d'exécution est bien inférieure. Le hêtre, par exemple, pour

recoloniser l'Europe centrale après la dernière glaciation, a pris environ 7 000 ans avec une vitesse de 250-270 m/an (Saltré et al., 2013). Cette valeur est bien en dessous de 1 km/an, estimée comme étant la vitesse nécessaire pour suivre les déplacements de l'aire de répartition climatique actuelle (Aitken et al., 2008). En outre, ces vitesses de migration dépendent de la capacité de dispersion des graines. Certaines essences, comme les érables ou les bouleaux, ont des graines ailées qui, grâce au vent, se propagent plus loin que les glands ou les châtaignes. Malgré tout cela, la tendance générale veut que la composition spécifique change avec les essences méditerranéennes se déplaçant en Europe centrale et celles d'Europe centrale migrant en Scandinavie ou en altitude (Lindner et al., 2014), mais il est difficile de donner des prédictions fiables. Ainsi, le pin maritime, essence méditerranéenne, voit son aire de distribution potentielle augmenter en France, contrairement au pin sylvestre (Legay, 2014). Le concept d'aire potentielle est important car cela veut dire que l'essence peut l'occuper mais pas forcément qu'elle l'occupe réellement. Cette occupation effective est en effet souvent réduite, sauf si la migration est volontairement favorisée par les forestiers en effectuant des plantations.

L'adaptation consiste en des modifications phénotypiques ou génétiques et peut se faire de façon naturelle ou artificielle. Un exemple naturel de changement phénotypique est les peuplements de pins sylvestres venant d'Espagne ou des Apennins italiennes. Ces individus ont développé des nouvelles stratégies, comme des racines plus longues pouvant aller chercher de l'eau plus profondément, leur permettant de faire face aux conditions climatiques extrêmes (Taeger et al., 2013). La provenance a donc un intérêt crucial. Concernant les modifications artificielles, des hybridations¹ sont possibles entre essences. Ces combinaisons génétiques peuvent augmenter la diversité fonctionnelle et rendre l'hybride plus adapté aux conditions actuelles. Certains ont déjà fait leur preuve dans la nature comme *Quercus crenata* Lam. (*Quercus suber* L. x *Quercus cerris*) (Bussotti et al., 2015).

2.1.4) Adaptation de la gestion sylvicole

Les forestiers sont également impliqués dans le processus d'adaptation avec les pratiques sylvicoles. Dale et al (2001) estiment qu'une gestion adaptative permet de diminuer la sensibilité des peuplements aux perturbations, de réduire leurs impacts et d'améliorer la résilience et la récupération des forêts après une perturbation. Avant d'opérer ce processus de gestion adaptative, il faut d'abord connaître les risques encourus par la forêt parce qu'ils ne sont pas les mêmes en fonction de la situation géographique et que la gestion sera différente selon le risque. Par exemple, les incendies sont plus fréquents en zone méditerranéenne que boréale. Une fois les risques connus, il est possible de diviser la gestion en trois phases : avant, pendant et après la perturbation.

¹ Les hybridations peuvent également se faire naturellement

La gestion pré-perturbation a pour objectif majeur de réduire la vulnérabilité de la forêt. Les principaux éléments sur lesquels jouer pour atteindre ce but sont la composition et la structure forestière. Certaines essences sont naturellement moins vulnérables à une perturbation que d'autres. Par exemple, les séquoias géants sont résistants aux incendies grâce à leur écorce très épaisse (Johnson, 1948). Les résineux produisent de l'oléorésine qui les protège en partie des insectes se nourrissant de leur phloème. Planter des essences qui en produisent plus peut limiter les proliférations (Dale et al., 2001). Au niveau de la structure, la forêt mélangée est une bonne option car plus de diversité est synonyme de plus de traits fonctionnels, ce qui rend la forêt globalement plus résistante et résiliente (Bolte et al., 2009; Lebourgeois et al., 2013).

Des modifications du paysage peuvent également répondre à cet objectif comme les coupes rases qui augmentent la sensibilité aux vents violents (Zeng et al., 2004) ou les routes qui limitent la propagation des feux en faisant office de coupe-feux (Narayanaraj et Wimberly, 2013). En cas de plantation, l'adéquation à la station, les conditions locales et la réalisation correcte de la plantation sont primordiales pour réduire au maximum les stress et augmenter les chances de survie. La gestion des peuplements adultes va être fonction de l'essence en question et de son comportement. Ainsi, les espèces héliophiles comme le mélèze demandera une gestion dynamique pour lui donner suffisamment de lumière alors que le hêtre, espèce sciaphile, pourra se développer dans un milieu plus compétitif nécessitant moins d'interventions.

Cette idée est liée à la densité des peuplements qui a aussi un rôle à jouer dans la vulnérabilité des forêts. De fait, plus la densité augmente, plus la compétition est forte pour l'accès à l'eau, aux nutriments et à la lumière (Aussenac, 2000). Schmitt et al (2020) ont étudié la réponse du chêne sessile au climat sur des sites avec des bilans hydriques contrastés dans le nord de la France. Ils ont montré que, bien que la réponse dépende principalement du bilan hydrique, la densité du peuplement peut modifier la capacité des arbres à résister aux sécheresses extrêmes. Ainsi, réduire la densité a permis aux peuplements sur site sec de mieux résister à la forte sécheresse de 2003 que ceux sur site humide. Les forestiers doivent donc trouver un compromis entre résistance et productivité. Giuggiola et al (2013) ont obtenu les mêmes résultats pour le pin sylvestre du Valais mais ajoutent que cet effet n'est que temporaire. Sur le long terme, ils conseillent de mixer le pin avec des essences plus résistantes. Aussenac et Granier (1988), ayant étudié le douglas dans le nord-est de la France, confirment que les éclaircies peuvent augmenter la réserve en eau du sol, ce qui diminue la durée et l'intensité du stress en cas de sécheresse, mais précisent que cet effet est fort marqué uniquement durant les trois premières années après l'éclaircie.

La gestion pendant la perturbation vise à réduire l'impact de la perturbation. Pour ce faire, il faut être attentif et dynamique car plus tôt l'intervention est réalisée, moins il y aura de dégâts. En cas de pullulation d'insectes, le repérage rapide des symptômes permet de couper

les arbres infectés et ainsi de réduire la taille de la zone affectée. La même idée est valable pour limiter la propagation des incendies avec une prise en charge rapide (Dale et al., 2001).

La gestion post-perturbation cherche à améliorer la résilience et la récupération des forêts. En cas de chablis importants provoqués par une tempête, il est préférable d'enlever rapidement les arbres au sol pour éviter la prolifération de ravageurs et de maladies (Leroy, 2022). L'exploitation de ceux-ci doit toutefois être correctement effectuée car elle pourrait endommager les sols et les arbres résiduels. Des éléments structurels peuvent également être ajoutés pour créer des sites favorables au rétablissement de la végétation ou servir de perchoirs pour les oiseaux qui disperseraient ainsi des graines.

2.2) Caractéristiques générales du douglas

Comme expliqué dans la section précédente, chaque essence répond différemment aux changements climatiques. Le douglas, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, qui fait l'objet de cette étude, ne fait pas exception. Il s'agit d'un résineux faisant partie du genre *Pseudotsuga*, de la famille *Pinaceae* et de l'ordre *Pinales*. Ses aiguilles sont persistantes, pétiolées, très souples et disposées en brosse. Ses bourgeons sont rougeâtres et fusiformes. Ses cônes sont pendants, ovoïdes et munis des bractées trifides. Ses rameaux sont lisses, pubescents et changent de couleur selon l'âge (vert si jeune, gris si vieux). Son écorce est épaisse et crevassée avec une couleur orangée dans les crevasses. Son aubier est de couleur jaune-brune alors que son duramen se situe dans les tons rosés (Dumé et al., 2018).

En Europe, cet arbre est considéré comme une essence exotique naturalisée. En effet, originaire de l'ouest de l'Amérique du Nord, il fut introduit au début du 19^e siècle. La Figure 2 montre sa distribution en Europe et dans son aire d'origine. La particularité de cette dernière est qu'elle est très étendue et couvre donc des conditions climatiques contrastées. Cette large fenêtre climatique permet au douglas de se développer également en Wallonie car les conditions sont compatibles. Le Tableau 1 reprend les valeurs pour les températures et les précipitations.

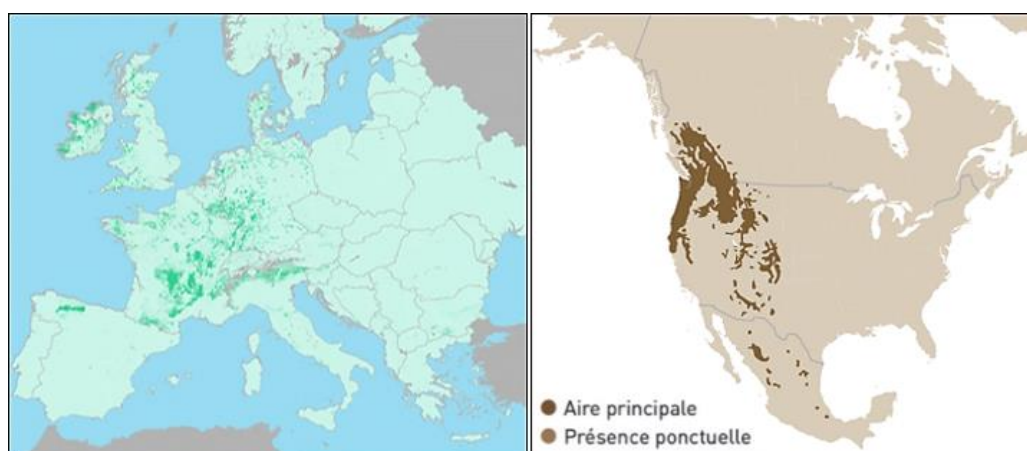


Figure 2 : Distribution du douglas en Europe (Schmid et al., 2014) et en Amérique du Nord (Petit et al., 2017)

Tableau 1 : Compatibilité bioclimatique entre l'aire d'origine et la Wallonie (Petit et al., 2017)

Facteur climatique	Amérique du Nord	Wallonie
Température annuelle moyenne [°C]	5,5 à 17	7 à 11
Températures minimale et maximale absolues [°C]	-40 et 45	-20 et 35
Précipitations annuelles moyennes [mm]	550 à 1300	800 à 1400

Au moment de son introduction, les changements climatiques n'étaient pas une préoccupation. Si le douglas a été planté massivement, c'est principalement en raison de sa croissance qui est précoce, rapide et soutenue. En effet, sa productivité exprimée en accroissement moyen en volume varie, selon la classe de fertilité, de 15 à 25 m³/ha/an vers 60 ans. En comparaison, celle de l'épicéa est comprise entre 10 et 20 m³/ha/an. En raison de sa croissance et de sa productivité élevées, son terme d'exploitabilité est court. Il varie de 79 à 89 ans selon la fertilité du site et la sylviculture adoptée, contre 83 à 95 ans pour l'épicéa (Perin et al., 2016).

Au niveau de son autécologie, le douglas a besoin d'une pluviométrie importante et bien répartie dans l'année. Idéalement, les précipitations moyennes annuelles doivent être au moins égales à 700 mm pour garantir une bonne croissance. En été [juin-août], il faut au moins 400 mm mais ce nombre peut descendre jusqu'à 250 mm selon la capacité de rétention en eau du sol. Cette essence est également résistante au vent grâce à son enracinement oblique et relativement profond. Les cas de renversement et de déchaussement sont généralement dus à une station défavorable et à un défaut de plantation respectivement (Angelier, 2007). A propos du gel, le douglas peut résister aux gelées hivernales mais est sensible aux gelées tardives (après débourrement) et précoces (avant août) dans une moindre mesure. Ces gelées peuvent être à l'origine de fourches et impactent plus les plantations. L'usage de provenance à débourrement tardif peut être une solution (Spiecker et al., 2019).

Un atout important du douglas, comparé à d'autres essences, est qu'il est résistant aux sécheresses "moyennes" estivales. Cette capacité est possible grâce à son système conducteur, son indice foliaire et son activité stomatique. Les détails sont disponibles en annexe A. En revanche, il est sensible aux sécheresses exceptionnelles qui peuvent causer des dommages physiologiques graves. Dans ce contexte, la réserve en eau utile maximale du sol joue un rôle crucial car elle peut aider le douglas à y résister. Il faut néanmoins préciser que les dégâts les plus conséquents sont détectés sur stations inadaptées (Angelier, 2007). Le douglas (surtout les jeunes individus) est aussi vulnérable à la sécheresse induite par le gel au début du printemps. Ce phénomène se produit lorsque le sol est gelé et que l'arbre n'arrive

pas à transpirer suffisamment les jours ensoleillés puisque l'absorption de l'eau du sol est impossible (Spiecker et al., 2019).

A côté de ces aspects climatiques, il est aussi vulnérable à certaines conditions édaphiques comme l'anaérobiose et la compaction du sol qui limitent le développement de ses racines, et supporte mal les sols superficiels. Au sujet de sa tolérance par rapport aux niveaux hydrique et trophique, le douglas est une essence assez plastique, comme le montre la Figure 3. Etant donné qu'il est sensible à l'anaérobiose, il ne pourra pas se développer sur les sols sujets à l'engorgement en eau, à savoir les sols humides, tourbeux et marécageux ainsi que ceux à régime hydrique alternatif. Niveau trophique, il ne supporte pas les sols très riches en carbonates. Son optimum est situé sur des sites allant de plutôt sec à frais et de pauvre à riche en éléments nutritifs (Petit et al., 2017).

Le stade juvénile possède une faible tolérance à l'ombrage. Il supporte un couvert supérieur léger mais uniquement pendant les premières années. Il faut aussi faire attention au gibier car les jeunes pousses sont très appétentes. Quant au stade adulte, il exige la pleine lumière et supporte une compétition latérale. Il est également victime d'écorcements et de frotures. Concernant la phénologie du douglas, sa germination s'étale d'avril à juin, sa floraison de mi-avril à mai, sa fructification de mi-août à septembre et sa dissémination d'octobre à février (Petit et al., 2017).

Un dernier atout du douglas sont les caractéristiques technologiques de son bois, particulièrement appréciées par l'industrie du bois. D'abord, bien qu'il ait une croissance rapide, c'est un bois dense pour un résineux. Il a une masse volumique moyenne de 550 kg/m³, ce qui est supérieur à d'autres résineux comme l'épicéa avec 450 kg/m³ ou le sapin avec 460 kg/m³ (Hout Info Bois, n.d.). C'est d'autant plus exceptionnel qu'il possède une forte largeur de cernes car en général, la densité des résineux diminue avec la largeur de cernes (De Melo Moura, 1996). Cette densité élevée lui confère d'excellentes caractéristiques mécaniques qui sont supérieures à la plupart de ses concurrents. Le tableau 1 en annexe B reprend quelques valeurs comparatives. Ensuite, il possède une bonne durabilité naturelle. Son duramen est en classe de durabilité 3 (moyennement durable), cela veut dire qu'il peut

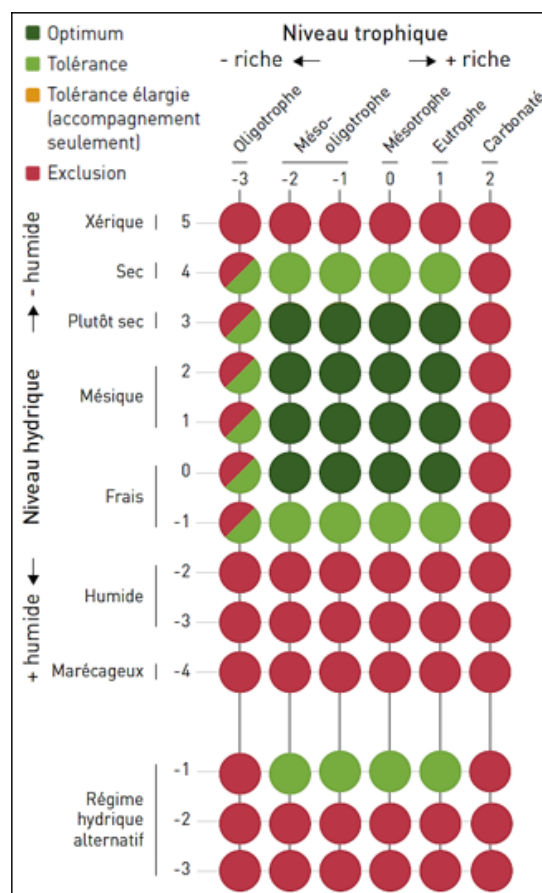


Figure 3 : Ecogramme d'aptitude du douglas (Petit et al., 2017)

être utilisé en intérieur sans restriction ou en extérieur mais sans contact avec le sol. De nouveau, c'est mieux que certains autres résineux comme l'épicéa ou le sapin dont le duramen n'est pas durable naturellement. Quant à son aubier, il n'est pas durable mais c'est le cas pour tous les arbres. Cependant, contrairement au duramen, il est facilement imprégnable. Il est donc possible d'appliquer un traitement de préservation sur l'aubier afin d'améliorer artificiellement sa durabilité et ainsi pouvoir augmenter le nombre d'usages possibles. Enfin, le douglas est facile à usiner. Il sèche rapidement et se déforme peu, il se colle aisément, il a une bonne stabilité dimensionnelle, il se scie facilement sauf en présence de gros nœuds... En outre, ses qualités esthétiques sont fort appréciées en raison de ses tons rosés. Grâce à toutes ces qualités, le douglas a beaucoup d'utilisations possibles : charpente, bardage, menuiserie intérieure, parquet, châssis ou encore mobilier (Hout Info Bois, n.d.).

Les inconvénients du douglas au niveau industriel sont son écorce très épaisse et ses branches nombreuses et épaisses. Ces défauts sont probablement dus au matériel génétique donc pour les éviter, il faut bien choisir la provenance. De plus, la proportion d'aubier est souvent importante. Pour régler ce problème, il faut diriger la sylviculture vers la production de gros bois d'une circonférence minimum de 180 cm (Petit et al., 2017). Au niveau usinage, il se durcit très fort après séchage et devient donc assez fissile, ce qui peut provoquer des fentes de cœur (CDAF, 2008).

2.3) Potentiel d'avenir du douglas

Le douglas a pendant longtemps été considéré comme une essence ayant un bon potentiel d'avenir face aux changements climatiques, notamment grâce à sa résistance aux sécheresses expliqué précédemment. Cependant, depuis quelques années, de plus en plus d'articles scientifiques remettent en question cette capacité. Girard (2009) a étudié l'effet de la sécheresse de 2003 sur la croissance radiale de 13 essences, dont le douglas, repartis dans plusieurs régions françaises. Il ressort qu'elle a diminué de 20,2% en moyenne pour les 13 essences. Quant au douglas, l'impact était le plus important avec une perte moyenne de 23,8%. Sergent et al (2014) ajoutent que depuis 2003, de nombreux dépérissements de douglas sont détectés en France. Ces auteurs ont montré qu'il existe une relation négative significative entre la croissance et le déficit hydrique édaphique. En cas de sécheresse sévère, deux réactions se déroulent. De façon immédiate, les stomates se ferment, ce qui stoppe la croissance et l'accumulation de nutriments. De façon différée, des dommages irréversibles se produisent comme la cavitation du xylème, la perte de feuilles ou la mort des racines fines (Bréda et al., 2006). Cette situation de réduction de croissance a duré jusqu'en 2006 en raison d'une pénurie d'eau importante. La phase de récupération n'a commencé qu'en 2007, lorsque le déficit hydrique a diminué. En outre, Sergent et al (2014) appuient sur le rôle direct que les éclaircies jouent sur le bilan hydrique, comme expliqué auparavant. Ceci se fait via la réduction de la surface foliaire qui diminue l'interception et l'évapotranspiration. Ce faisant, la quantité d'eau dans le sol se retrouve augmentée.

D'autres études européennes tirent la même conclusion : l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des sécheresses ainsi que le déficit hydrique associé sont les principales menaces qui pèsent sur le douglas (Castaldi et al., 2020; Lévesque et al., 2015; Vejpusková et Čihák, 2019).

Martinez-Meier et al (2008) soulignent le rôle encore méconnu de la densité du bois sur la réaction des arbres au climat. Selon eux, les arbres qui ont survécu à la sécheresse de 2003 avaient une densité moyenne de cerne significativement plus élevée ainsi qu'une densité et une proportion de bois final supérieures. L'hypothèse explicative est que ces caractéristiques amélioreraient la résistance à la cavitation. Ainsi, le système hydraulique de ces arbres aurait été préservé, contrairement aux autres qui seraient morts d'une embolie généralisée. Le processus physiologique derrière cela pourrait être un trait adaptatif du douglas à avoir un rapport élevé entre la bois final et initial (Domec et Gartner, 2002) ou une capacité à stocker de l'eau dans le bois final et à la redistribuer en cas de problème avec le bois initial (Schiller et Cohen, 1995).

2.4) Douglas en Wallonie

2.4.1) Distribution du douglas en Wallonie

Comme expliqué précédemment, le douglas a été introduit en Belgique au début du 19^e siècle. Il a toutefois fallu attendre la fin de la Seconde Guerre mondiale pour qu'il y soit planté massivement. Depuis lors, les surfaces occupées par le douglas n'ont fait qu'augmenter, comme le montre le Tableau 2. Il est donc devenu la deuxième essence résineuse la plus représentée sur le territoire wallon, derrière l'épicéa commun.

Tableau 2 : Evolution de la surface des douglasaies en Wallonie. DO = douglas et EP = épicéa

Année	Surface DO [ha]	Surface DO + EP [ha]	Proportion de la surface résineux [%]	Source
1950	700		0,6	(Biévelet et al., 2007)
1959	2 200		1,2	
1970	6 300		2,6	
1983	11 000		4,4	
2003	23 400		10,3	
2010	19 250	11 000	10	(OEWB, n.d.)
2012	20 000	11 000	10,2	
2017	20 300	12 000	10,5	
2019	21 455	13 182	11	
2021	23 000	13 900	11,5	

En 2021, les douglaiaes pures occupaient 23 000 ha, ce qui constituent 11,5% des forêts résineuses et 4,8% de la forêt wallonne. En ajoutant les peuplements mélangés avec l'épicéa, ces chiffres montent respectivement à 18,5 et 7,7%. En guise de comparaison avec les pays voisins, le douglas représente 2,6% de la surface forestière en France, 2% en Allemagne, 1,7% au Royaume-Uni, 7% aux Pays-Bas en 2002 et 0,5% de la surface forestière résineuse en Espagne en 1993 (Biévelet et al., 2007).

Concernant la distribution spatiale du douglas en Wallonie, tant qu'il est en station, il peut s'implanter partout. De fait, les conditions bioclimatiques de son aire d'origine sont compatibles avec celle de la Wallonie (Tableau 1). Il n'est toutefois pas conseillé de l'installer dans les fonds de vallée en raison du risque de gelées tardives et d'engorgement des sols. Typiquement, en Région wallonne, il est installé principalement sur des sols de type Gbb, ce qui correspond à un sol limoneux caillouteux avec un drainage favorable et un horizon B structural. La charge en éléments grossiers est de nature schisteuse et/ou gréseuse (Alderweireld et al., 2015). Malgré cette plasticité, il est majoritairement présent en Ardenne (73%) (Figure 4). Cela peut s'expliquer facilement par la tradition plus résineuse et par son taux de boisement plus élevé par rapport aux autres régions (Petit et al., 2017).

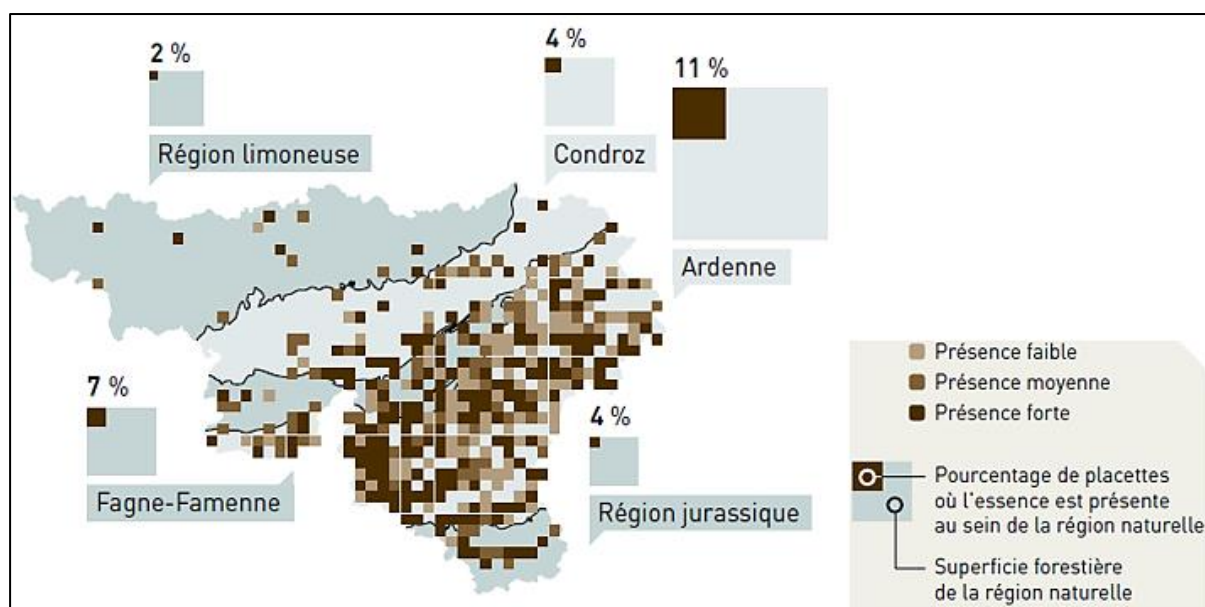


Figure 4 : Distribution spatiale du douglas en Wallonie (Petit et al., 2017)

En termes de propriétaire, le secteur privé possède 61% des douglaiaes pures et 49% des douglaiaes mélangées. Cette répartition montre que le secteur privé présente un engouement plus marqué pour la culture de cette essence. En mélangeant privé et public, les douglaiaes pures ont, en moyenne, une densité de 810 tiges/ha, une surface terrière de 36,6 m²/ha, un volume de 381,4 m³/ha et une circonférence de 75 cm. En outre, 63% des douglas, en termes de surface, ont moins de 30 ans. Le volume de cette essence mis sur le marché

pourrait donc sensiblement augmenter dans les prochaines années, d'autant plus que la surface d'épicéa diminue (Alderweireld et al., 2015).

2.4.2) Sylviculture et productivité

En 2021, le douglas wallon présentait un volume sur pied de 7 818 616 m³, ce qui est certes moins que l'épicéa avec ses 48 millions de m³ mais plus que les autres résineux comme le mélèze ou le pin. Or, le douglas est le résineux le moins récolté en Wallonie. De fait, avec un accroissement de 395 849 m³/an et une récolte de 221 925 m³/an, cela implique un taux de récolte de 56%. La moyenne des résineux étant de 122% avec notamment 138% pour l'épicéa, 120% pour le pin et 97% pour le mélèze, le douglas fait figure d'exception. Son taux est même inférieur à certains feuillus comme les chênes indigènes (62%), le hêtre (79%) et le peuplier (117%) (OEWB, 2021). Le douglas est donc en train d'être capitalisé en Région wallonne. Ceci peut toutefois s'expliquer par le fait que la majorité des individus ont moins de 30 ans.

En raison de sa productivité élevée, le douglas possède un accroissement moyen périodique en circonférence de 2,3 cm/an en Wallonie, ce qui équivaut à une largeur de cerne de 3,7 mm. La figure 1 en annexe C renseigne sur cet accroissement en fonction de la classe d'âge. Un élément à noter est qu'entre 20 et 29 ans, l'accroissement peut atteindre 5 cm/an, soit une largeur de cerne de 8 mm. En termes d'accroissement courant en circonférence et moyen en surface terrière, le douglas varie respectivement de 1,9 à 3,2 cm/ha/an et de 1,17 à 2,3 m²/ha/an selon l'âge et la classe de productivité. Pour comparer, l'épicéa oscille de 1,4 à 2,5 cm/ha/an et de 0,97 à 1,8 m²/ha/an (Perin et al., 2016). Compte tenu de sa grande productivité, le douglas est majoritairement en classe de productivité 1 (55% des peuplements) ou 2 (30% des peuplements) (Biévelet et al., 2007).

La sylviculture appliquée aux douglas est assez semblable à celle employée pour les épicéas. Il y a toutefois une tendance, observée depuis 1980, à effectuer des plantations à plus large écartement. Cette évolution est d'autant plus marquée chez les propriétaires privés qui, par conséquent, éclaircissent moins fort (Alderweireld et al., 2015). Il a été constaté que la première éclaircie est, dans certains cas, trop tardive. De fait, 17% des peuplements purs et 8% des peuplements mélangés entre 30 et 39 ans ne sont pas encore passés en première éclaircie. En forêt publique, l'élagage en hauteur concerne près de 25% des peuplements. Dans le privé, elle s'applique quasi uniquement aux jeunes peuplements purs. La notion d'arbre-objectif est très peu utilisée (moins de 10% des peuplements) (Biévelet et al., 2007).

2.4.3) Etat sanitaire du douglas en Wallonie

Au vu de sa productivité élevée, de ses propriétés mécaniques intéressantes, de sa grande capacité d'adaptation en Wallonie et de son potentiel d'avenir face aux changements climatiques, il n'est pas étonnant que la surface des douglasaies n'ait fait qu'augmenter. En ajoutant à cela l'épicéa qui subit les ravages des sécheresses et des scolytes (SRFB, n.d.), les sylviculteurs ont dû se tourner vers une autre essence. Cependant, depuis 2013, l'Observatoire Wallon de la Santé des Forêts (OWSF) et les différents acteurs forestiers

détectent des défoliations importantes dans de nombreux peuplements partout en Wallonie, ce qui remet en question l'avenir du douglas. Ces dégâts ont d'abord été imputés à la rouille suisse du douglas, *Phaeocryptopus gaeumannii*, un champignon originaire de l'ouest de l'Amérique du Nord. Ce champignon s'attaque aux aiguilles des années précédentes, ce qui provoque leur chute prématurée. La capacité photosynthétique de l'arbre est donc réduite et sa croissance est diminuée. L'infection n'entraîne que rarement la mort de l'individu mais elle le rend vulnérable aux pathogènes secondaires. Une combinaison d'attaque peut aboutir à des mortalités (OWSF, 2014).

En 2015, deux nouveaux agents pathogènes sont découverts. Il s'agit de *Sirococcus conigenus*², un champignon, et la cécidomyie des aiguilles de douglas (*Contarinia pseudotsugae*), un insecte originaire d'Amérique du Nord. A propos de *Sirococcus*, il provoque des malformations et des nécroses dans la partie centrale du rameau des individus infectés. La mort des jeunes plants est possible. Concernant la cécidomyie, elle ne s'attaque qu'au douglas. Cet insecte pond ses œufs sur les bourgeons lors du débourrement et les larves pénètrent ensuite dans les aiguilles de l'année. Ces dernières se déforment et adoptent une coloration allant du rouge au violet. Leur chute est ensuite inévitable. La Wallonie n'est pas la seule région impactée, le Nord-Est de la France et les Pays-Bas ont également rapporté des observations semblables (OWSF, 2016). La combinaison entre la rouille suisse, qui attaque les aiguilles des années précédentes, et la cécidomyie, qui infeste celles de l'année, ne laisse donc pas beaucoup d'aiguilles sur les rameaux. La Figure 5 montre les symptômes causés par ces trois ravageurs.

L'évolution de ces trois pathogènes a été différente selon leur nature. Les champignons, *Phaeocryptopus gaeumannii* et *Sirococcus conigenus*, n'ont pas eu de tendance claire car leur développement dépend notamment des conditions climatiques. En effet, en tant que champignon, ils ont besoin d'humidité pour croître. Ainsi, leur propagation a été facilitée par un été 2012 et un printemps 2013 particulièrement humides, alors que la sécheresse printanière de 2017 ne leur a pas été favorable. Quant à *Contarinia pseudotsugae*, sa population n'a cessé d'augmenter depuis 2015. Le pourcentage d'aiguilles présentant des galles est passé de 7,1% en 2015 à 33,2% en 2019. Les dégâts majeurs ont été détectés dans les plantations et les jeunes peuplements (moins de 30 ans). En 2020, la plupart des sites ont, en moyenne, perdu 66% des aiguilles de l'année précédente et quasi toutes les aiguilles de l'année n-2. Les trois ravageurs sont en cause mais également la sécheresse. Quant aux individus adultes, ils ont globalement bien résisté car aucun dépérissement n'a été signalé (OWSF, 2021).

² Il était déjà connu avant 2015 mais son lien avec le douglas n'était pas encore avéré

Rouille suisse



Cécidomyie



Sirococcus

Figure 5 : Symptômes observés sur douglas et causés par la rouille suisse (Bille, 2011), la cécidomyie (OWSF, n.d.) et *Sirococcus* (Schmitz et al., 2016)

2.5) Dendrochronologie

Ce mémoire est réalisé via une approche dendrochronologique. La dendrochronologie est "une science qui repose sur la mesure des largeurs des cernes annuels de croissance et sur leur datation précise" (Lebourgeois et Mérian, 2012). Cette science est en fait un regroupement de plusieurs disciplines qui utilisent l'information temporelle d'une série chronologique. Ainsi, il existe la dendroclimatologie qui reconstitue le climat passé, la dendrogéomorphologie qui s'intéresse aux éruptions volcaniques ou encore la dendroarchéologie qui permet de dater les constructions anciennes (Mérian, 2012a). Celle utilisée dans le cadre de ce travail est la dendroécologie qui utilise la largeur des cernes pour étudier l'impact du climat et de l'environnement sur la croissance des arbres.

Dans les forêts tempérées, un arbre produit chaque année une quantité de bois qui équivaut à un cerne et qui est fonction de sa physiologie et des conditions environnementales. Cook et Kairiukstis (1990) ont créé un modèle conceptuel linéaire qui reprend tous les facteurs

influençant la croissance. Ce modèle est décrit dans l'équation (1). R correspond à la chronologie observée et t est un indice temporel.

$$R_t = A_t + C_t + D1_t + D2_t + E_t \quad (1)$$

A fait référence à l'âge cambial. Cela représente la contrainte géométrique d'ajouter un volume de bois à une tige de rayon croissant. En règle générale, la période juvénile connaît une forte croissance. Après cette période, la dynamique de largeur de cerne est caractérisée par une exponentielle décroissante en fonction du temps, qui dépend toutefois de la compétition et des perturbations en forêt.

C regroupe toutes les variables climatiques communes à tous les arbres d'un peuplement. Parmi celles-ci figurent les précipitations, la température et le rayonnement qui peuvent influencer le stress hydrique, la photosynthèse, l'activité stomatique ou encore la longueur de la saison de végétation. La figure 2 en annexe D donne plus de détails sur les interactions entre ces différents facteurs. Les arrière-effets dus à la physiologie de l'espèce et les interactions entre le climat et les conditions écologiques locales sont également inclus.

$D1$ représente les perturbations internes indépendantes de l'environnement comme la sylviculture (éclaircies, élimination du sous-bois...) ou la sénescence des arbres dominants. Une propriété importante de $D1$ est que ces perturbations soient considérées comme des événements aléatoires dans l'espace et le temps. Ainsi, l'influence de ces événements sur la croissance d'un arbre ne sera pas semblable à cette même influence sur un autre arbre. Dans une forêt fermée contenant une trouée, les individus proches de cette trouée bénéficieront de plus de lumière et de nutriments pour croître, alors que ceux éloignés ne seront pas impactés.

$D2$ désigne les perturbations externes d'origine environnementale ou anthropique comme les incendies, les sécheresses, les tempêtes, les agents pathogènes, la pollution ou encore le gel. Contrairement à $D1$ où les effets diffèrent selon les individus, ces événements touchent les peuplements en entier. Un synchronisme temporel peut donc être observé sur la croissance.

E correspond à la variance résiduelle de la croissance qui n'est pas expliquée par les autres termes. Des sources probables de E sont les différences de microsite dans un peuplement, les gradients dans les caractéristiques du sol et dans l'hydrologie, ou encore les erreurs de mesure. La Figure 6 résume les différents éléments du modèle.

Il faut néanmoins préciser que le modèle proposé par Cook et Kairiukstis (1990) est strictement théorique car il présente les effets propres de chaque catégorie comme une simple addition. En réalité, les interactions entre les différents facteurs sont primordiales. Dans son schéma, Mérian cite : la variation de la sensibilité au climat selon l'âge (1) et selon

la sylviculture (2), ainsi que la variation de la résistance aux perturbations avec les caractéristiques du peuplement (3).

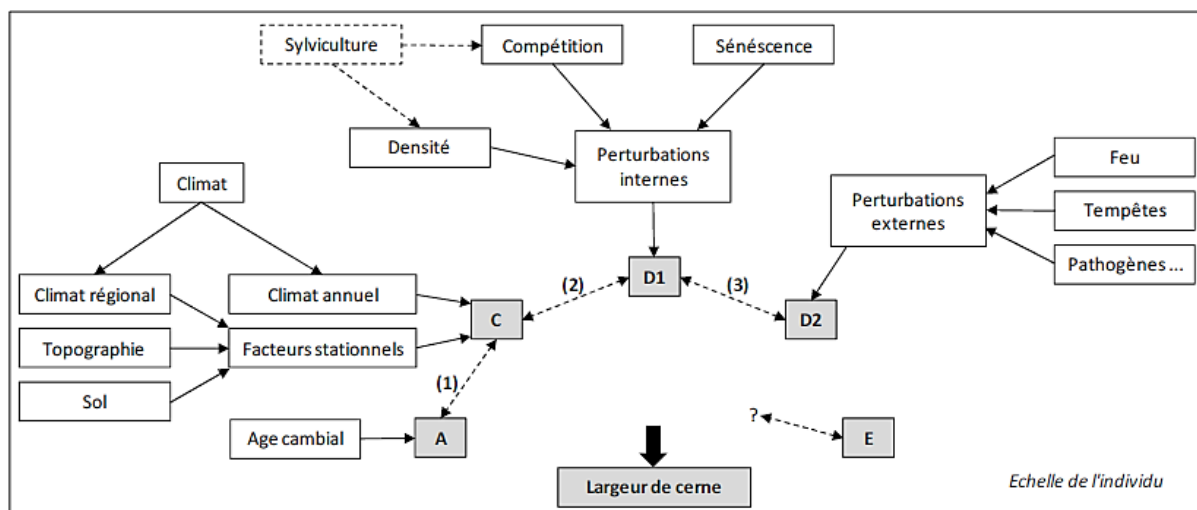


Figure 6 : Synthèse des facteurs influençant la variabilité de la largeur de cerne (Mérián, 2012a)

Un travail comportant une étude dendroécologique se divise, en général, en sept étapes décrites brièvement ci-dessous.

2.5.1) Etape 1 : Choix des gradients, placettes et arbres échantillonnés

Cette étape est assez flexible car les choix à faire dépendent de l'objectif de l'étude, des moyens humains et financiers disponibles ou encore de l'erreur que le chercheur est prêt à accepter.

Un gradient écologique correspond à "une variation continue dans l'espace ou dans le temps d'un facteur écologique" (Mérián, 2012a). Ce facteur peut être climatique comme la température ou les précipitations, ou pédologique comme la profondeur du sol ou la capacité de rétention de l'eau. En positionnant les chronologies de croissance le long de ces gradients, il est possible d'analyser la corrélation entre les deux et ainsi, déterminer le niveau de dépendance des arbres à ce facteur.

Concernant le choix des arbres, plusieurs éléments sont à prendre en considération comme le nombre total d'arbres échantillonnés, le compromis entre le nombre d'arbres et de peuplements échantillonnés, le nombre de carottes par arbre et le statut social des arbres sélectionnés.

2.5.2) Etape 2 : Prélèvement des échantillons

Les échantillons prélevés sur un arbre peuvent être de deux sortes : une carotte ou une rondelle. La carotte est la méthode la plus souvent utilisée dans les études dendrochronologiques car elle est plus simple, plus rapide et moins destructrice. Le désavantage majeur est le risque d'avoir un défaut sur la carotte, ce qui peut rendre la lecture compliquée. En outre, la finesse de celle-ci (5 mm de diamètre) la rend facilement cassable.

La méthode impliquant une rondelle est moins fréquente car elle nécessite l'abattage de l'arbre. Toutefois, elle a plusieurs avantages comme une chronologie complète entre l'écorce et la moelle, une meilleure datation des cernes grâce à vision complète de l'anneau de croissance et une vision des anomalies de croissance (blessure, nœud) sur la section qui permet d'ajuster la direction du rayon de lecture (Fritts, 1976).

2.5.3) Etape 3 : Préparation des carottes et mesures des accroissements annuels

L'objectif de cette étape est de travailler la carotte afin de mettre en évidence les cernes de croissance pour faciliter la mesure de leur largeur. Pour ce faire, il existe deux types de méthode : celle directe qui consiste à obtenir une largeur de cerne par lecture de l'échantillon sous un microscope ou à partir d'une image scannée, et celle indirecte qui estime les limites de cerne à partir d'un profil densitométrique et en déduit les largeurs (Mérian, 2012a). La plus utilisée est une méthode directe appelée "semi-automatique".

2.5.4) Etape 4 : Interdatation et analyse des séries brutes de largeurs de cerne

L'interdatation est une étape cruciale car elle "permet de vérifier l'agencement synchrone des séries individuelles de croissance et ainsi d'attribuer à chaque cerne son année réelle d'élaboration" (Lebourgeois et Mérian, 2012). Plusieurs erreurs sont possibles lors de la mesure des largeurs de cerne. Elles peuvent être d'origine anatomique comme un faux ou un double cerne, ou humaine comme un cerne compté deux fois ou l'oubli de l'un d'eux. Pour déceler ces éventuelles erreurs, l'idée est de vérifier le synchronisme d'années spéciales appelées "années caractéristiques" ou *pointer years* (PY). Ces dernières correspondent à des années où la croissance a été extrêmement faible ou élevée. Ce phénomène est souvent dû à des conditions climatiques limitantes comme une sécheresse intense, ou stimulantes comme de fortes précipitations (Bréda et Badeau, 2008). La réponse sera donc différente en fonction de la zone bioclimatique et de l'essence via ses traits fonctionnels et sa physiologie.

2.5.5) Etape 5 : Standardisation des séries brutes de largeurs de cerne

Pour comprendre le processus de standardisation, il faut d'abord connaître les différents signaux qui composent une chronologie. Ces signaux sont au nombre de trois (basse, moyenne et haute fréquence) et représentent des échelles temporelles et des événements distincts (Lebourgeois et Mérian, 2012). La Figure 7 les schématise sur une chronologie.

Signal basse fréquence – échelle multi-décennale

Ce signal intègre les tendances de croissance à (très) long terme dues à l'âge (décroissance biologique), mais également aux variations lentes et continues des conditions environnementales (évolution de la sylviculture, pollutions atmosphériques, dérive climatique...).

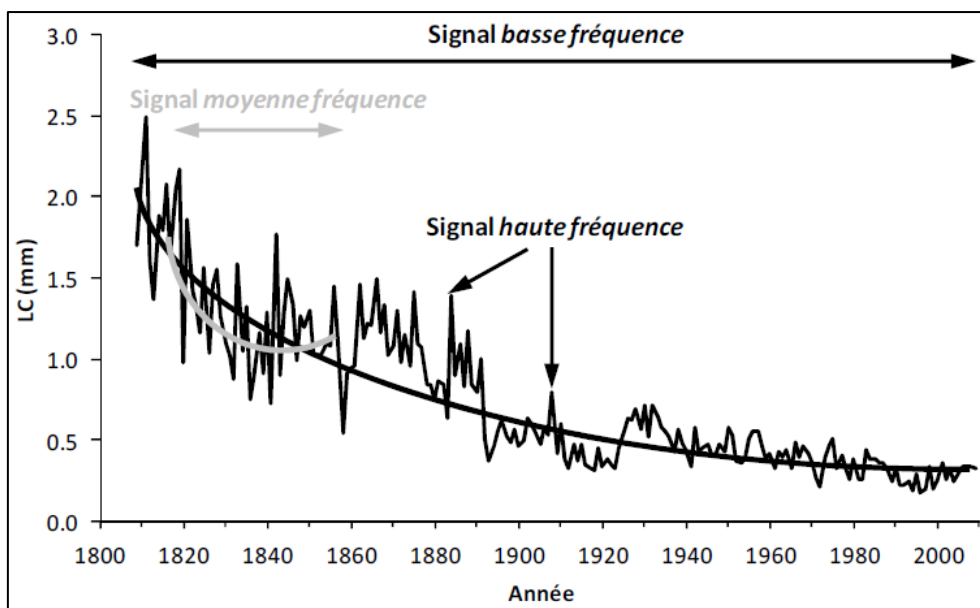


Figure 7 : Illustration des trois fréquences de signal sur une chronologie (Lebourgeois et Mérian, 2012)

Signal moyenne fréquence – échelle décennale

Ce signal comprend les tendances de croissance sur plusieurs années (5 à 30 ans). Ces variations peuvent être à nouveau d'origine climatique (crises de croissance dans le cas de sécheresses répétées, d'arrière-effets...), mais également d'origine sylvicole (forte éclaircie, éclaircie sélective...), ou liées à des phénomènes de dépérissement.

Signal haute fréquence – échelle interannuelle

Ce signal inclut les variations annuelles de croissance. Celles-ci concernent la physiologie de l'espèce et ont pour origine les fluctuations interannuelles des conditions environnementales telles que le climat (facteur principal) et les perturbations ponctuelles comme les incendies ou les attaques de pathogènes.

Le plus souvent, une étude dendroécologique se fonde sur la relation entre la croissance et le climat, défini comme les variations climatiques interannuelles. Le but de la standardisation est donc de supprimer les effets des signaux basse et moyenne fréquence, considérés comme du bruit, pour ne conserver que celui haute fréquence. Il est bien sûr possible de s'intéresser à d'autres signaux, tout dépend des objectifs du travail. La standardisation permet aussi d'uniformiser les séries. De fait, selon Nicault et al (2011), les chronologies sont généralement de longueur différente et montrent des différences de croissance liées à l'âge. Laissées telles quelles, cela provoquerait des variations artificielles dans la chronologie moyenne. Pour supprimer ces impacts de l'âge et de la croissance, l'idée est donc de transformer les valeurs de largeurs de cerne en indices adimensionnel uniforme avec des moyennes comparables.

2.5.6) Etape 6 : Calcul de la chronologie moyenne

La chronologie moyenne standardisée (CRN) est celle qui sera confrontée aux données climatiques pour évaluer la sensibilité de l'arbre. Elle correspond à la moyenne de toutes les chronologies obtenues pour un même site. La figure 3 en annexe E résume les six étapes décrites jusqu'ici.

2.5.7) Etape 7 : Calcul des fonctions de réponse et de corrélation

L'objectif de cette étape finale est de comparer les données de croissance avec des données météorologiques pour estimer la sensibilité des arbres au climat. Cette sensibilité étant fonction de plusieurs facteurs climatiques, Fritts (1976) a développé une approche, appelée fonction de réponse, permettant d'étudier simultanément l'impact de ces différents facteurs et de leurs colinéarités en utilisant une analyse en composantes principales.

Cependant, l'inconvénient majeur de cette méthode est qu'il faut choisir en amont les facteurs climatiques à tester en même temps, ce qui complexifie l'interprétation des résultats comprenant les effets mélangés de ces facteurs. Blasing et al (1984) ont donc proposé une autre approche, appelée fonction de corrélation, qui permet d'effectuer les analyses facteur par facteur. Bien que l'interprétation soit plus simple, la précision est moindre car cette méthode ne reposant plus sur l'ACP, la proportion de corrélations significatives est diminuée. Néanmoins, Blasing et al (1984) signalent que les deux approches montrent des résultats semblables, surtout pour les facteurs climatiques les plus influents. Quant aux avantages de la fonction de corrélation, ils sont multiples : une compréhension plus facile car directe de l'effet de chaque facteur climatique sur la croissance radiale, des résultats moins dépendants de choix subjectifs a priori des analyses, une répétabilité plus facile et une meilleure détection des effets de dissimulation entre facteurs (Lebourgeois et Mérian, 2012).

Un autre problème, concernant la fonction de réponse et de corrélation, est apparu et concerne le nombre limité d'observations. Généralement, l'enregistrement des données climatiques est assez récent et ne dépasse pas 150 ans. En raison de ce nombre réduit d'observations, les données ne sont pas assez nombreuses pour donner des corrélations significatives. Pour pallier ce problème, une autre approche, se basant sur la technique de rééchantillonnage de Efron (1979), a été développée par Guiot (1991) et porte le nom de procédure de type "Bootstrap". Celle-ci permet de réitérer un grand nombre de fois les opérations et ainsi obtenir un nombre suffisant de données.

3) Matériels et méthodes

3.1) Sites d'étude

3.1.1) Sélection des peuplements

Six peuplements de douglas répartis en Ardenne ont été échantillonnés pour la réalisation de cette étude. Ces peuplements ont été sélectionnés sur base d'une série de critères repris dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Critères de sélection des peuplements

Catégorie	Critère	Source
Climat	Zone bioclimatique Ardenne centro-orientale, Basse et moyenne Ardenne ou Haute Ardenne	Carte bioclimatique de Wallonie (Van der Perre et al., 2015)
	Zone climatique définie sur base de P-ETP annuel : P-ETP < 380 mm	IRM (données journalières 2009-2018)
Topographie	Pente < 7%	Modèle Numérique des Pentes et observations de terrain
	Pas en fond de vallée ou en bas de pente	
Sol	Sol de texture "G", drainage "b" ou "c" et développement de profil "b"	Carte Numérique des Sols de Wallonie (Bock et al., 2008)
	Charge de type schisteuse	
	Etage stratigraphique du Praguien ou du Lochkivien	(Joussement et al., 2020)
	RUM faible : - Sols caillouteux à très caillouteux (> 15%) - Peu profonds à très superficiels (< 80 cm)	Confirmation sur base d'un sondage à la tarière sur le terrain
Peuplement	Minimum 0,5 hectares	Informations fournies par le gestionnaire et mesures de terrain
	Douglas = minimum 80% en surface terrière	
	Plantés entre 1954 et 1973	
	Situés le long d'un gradient de densité	

Concernant les critères climatiques, les peuplements échantillonnés sont situés dans les zones bioclimatiques Basse et moyenne Ardenne, Ardenne centro-orientale ou Haute

Ardenne (Figure 8) car selon Alderweireld et al (2015), 73% des douglaiaies wallonnes s'y trouvent. Cela permet aussi d'avoir des sites avec des sols comparables (voir critères « sols »). Le critère pour la zone climatique a été défini grâce aux données journalières fournies par l'IRM et couvrant la période de 2009 à 2018. Celles-ci comptaient la somme des précipitations et l'évapotranspiration de référence (ET₀) calculée sur base de l'équation de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Par la suite, ET₀ va être assimilée à l'évapotranspiration potentielle (ETP), nécessaire pour calculer le déficit hydrique défini comme la différence entre les précipitations et l'ETP. La résolution spatiale est une grille de 5 x 5 km couvrant toute la Wallonie. Les données ont été extrapolées le long de cette grille à partir de plusieurs stations météo réparties sur le territoire. La valeur de 380 mm a été choisie car elle correspond au tiers inférieur de la distribution du déficit hydrique annuel moyen en Ardenne. Dans cette région, cet indicateur varie de 191 à 710 mm (figure 4 en annexe F). Ce choix a permis d'avoir une condition contraignante au niveau climatique et ainsi, augmenter les chances d'observer différentes réponses aux sécheresses en fonction de la densité.

Les critères liés à la topographie imposent que les peuplements aient une pente inférieure à 7% et ne soient pas situés en fond de vallée ou en bas de pente. Cela permet d'assurer que les apports d'eau se fassent uniquement via les précipitations. La pente a d'abord été estimée avec le Modèle Numérique des Pentes disponible sur WalOnMap, puis a été vérifiée sur le terrain au moyen d'un clinomètre.

Les critères de la catégorie sol ont pour but d'avoir des peuplements sur des sols avec un niveau trophique et une réserve en eau semblables. Pour ce faire, les sites ont été choisis grâce à la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW) et correspondent à des sols limono-caillouteux (G), à drainage favorable à modéré (b-c) et à horizon B structural (b). Ce type précis de sol n'a pas été choisi au hasard. En effet, il concerne près de 90% des douglaiaies wallonnes. Pour avoir un niveau trophique similaire, la nature de la charge caillouteuse des sites sélectionnés est de type schisteuse, ce qui correspond aux symboles "f, fi, F, FI, fp et fq" sur la CNSW. Si cet élément n'est pas indiqué, la nature de la charge des polygones voisins doit être de ce type. A propos du niveau hydrique, les sols ont une réserve en eau utile maximale (RUM) faible, c'est-à-dire qu'ils sont caillouteux à très caillouteux avec une charge en éléments grossiers > 15%, et peu profonds à très superficiels (< 80 cm). Ces deux aspects ont été contrôlés au moyen de sondages à la tarière effectués à différents endroits dans le peuplement. Comme pour la zone climatique, ceci a été décidé afin d'avoir une condition contraignante mais au niveau du sol cette fois-ci. Le dernier élément concerne le substrat géologique. Ce dernier exerçant une influence sur la disponibilité en minéraux dans le sol (phosphore et magnésium principalement), il peut impacter le niveau trophique. Pour minimiser les différences, les sites sélectionnés sont situés sur les étages stratigraphiques du Praguien et du Lochkovien. Ceci a pu être vérifié grâce aux données fournies par Joussement et al (2020).

Finalement, la catégorie peuplement demande que les peuplements fassent au moins 0,5 ha et que les douglas y représentent au minimum 80% de la surface terrière. Ils doivent également avoir été plantés entre 1954 et 1973. Cette tranche d'âge réduite a été définie pour limiter l'effet de l'âge sur la réponse du douglas au climat. Comme mentionné dans l'introduction, un des objectifs secondaires de cette étude est de voir si la densité des peuplements a un impact sur la réaction du douglas au climat. Pour cela, l'idée était de sélectionner des peuplements le long d'un gradient de densité.

3.1.2) Caractérisation des peuplements

Pour caractériser dendrométriquement les peuplements, quatre placettes circulaires de sept ares ont été installées dans chacun d'eux. Leur centre a été géolocalisé avec un GPS. En cas de surface insuffisante, seulement trois placettes ont été mises en place. C'était notamment le cas pour LI2 et VI1 qui faisaient tout juste 0,5 ha. La taille des placettes a été déterminée pour faire en sorte qu'elles contiennent au minimum 10 arbres chacune. Ceci a toujours été respecté à l'exception d'une des quatre placettes de LI1 qui n'en comportait que neuf. Les mesures dendrométriques prises étaient la circonférence à 1,3 m de chaque arbre ainsi que la hauteur dominante, celle-ci étant définie comme la hauteur de l'arbre dont la circonférence se rapproche le plus de la circonférence dominante. Cette dernière équivaut à la moyenne arithmétique des circonférences des 7-1 plus gros arbres de la placette.

La surface terrière à mi-rotation ($G_{mi-rotation}$) a été utilisée comme indicateur car la comparaison des densités n'est possible que si la rotation est au même stade. De fait, un peuplement qui fait, par exemple, 40 m²/ha juste avant éclaircie est géré de façon moins dense qu'un peuplement qui fait 40 m²/ha juste après éclaircie. L'emploi de la $G_{mi-rotation}$ nécessite néanmoins le calcul supplémentaire décrit dans l'équation (2). Puisqu'il s'agit de peuplements de résineux, la rotation considérée est de six ans, c'est pourquoi le chiffre trois apparaît dans l'équation. Le Tableau 4 reprend les résultats obtenus.

$$G_{mi-rotation} = G + ((3 - A) * AMG) \quad (2)$$

Avec

- G = surface terrière actuelle mesurée via les circonférences d'arbres sur plusieurs placettes d'échantillonnage [m²/ha]
- A = nombre d'années depuis la dernière éclaircie [an] (information fournie par les gestionnaires)
- AMG = accroissement moyen en surface terrière suivant l'âge et la classe de fertilité [m²/ha/an] (Perin et al., 2016)

Grâce à ces mesures dendrométriques récoltées, tous les peuplements ont pu être positionnés par rapport aux normes sylvicoles. La première concerne la classe de productivité. Elle a été déterminée de façon automatique via le site de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech (ULG, n.d.) qui se base sur les données de Perin et al (2014). Connaissant leur classe de

productivité, il a été possible de situer les peuplements par rapport aux tables de production correspondantes (Perin et al., 2016). Les résultats sont disponibles sur la figure 5 en annexe G. La figure 6 en annexe H permet de comparer les peuplements entre eux en fonction de leur surface terrière actuelle et de leur hauteur dominante.

Le Tableau 4 rassemble différentes informations sur les peuplements, dont l'âge, l'altitude, la fertilité, la hauteur dominante, la surface terrière actuelle (celle calculée avec les circonférences) et la circonférence moyenne arithmétique. Une attention particulière est néanmoins à porter sur la date de plantation. Celle a été fournie par le gestionnaire, privé ou public, de chaque peuplement mais elle semble incorrecte pour TI1. De fait, ce peuplement a été planté en 1972 mais selon le Tableau 6, la chronologie commence en 1969, ce qui est incohérent. Bien que ce problème ne concerne que TI1, il est possible que les dates de plantation des autres peuplements soient erronées également. Ce constat est potentiellement explicatif du fait que la classe de fertilité soit différente (entre 1 et 3) entre les peuplements alors qu'ils ont été sélectionnés sur base de critères communs (hormis la densité). L'âge étant nécessaire pour déterminer la fertilité, une erreur sur celui-ci entraîne une erreur sur cette dernière. Une imprécision expérimentale est également possible, notamment lors de la mesure de la hauteur dominante. En effet, dans les peuplements les plus denses, il était parfois difficile de repérer l'apex des arbres avec précision.

Tableau 4 : Caractéristiques générales des peuplements

Site	Age [an] (date de plantation)	H dom [m] (classe de fertilité)	Surface terrière ($G_{mi-rotation}$) [m ² /ha]	Tiges/ha	C moy arith [cm]	Altitude [m]	Type de sol
CDS	49 (1973)	39 (1)	36,3 (34,4)	182	157,1	350	Gbbf2
TI2	58 (1964)	35 (3)	35,8 (35,8)	200	153,7	470	Gbbfi2
LI1	54 (1968)	38 (2)	34,8 (36,4)	161	163,6	410	Gbbfi2
LI2	57 (1965)	38 (2)	38,1 (39,8)	176	163,3	410	Gbbfi2
VI1	49 (1973)	33 (3)	44,1 (40,9)	300	148,9	500	Gbbfi2
TI1	50 (1972)	41 (1)	53,9 (52,1)	314	145,2	470	Gbbfi2

La Figure 8 situe les six peuplements sélectionnés. Il y a un près de Couvin (CDS), deux dans le cantonnement de Libin (LI1 et LI2), deux près de Tintange (TI1 et TI2) et un dans le cantonnement de Vielsalm (VI1). Le plus vieux peuplement date de 1964 (TI2) et les plus jeunes ont été plantés en 1973 (CDS et VI1). Les sites LI1, LI2 et VI1 sont situés en forêt publique alors que les trois autres appartiennent à des propriétaires privés. Les peuplements coïncident avec tous les critères. Une nuance est toutefois à apporter sur celui concernant le déficit hydrique et sera abordée dans le point 3.2 à la page 26.

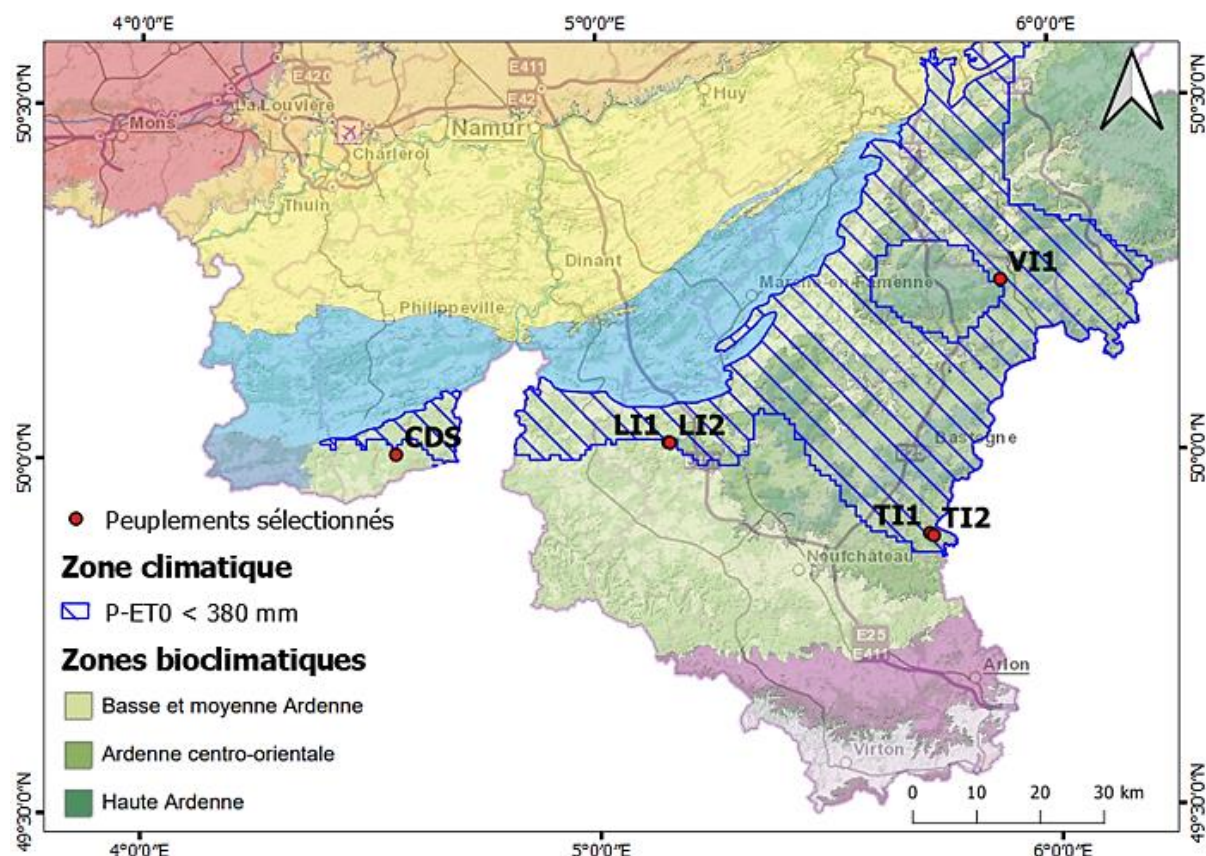


Figure 8 : Localisation des peuplements en Wallonie

3.2) Données météo

Les données météo utilisées dans cette étude ont été fournies par l'IRM. Elles comptent des valeurs journalières de précipitations et de températures minimales, moyennes et maximales depuis 1954. En outre, des valeurs journalières pour l'humidité relative, l'évapotranspiration de référence, la vitesse du vent et le rayonnement étaient à disposition depuis 1961. Ces données ont été obtenues de la même manière que celle décrite dans le point 3.1.1 à la page 22, mais pour une autre période temporelle. Comme le montre la Figure 8, les peuplements de Libin et ceux de Tintange sont très proches géographiquement parlant. Il n'a donc pas été possible de les distinguer du point de vue météorologique puisque le point de la grille le plus proche était le même pour LI1-LI2 et pour TI1-TI2. A partir de maintenant et lorsque des données météo seront utilisées, LI fera référence à LI1 et LI2 et TI vaudra pour TI1 et TI2.

La Figure 9 compare les sites au niveau de la température moyenne annuelle et de la somme des précipitations annuelles. Les données utilisées sont comprises entre 1954 et 2020. Conformément à leur altitude (Tableau 4), CDS est, en moyenne, plus chaud et moins arrosé.

Comme expliqué dans le point 2.1.1 à la page 3, le GIEC prévoit une augmentation globale pour les températures ainsi qu'une augmentation des précipitations hivernales [janvier-mars] et une diminution des précipitations estivales [juillet-septembre]. Ces prévisions sont confirmées par la figure 7 en annexe I pour les températures et par la Figure 10 pour les précipitations. Ces graphes montrent uniquement les données de CDS mais la situation est la même pour les autres sites. La diminution des précipitations estivales n'est pas fort marquée, contrairement au cas hivernal où l'augmentation est bien visible. Toutefois, depuis 2014, la tendance s'accroît.

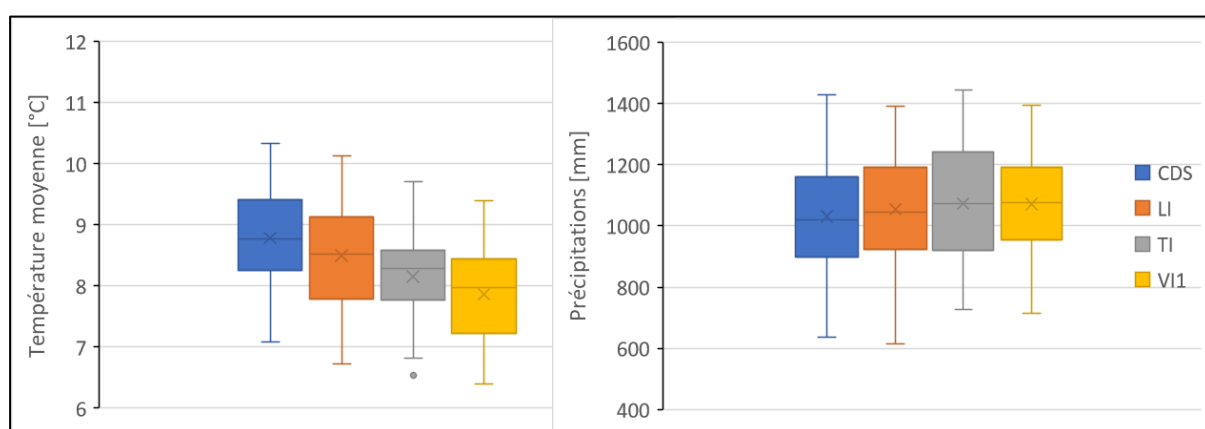
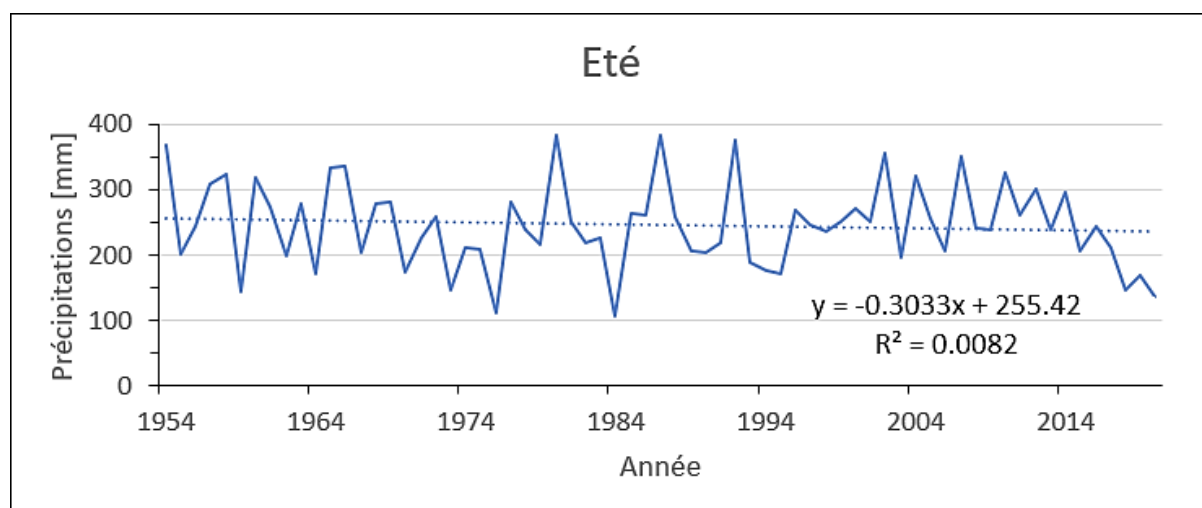


Figure 9 : Comparaison des sites selon la température moyenne annuelle (gauche) et les précipitations totales annuelles (droite) sur la période 1954-2020



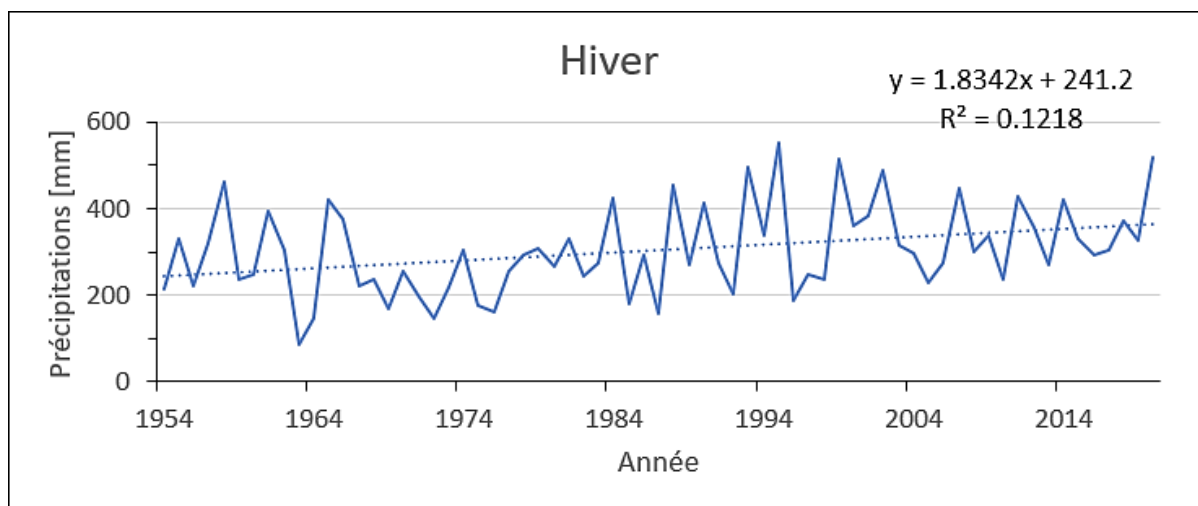


Figure 10 : Evolution des précipitations estivales [juillet-septembre] et hivernales [janvier-mars] pour le site CDS et sur la période 1954-2020

La figure 8 en annexe J représente les diagrammes ombrothermiques pour chaque site. Les données couvrent la période 1954-2020. Le même exercice a été effectuée mais avec les cinq dernières années disponibles, soit de 2016 à 2020. Le résultat pour CDS est visible sur la figure 9 en annexe K. La baisse des précipitations estivales et la hausse des précipitations hivernales sont bien marquées. Les conclusions sont semblables pour les autres sites.

Grâce aux données de précipitations et d'ETP, les valeurs pour P-ETP ont pu facilement être calculées en faisant juste la différence entre les deux. La Figure 11 montre le P-ETP moyen annuel pour chaque site. Puisque les valeurs d'ETP n'étaient pas disponibles avant 1961, ces résultats s'appliquent pour la période 1961-2020. Un des critères climatiques pour la sélection des peuplements (cfr point 3.1.1 à la page 22) imposait qu'ils soient compris dans une zone avec un P-ETP moyen inférieur à 380 mm. Or, selon cette figure, ils sont tous supérieurs à 400 mm. Ceci peut s'expliquer par deux raisons. La première est que l'échelle temporelle n'est pas comparable. De fait, les données utilisées pour définir ce seuil de 380 mm couvrent une période allant de 2009 à 2018 (Tableau 3). De plus, celle-ci est connue pour compter plusieurs sécheresses successives comme celle de 2003, 2011 ou encore 2018. La seconde est que, comme le montre la Figure 8, tous les peuplements sont situés en bordure de la zone climatique considérée. Ce faisant, ils peuvent être influencés par les zones voisines et peuvent donc présenter des valeurs supérieures aux attentes.

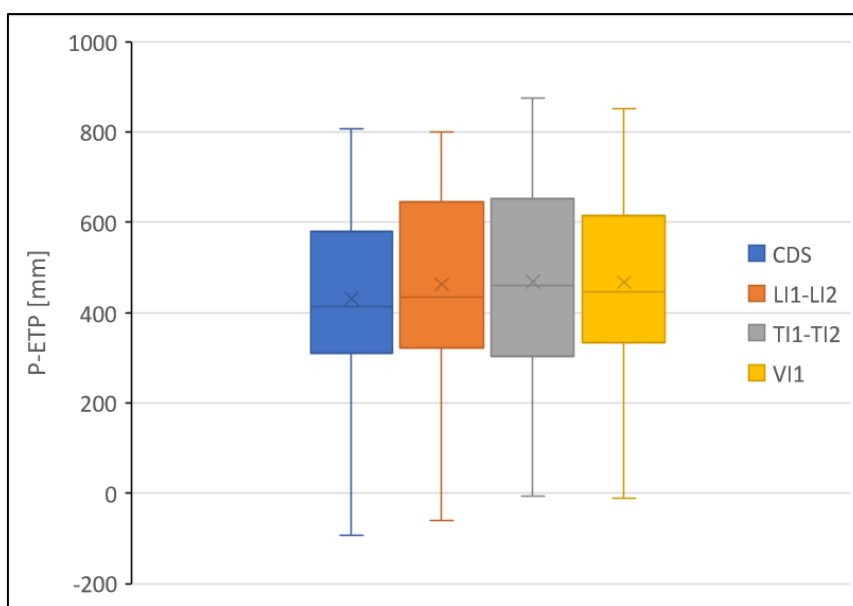


Figure 11 : Comparaison des sites selon le déficit hydrique climatique annuel sur la période 1954-2020

3.3) Campagne d'échantillonnage

Les peuplements choisis selon les critères du point 3.1.1 à la page 22 ont été visités afin de réaliser la campagne d'échantillonnage. Elle a commencé le 11 mai 2021 avec LI2 et s'est terminée le 17 août 2021 avec LI1. Elle était composée de trois étapes : la prise de mesures dendrométriques (décrite dans le point 3.1.2 à la page 24), la sélection des arbres à carotter et le carottage des arbres sélectionnés.

3.3.1) Sélection des arbres

La deuxième étape a permis de sélectionner 15 arbres par peuplement. Pour obtenir une chronologie représentative, Lebourgeois et Mérian (2012) recommandent d'échantillonner 20 à 30 arbres pour les espèces tolérantes à l'ombrage, et 6 à 10 pour les espèces héliophiles. Compte tenu du tempérament intermédiaire entre héliophile et tolérant à l'ombrage du douglas (Petit et al., 2017) et de la taille réduite de certains peuplements, il a été décidé d'échantillonner 15 arbres par peuplement. Ceux-ci ont été choisis dans le peuplement entier, indépendamment de leur appartenance aux placettes. L'objectif était d'étudier la réponse au climat avec le moins de bruit possible. Les individus devaient donc répondre aux critères suivants :

- Être dominants ou codominants : leur circonférence devait être supérieure à la circonférence minimale de l'ensemble des arbres dominants des placettes (c'est-à-dire les six plus gros arbres de chaque placette) ;
- Ne pas être situés en bordure du peuplement ;
- Être distants au minimum de dix mètres les uns des autres, avec des houppiers indépendants ;
- Présenter une défoliation de maximum 20% dans la partie supérieure du houppier.

Les arbres dominants ou codominants ont été privilégiés car traditionnellement, ce statut social a le plus souvent été préféré pour les études dendroécologiques. Leur croissance étant moins affectée par la compétition entre individus que les arbres dominés, le bruit engendré par cette compétition sera moins présent dans les chronologies des arbres dominants (Lebourgeois et Mérian, 2012). En outre, l'effet tampon engendré par la présence de plusieurs strates en forêt est important car il entraîne un accès inégal aux ressources et des micro-conditions variées. Les arbres dominés sont donc dans des conditions plus rigoureuses (Lebourgeois et al., 2012).

3.3.2) Carottage

Ces 15 arbres ont ensuite été numérotés et localisés avec un GPS. Leur circonférence à 1,3 m, hauteur, et épaisseur d'écorce ont également été mesurées. Concernant le carottage à proprement parler, deux carottes ont été prélevées par arbre à 1,3 m de hauteur au moyen d'une tarière de Pressler motorisée toujours dans les mêmes directions (Nord et Est) (Figure 12).



Figure 12 : Carottage à la tarière de Pressler à moteur (gauche) et extraction d'une carotte (droite)

La carotte a été préférée au prélèvement d'une rondelle car cette méthode est plus simple, plus rapide et moins destructrice. La hauteur a été fixée à 1,3 m car cela permet de faciliter le prélèvement et de diminuer les biais relatifs à l'effet de l'empatement et aux effets de la concurrence initiale subie par les arbres. Idéalement, le cœur de l'arbre a été visé en évitant les défauts visibles sur le tronc (nœud, gélivure, déformation) afin d'avoir la totalité des cernes. Cette quantité de deux carottes a été choisie car selon Lebourgeois et Mérian (2012), pour une essence héliophile, il faut au minimum sept arbres avec deux carottes par arbre pour obtenir des chronologies significatives. La combinaison quinze arbres – deux carottes utilisée ici est donc suffisante. De plus, il sera toujours préférable de réduire le nombre de carottes prélevées pour diminuer les dégâts infligés aux arbres. En cas de carotte inutilisable, une troisième a été prélevée. Ceci est arrivé plusieurs fois lorsqu'un nœud était présent sur la carotte, ce qui rend la lecture des cernes compliquée et incomplète. Il y avait donc 30 carottes par peuplement, ce qui fait un total de 180. Celles-ci ont été placées dans des lattes en bois

pour les faire sécher et les transporter sans les casser. Afin de limiter au maximum les risques d'infection, la mèche de la tarière a été désinfectée entre chaque arbre. Le trou engendré a été rebouché à l'aide de baguettes de bois traitées au fongicide et le tout a été recouvert de baume cicatrisant (Figure 13).



Figure 13 : Rebouchage d'un trou avec une baguette en bois traitée et du baume

3.4) Traitement des carottes

3.4.1) Mesure des cernes

Les carottes prélevées dans les différents peuplements ont été ramenées au laboratoire afin d'être traitées. Pour la première étape, les carottes ont d'abord été planées afin de faire apparaître clairement les cernes. La réhumidification de ces dernières a permis de faciliter l'opération. Pour ce faire, un microtome a été employé (Figure 14).

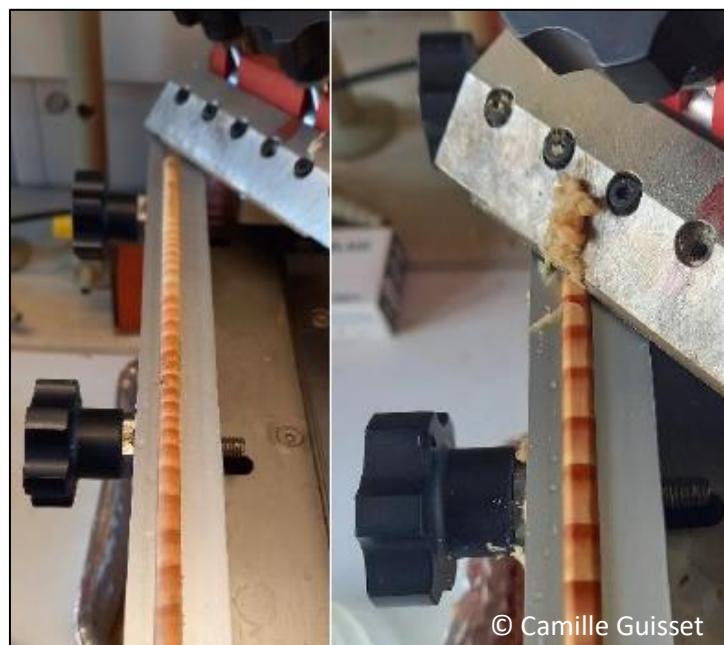


Figure 14 : Planage d'une carotte au microtome

Ces carottes planées ont ensuite été scannées à haute résolution pour pouvoir mesurer les cernes plus aisément sur ordinateur avec le logiciel CooRecorder (Maxwell et Larsson, 2021). Ce dernier offre la possibilité de mesurer automatiquement les cernes situés entre un cerne de départ et un cerne d'arrivée fixés par l'utilisateur. Cette opération n'est toutefois réalisable que lorsque les cernes sont parfaitement parallèles car la direction de mesure doit rester constante. La précision des mesures est de l'ordre du 1/100 de mm. En cas de carotte ne passant pas par le cœur, ce qui était le cas pour la majorité d'entre elles, une option permet de superposer à l'image scannée une mire composée de cernes concentriques. La largeur de ceux-ci est égale à la moyenne des largeurs des cinq derniers cernes mesurés sur la carotte. L'utilisateur doit alors placer cette mire de sorte que les cernes de la carotte correspondent au mieux avec ceux de la mire. Ce faisant, il devient possible d'estimer où se trouve le cœur ainsi que le nombre de cernes manquants.

3.4.2) Interdatation

Grâce à CooRecorder, des chronologies brutes ont été obtenues. La qualité de leur interdatation a premièrement été vérifiée avec CDendro (Maxwell et Larsson, 2021). Ce logiciel permet de créer une chronologie de référence utilisable dans CooRecorder après avoir construit quelques séries chronologiques (cinq dans cette étude). Plus concrètement, lorsque cinq séries ont été réalisées, CDendro en fait la moyenne et sort une chronologie de référence. Celle-ci peut ensuite servir pour construire les chronologies restantes en mesurant la corrélation entre les deux. Une corrélation faible notifie sur une éventuelle erreur lors de la mesure des largeurs de cerne et l'utilisateur peut aller vérifier au microscope la carotte en question. En outre, cela sert de repère visuel pour détecter les erreurs lors de la mesure des chronologies suivantes. La Figure 15 montre la superposition entre la chronologie de référence (ligne noire) et la chronologie de la carotte en train d'être mesurée (ligne rouge). La corrélation de 0,79 entre les deux suggère que la synchronisation est bonne et que les cernes ont été bien mesurés.

La qualité globale de l'interdatation a été vérifiée à l'aide du programme COFECHA (Holmes, 1983). Celui-ci applique plusieurs transformations successives à chaque chronologie pour réduire le bruit. L'interdatation en tant que tel se fait en comparant les chronologies individuelles avec celle de référence, qui contient donc toutes les séries à l'exception de celle qui est confrontée. Les détails plus précis du fonctionnement de COFECHA sont disponibles en annexe L (Grissino-Mayer, 2001).

Il n'existe pas de seuil au niveau de la corrélation pour affirmer qu'une chronologie est bien interdatée ou non car cela dépend de nombreux facteurs comme l'espèce, la localisation géographique, l'homogénéité des sites, la compétition, le degré de perturbation au sein du peuplement ou encore la sensibilité des arbres aux facteurs environnementaux. L'utilisateur est donc libre de décider si les corrélations obtenues sont satisfaisantes ou non. COFECHA utilise le terme "intercorrélation" pour désigner la corrélation moyenne de toutes les séries.

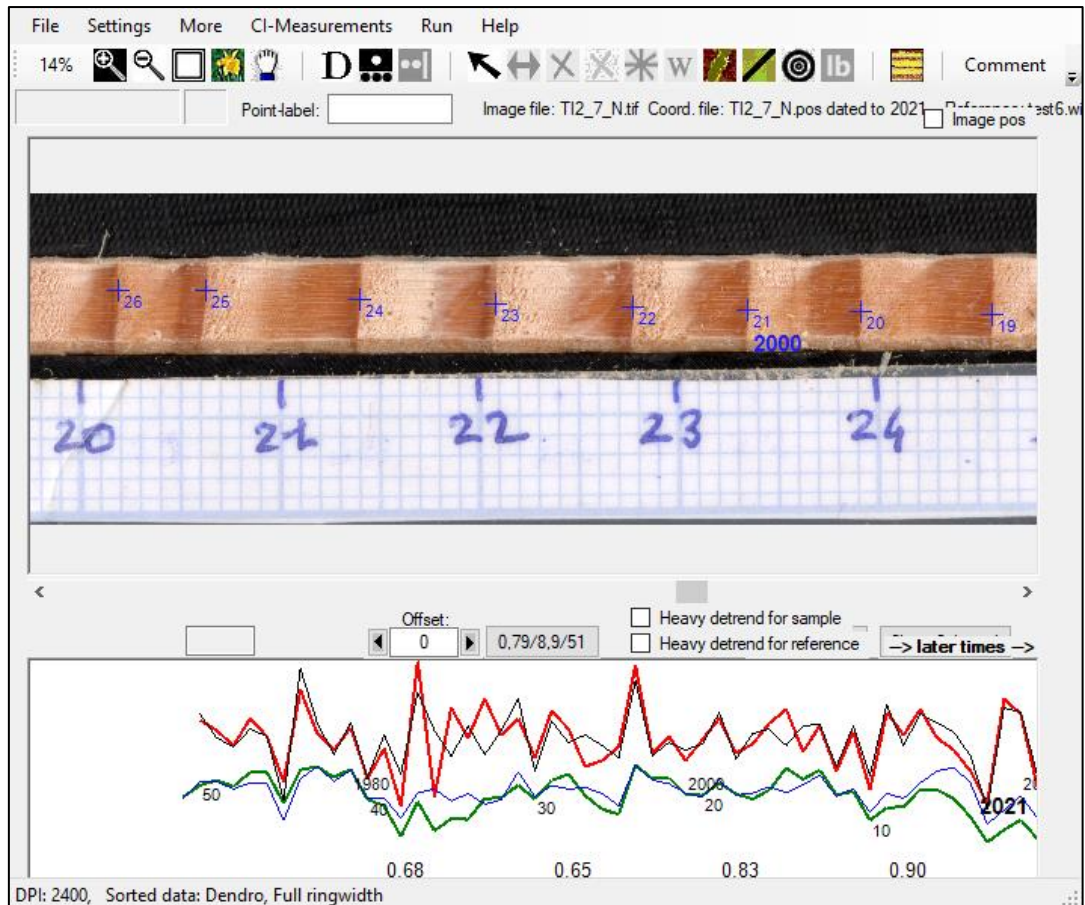


Figure 15 : Interface du logiciel Coorecorder. Courbe noire = chronologie de référence et courbe rouge = chronologie de la carotte en train d'être mesurée

3.4.3) Calcul des années caractéristiques

Pour pouvoir déterminer ces corrélations entre les chronologies, comme expliqué dans le point 2.5.4 à la page 19, COFECHA s'est basé sur les années caractéristiques ou *pointer years* (PY). Plusieurs méthodes existent pour les détecter. Une étude menée par Jetschke et al (2019) a analysé les méthodes employées dans 130 publications sorties entre 1998 et 2018. Il en résulte que quatre d'entre elles sont utilisées dans 91% des articles.

Normalization in a moving window (NW) – 35%

Cette méthode, introduite par Cropper (1979), consiste en la création de séries temporelles composées de valeurs dites "de Cropper" (C_t) obtenues en normalisant les chronologies individuelles sur une fenêtre mobile ($\pm n$ années), chaque année étant placée comme point central. Les valeurs de Cropper témoignent des variations en termes d'écarts-types par rapport à la moyenne locale et sont calculées pour chaque année. Préférentiellement, une fenêtre de 13 ans (n) est employée sur des données standardisées. Individuellement, Cropper utilise un seuil de $|C_t| = \left| \frac{R_t - \bar{R}_t^n}{sd_t^n} \right| \geq 0,75$ pour considérer qu'un arbre présente une PY. R_t correspond à la largeur de cerne de l'année t et $\bar{R}_t^n$ équivaut à la moyenne des n largeurs de

l'année t (avec son écart-type sd_t^n). Globalement, il faut que minimum 75% (5) des arbres dépassent ce seuil pour que l'année en question soit jugée comme PY.

Interval trend (IT) – 19%

En définissant $R_{i,t}$ comme la largeur de cerne d'un arbre i pour l'année t , l'IT individuelle absolue peut être écrite comme

$$g_{i,t} = \begin{cases} 1 & R_{i,t} - R_{i,t-1} > 0 \\ 0,5 & \text{si } R_{i,t} - R_{i,t-1} = 0 \\ 0 & R_{i,t} - R_{i,t-1} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

L'IT globale pour une population de N arbres peut donc être définie comme

$$IT_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_{i,t} \quad (4)$$

En supprimant la possibilité de cernes constants ($g_{i,t} = 0,5$) via une mesure plus précise pour plus de simplicité, IT_t représente la proportion d'arbres avec une IT positive et $1 - IT_t$, la proportion d'arbres avec une IT négative. Une année est considérée comme PY positive ou négative si IT_t ou $1 - IT_t$ dépasse un certain seuil IT_C . Il est conseillé de le fixer à 95%. Il est également possible d'ajouter un seuil supplémentaire (q) afin d'accentuer les tendances. Le principe est de ne prendre en compte les données que si la variation absolue relative de largeur de cernes dépasse q . Cette approche fonctionne avec les données brutes et permet, entre autres, de repérer des années isolées de croissance très faible ou très élevée via une paire d'années indicatrices ultérieures de signe opposé. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est qu'elle compare deux années successives. Ainsi, si l'année $n-1$ comprend une sécheresse intense, elle sera catégorisée comme PY négative. Dans cette situation, l'année n sera souvent considérée comme PY positive car c'est relatif à l'année $n-1$ mais cela ne veut pas forcément dire que les conditions de l'année n soient bénéfiques pour la croissance des arbres.

Relative growth change (RGC) – 19%

Le principe de cette méthode est de comparer la largeur de cerne d'une année t à la moyenne de celles des n années précédentes en les divisant. En fixant n à 1, cela revient à l'approche IT mais en le réglant à 4, cela permet d'obtenir le "Relative Event Year" défini par Schweingruber et al (1990). Ce concept nécessite deux seuils individuels, un pour les PY positives et un pour les négatives, E_+ et E_- . Une PY positive est déterminée quand la division est $\geq 1 + E_+$ et une négative est considérée quand la division est $\leq 1 - E_-$. Ces seuils sont préférentiellement fixés à 60 et 40% respectivement. Comme pour la méthode NW, il faut un minimum de 75% (5) d'arbres dépassant ces seuils pour qu'une année soit jugée comme PY.

L'approche RGC demande des données brutes et permet notamment de détecter les changements brusques de croissance sans tenir compte de la vitesse de récupération.

Extreme values of chronology (zChron) – 18%

Cette méthode se base sur le même principe que NW mais le facteur temporel est différent. En effet, au lieu de faire une comparaison par rapport à une fenêtre mobile de n années, toute la chronologie est prise en compte. Le seuil critique est défini comme $|z_t| = \left| \frac{R_t - \bar{R}}{sd} \right|$ et peut être fixé à ≥ 1 , $\geq 1,28$ et $\geq 1,645$ selon la sévérité souhaitée. Ces seuils correspondent à la proposition de Neuwirth et al (2007) de distinguer une PY faible, forte et extrême.

Ces quatre approches ont toutes un objectif propre et mettent en évidence différents aspects de la croissance. Par exemple, IT et zChron se basent sur la population entière alors que NW et RGC distinguent en plus les effets de chaque arbre. Il n'est donc pas possible de remplacer une méthode par une autre car elles montrent et utilisent toutes des éléments distincts. Chacune d'elles a donc été appliquée afin de capter une part plus grande des PY. Celles détectées avec différentes méthodes sont plus susceptibles d'être significatives et leurs causes probables ont été identifiées grâce aux informations de l'IRM (2015). Il peut d'agir de sécheresses, de gelées tardives ou encore de précipitations abondantes.

Les valeurs préférentielles ont été attribuées à chaque paramètre pour chaque méthode. Pour IT, $q = 0$ et $IT_c = 95\%$. Pour RGC, $n = 4$ et $S = 75\%$ mais E_+ et E_- n'ont pas été fixés à 60 et 40% car ces seuils ne donnaient aucun résultat. Il a donc été décidé de les réduire à 30 et 15%. Pour NW, $n = 13$, $C_t = 0,75$ et $S = 75\%$. Pour zChron, $z_t = 1$.

3.4.4) Standardisation

Puisque l'objectif de ce travail est d'étudier l'impact des variations interannuelles du climat sur la croissance, la standardisation a été réalisée de sorte à ne garder que le signal haute fréquence (cfr point 2.5.5 à la page 19). Pour savoir si les effets des signaux basse et moyenne fréquence étaient bien présents, l'allure des chronologies brutes (Figure 16) ainsi que l'autocorrélation du premier ordre (AC1) ont été prises en compte. L'AC1 est un indicateur correspondant au coefficient de corrélation entre une série de largeur de cernes et la même série décalée d'un an. Il quantifie donc l'effet de la persistance liée aux conditions conduisant à l'élaboration du cerne de l'année $n-1$ sur la mise en place du cerne de l'année suivante n . Concrètement, cet indicateur peut être utilisé pour évaluer la présence des signaux (Fritts, 1976). Ainsi, une AC1 élevée informe sur un important signal basse fréquence, et inversement. Ceci peut se voir visuellement avec une décroissance globale des chronologies. Ce cas de figure pourrait donc inciter le chercheur à effectuer, au moins, une première standardisation pour supprimer l'effet basse fréquence fort présent. La sensibilité moyenne (SM) (Biondi et Qeadan, 2008), pourcentage moyen de variation de largeur entre deux cernes consécutifs, a également été calculée via COFECHA et selon l'équation (5).

$$SM_i = \frac{2}{n-1} \sum_{k=1}^{k-1} \left| \frac{LC_{i(k+1)} - LC_{ik}}{LC_{i(k+1)} + LC_{ik}} \right| \quad (5)$$

Où LC_{ijk} correspond à la largeur de cerne de la carotte i pour l'année k et n traduit la longueur de la chronologie.

Concernant le signal moyenne fréquence, après inspection visuelle, tous les sites étaient également concernés. Ceci n'est pas étonnant puisqu'il s'agit exclusivement de peuplements gérés qui sont sujets à des éclaircies régulières. Finalement, tous les sites ont subi une "double standardisation" réalisée grâce à un script R développé par Mérian (2012b) et utilisant les packages dplR (Bunn, 2008), detrendeR et bootRes.

Pour enlever le signal basse fréquence, une courbe de croissance théorique propre à chaque arbre est estimée au moyen d'une fonction exponentielle décroissante définie par (Fritts, 1976) et décrite dans l'équation (6).

$$LCt_{ik} = a_i \times e^{-b_i k} + l \quad (6)$$

Où LCt_{ik} équivaut à la largeur de cerne théorique de la carotte i pour l'année k estimée par la fonction, a_i et b_i les paramètres de la fonction exponentielle, et l l'asymptote horizontale vers laquelle tend la fonction quand k tend vers l'infini. L'exponentielle décroissante peut prendre la forme d'une droite strictement décroissante lorsque la valeur des paramètres a_i et b_i est nulle ou négative, ou d'une moyenne (celle de la chronologie traitée) si la pente est estimée positive. Le meilleur ajustement a été retenu selon le coefficient de détermination R^2 qui évalue la qualité de la prédiction d'une régression linéaire en divisant la somme des carrés des écarts par la somme des carrés totaux. Ceci est dû au fait que l'effet de l'âge n'est pas supposé être positif. L'indice de croissance est finalement obtenu en divisant la valeur observée de largeur de cerne par la valeur théorique de la fonction. Cet indice est donc centré sur 1 et a une variance homogène.

La deuxième étape a pour objectif de retirer le signal moyenne fréquence. Le principe est le même que précédemment. Cook et Peters (1981) conseillent d'appliquer une fonction "spline cubique de lissage" (polynômes de degré 3) pour estimer la croissance théorique propre à chaque arbre. Une moyenne mobile peut également être utilisée mais elle a le désavantage de ne pas tenir compte des années aux extrémités. La spline nécessite de fixer deux paramètres : y' , sa longueur d'onde exprimée en années et v , le pourcentage de variance que l'utilisateur souhaite retirer pour la longueur d'onde particulière y' . Dans beaucoup d'études, y' varie entre 20 et 30 ans (Lebourgeois et Mérian, 2012). Cet intervalle semble être un bon compromis entre l'élimination des effets des éclaircies dont la fréquence en peuplements matures varie de 10 à 30 ans et la conservation des arrière-effets des événements climatiques extrêmes qui perdurent le plus souvent entre deux et cinq ans. Dans ce travail, elle a été fixée à 25 ans. Cook et Peters (1981) suggère un v de 50%. L'indice de croissance est calculé de la

même façon que lors de la première étape. La figure 10 en annexe M donne un exemple de cette double standardisation.

Ces séries standardisées ont ensuite été moyennées, par site, en une seule chronologie moyenne (CRN). Celle-ci n'est pas arithmétique car cela voudrait dire que toutes les données auraient le même poids. La présence d'une valeur extrême, ou *outliers*, pourrait donc fortement modifier l'allure de la CRN. Ces outliers peuvent être dus à des erreurs humaines ou à des perturbations aléatoires ponctuelles. Pour pallier ce problème, Mosteller et Tukey (1977) proposent de rassembler les chronologies individuelles via une moyenne robuste à double pondération. Celle-ci adapte le poids de chaque valeur en fonction de la distance par rapport à la moyenne pour éviter les biais engendrés par les outliers dans la CRN. Les valeurs éloignées auront donc un poids plus faible. Dans ce cas de figure, la technique de la réitération est utilisée. Ainsi, l'indice de croissance moyen de l'année k et du site i est obtenu via l'équation (7).

$$IC_{ik} = \sum_{j=1}^t w_{ijk} IC_{ijk} \quad \text{avec} \quad w_{ijk} = \left[1 - \left(\frac{IC_{ijk} - IC_{ik}}{c S_{ik}} \right)^2 \right]^2 \quad (7)$$

Où w_{ijk} est le poids propre à l'indice de croissance de l'arbre j de la placette i pour l'année k . Le carré de la parenthèse interne doit être strictement inférieur à 1. Dans le cas contraire, w_{ijk} est fixé à 0. S_{ik} est la médiane des différences absolues entre les t indices de croissance et l'indice moyen IC_{ik} . c est une constante qui détermine à partir de quel écart par rapport à la valeur moyenne IC_{ik} , l'indice IC_{ijk} n'est plus pris en compte dans le calcul ($w_{ijk} = 0$). Mosteller et Tukey (1977) conseillent de la fixer à 9. L'usage de la moyenne robuste à double pondération nécessite toutefois un minimum de six valeurs pour être efficace (Cook et Kairiukstis, 1990). Les années pour lesquelles il y avait moins de six données de croissance disponibles ont donc été supprimées. Cette situation a pu se rencontrer pour plusieurs raisons : carottage pas à cœur, regarnissage après la plantation ou encore hauteur de prélèvement différente.

La qualité de ces CRN a été évaluée grâce à l'Expressed Population Signal (EPS), calculé selon l'équation (8).

$$EPS = \frac{r_i}{r_i + \frac{1 - r_i}{t}} \quad (8)$$

Selon Wigley et al (1984), cet indicateur renseigne sur la force relative du signal commun à tous les arbres (r_i) par rapport au signal total, qui équivaut au signal commun plus le bruit ($1 - r_i$). Ce bruit est divisé par les t chronologies individuelles lors du calcul de la CRN par la moyenne pondérée. Plus il est proche de 1, plus la chronologie est de qualité car le bruit est nul. Cependant, cette valeur de 1 n'est jamais atteinte. Pour qu'une chronologie ait une qualité jugée acceptable, il faut un EPS de minimum 0,85. L'évolution de l'AC1 peut également servir cet objectif. Après la standardisation, cet indicateur devrait logiquement diminuer

puisque le signal basse fréquence est supprimé. Si c'est bien le cas, cela veut dire que la standardisation a été effectuée correctement.

3.4.5) Fonction de corrélation de type Bootstrap

La fonction de corrélation de type Bootstrap a été utilisée pour analyser la réaction du douglas au climat. Cette méthode, utilisant une procédure de type "Bootstrap", se divise en cinq phases. Tout d'abord, un tirage aléatoire avec remise de x années parmi les y années disponibles est effectué pour chaque facteur climatique. Ce y est propre à chaque peuplement et tient compte de la contrainte imposée par la moyenne robuste à double pondération (minimum six valeurs de croissance). Environ deux tiers des années sont sélectionnés par ce tirage et feront office de groupe de calibration du modèle. Le tiers restant servira de vérification. Ensuite, un modèle linéaire simple est créé entre les données de croissance et celles issues du groupe de calibration. Un coefficient de corrélation de calibration, quantifiant la capacité descriptive du modèle, est ainsi obtenu. Par la suite, ce modèle linéaire simple va être appliqué au groupe de vérification pour prédire les indices de croissance. La comparaison entre les indices de croissances observés et prédits va permettre de juger la qualité de la prédiction. Un coefficient de corrélation de vérification, informant sur la capacité prédictive du modèle, est ainsi obtenu. Ces trois premières phases vont être répétées 1000 fois, ce qui donne 1000 coefficients de corrélation de vérification pour chaque facteur. La quatrième étape consiste en la compilation de ces répétitions. Le coefficient de corrélation "Bootstrap" (BCC), valeur médiane des 1000 coefficients de corrélation obtenus, et son intervalle de confiance sont ainsi calculés. Le seuil de significativité pour ces BCC est fixé à 95%. Finalement, la fonction de corrélation est obtenue avec un BCC par unité de temps et ce, pour chaque facteur climatique. La figure 11 en annexe N résume le fonctionnement de la fonction de corrélation.

Cette méthode permet d'établir les relations selon différentes fenêtres temporelles : statique ou mobile (Biondi et Waikul, 2004). La fonction de corrélation statique calcule un BCC par unité de temps souhaitée alors que la fonction de corrélation mobile correspond à des intervalles d'années successifs dans le temps et de largeur de fenêtre constante. Chaque intervalle possède son propre BCC. L'espace entre chaque intervalle est généralement d'une année et la taille de la fenêtre est variable selon l'objectif de l'étude. De fait, une taille réduite (20 ans) mettra mieux en lumière les variations interannuelles avec une fréquence élevée alors qu'une fenêtre plus large (50 ans) portera sur des phénomènes temporels de basse fréquence. Dans cette étude, une valeur intermédiaire de 35 ans a été choisie. Par exemple, si la chronologie débute en 1970 et finit en 2020, le premier intervalle sera 1970-2005, le deuxième sera 1971-2006 et le dernier sera 1985-2020. De plus, la fonction mobile permet de voir l'évolution des BCC dans le temps. Ainsi, avec les changements climatiques, un facteur pourrait être corrélé positivement avec la croissance pendant plusieurs années puis devenir négatif. Il faut néanmoins garder en tête que l'évolution éventuelle des BCC pourrait aussi s'expliquer par l'âge croissant des arbres.

3.5) Facteurs climatiques

Plusieurs indicateurs climatiques traitant de catégories différentes ont été étudiés (Tableau 5). Pour chacun d'eux, les données journalières de l'IRM ont été réorganisées de sorte à correspondre à l'échelle temporelle souhaitée. L'analyse dendroécologique a été réalisée grâce à un script R développé par Morgane Dendoncker et utilisant les packages dplR (Bunn, 2008) et treeclim (Zang et Biondi, 2015). Concernant les températures maximale, moyenne et minimale, les précipitations et le SPEI, les calculs n'ont pas porté sur l'année calendaire mais bien sur la saison de végétation. Pour le douglas, elle s'étale de mars à octobre (Krueger et Trappe, 1967). En outre, puisque les conditions environnementales de l'année n-1 peuvent influencer la formation du cerne de l'année n, il a été décidé d'étendre la sélection de mars de l'année n-1 à octobre de l'année n. Dans le cas de la fenêtre temporelle statique, il y a donc 20 BCC, un par mois, par facteur climatique et par site. Quant aux facteurs jour chaud, jour froid, gelée tardive et déficit hydrique climatique, les analyses n'ont pas porté sur l'entièreté de la période sélectionnée mais bien sur une partie, différente pour chaque facteur, de celle-ci. Par exemple, l'indicateur jour froid correspond au nombre de jours avec une température moyenne $\leq -10^{\circ}\text{C}$ en hiver [janvier-mars]. Cette période hivernale ne se produisant qu'une fois entre mars de l'année n-1 à octobre de l'année n, il n'y a donc qu'un seul BCC par site.

Le SPEI (*Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*) est un indicateur de sécheresse basé sur les précipitations et la température. Cette dernière est indirectement prise en compte via l'évapotranspiration. Il peut être utilisé pour déterminer le début, la durée et l'ampleur des conditions de sécheresse par rapport aux conditions normales. Les avantages du SPEI, par rapport à d'autres indicateurs de sécheresse comme le SPI ou l'indice de Palmer (sc-PDSI), sont qu'il tient compte de la température, qu'il est standardisé et qu'il est multiscalaire. Ce dernier élément signifie qu'il peut être calculé sur différentes échelles temporelles. Les plus courantes sont 1, 3, 6, 12, 18 et 24 mois. Par exemple, une valeur de trois signifie que les données du mois en cours et des deux mois précédents seront utilisées pour calculer la valeur du SPEI pour un mois donné, tout en conservant une valeur par mois. Ceci permet de déterminer différents types de sécheresse. Ainsi, les petites échelles temporelles correspondent principalement à la teneur en eau du sol et au débit des rivières dans les zones en amont, les moyennes sont liées au stockage des réservoirs et au débit moyen des rivières, et les longues traduisent les variations du stockage des eaux souterraines. La température est primordiale car elle joue un rôle majeur dans la sévérité des sécheresses. Quant à la standardisation, elle permet de mettre tous les peuplements sur le même pied d'égalité. De fait, ceux qui jouissent normalement de précipitations plus abondantes sont moins impactés de manière absolue par la sécheresse que ceux situés dans des milieux plus secs (Vicente-Serrano et al., 2010). Dans cette étude, l'échelle temporelle a été fixée à un mois afin de capter les variations mensuelles de cet indicateur.

Tableau 5 : Facteurs climatiques testés pour la fonction de corrélation avec la fenêtre statique

Catégorie	Facteur	Signification	Période considérée	# résultant de variables par site
Températures et précipitations	Température maximale	Température maximale mensuelle	Saison de végétation n-1 et n	20
	Température moyenne	Moyenne mensuelle des températures	Saison de végétation n-1 et n	20
	Température minimale	Température minimale mensuelle	Saison de végétation n-1 et n	20
	Précipitations	Somme mensuelle des précipitations	Saison de végétation n-1 et n	20
Froid	Jour froid	Nombre de jours avec une température moyenne $\leq -10^{\circ}\text{C}$ en hiver [janvier-mars]	Hiver n	1
	Gelée tardive	Nombre de jours avec une température minimale $\leq 0^{\circ}\text{C}$ d'avril à mai	Avril-Mai n-1 et n	2
Sécheresse	SPEI	Différence standardisée mensuelle entre les précipitations et ETP	Saison de végétation n-1 et n	20
	Déficit hydrique climatique	Différence entre les précipitations et ETP au printemps [avril-juin] et en été [juillet-septembre]	Printemps n-1 et n Eté n-1 et n	4
Canicule	Jour chaud	Nombre de jours avec une température maximale $\geq 30^{\circ}\text{C}$ en été [juillet-septembre]	Eté n-1 et n	2

Pour montrer l'évolution des BCC dans le temps, la fenêtre mobile a également été appliquée, sauf pour les indicateurs jour chaud, jour froid, gelée tardive et déficit hydrique climatique. La période disponible étant trop courte (données de croissance les plus vieilles datent de 1969) et ces conditions ne se réalisant que quelques jours par an, il n'y avait pas assez de données pour faire des corrélations avec ce type de fenêtre. Une solution aurait été d'élargir la période propre à chaque indice comme admettre les mois de mars et de juin en plus pour les gelées tardives. Cependant, cela n'a pas de sens (pour mars) et n'aurait pas forcément amené beaucoup de données supplémentaires (pour juin). Le nombre de BCC par facteur dépend du nombre d'intervalles disponibles car les chronologies moyennes ne démarrent pas toutes la même année.

3.6) Impact des sécheresses

Pour étudier l'impact des sécheresses, les indices de croissance ont été mis en relation avec le SPEI. Tout d'abord, le SPEI a été recalculé avec une échelle temporelle de trois mois. Cette échelle a été choisie afin de pouvoir faire la distinction entre sécheresse printanière et estivale. Seuls les SPEI des mois de juin et de septembre ont donc été pris en compte. Ensuite, une année a été considérée comme comportant une sécheresse lorsque le SPEI était inférieur à -1,5. Selon Potop et al (2014), les seuils sont fixés à -1, -1,5 et -2 et correspondent respectivement à une sécheresse modérée, sévère et extrême. L'idée était de retenir uniquement les sécheresses les plus sévères, c'est pourquoi -1,5 a été préféré à -1. Le seuil de -2 n'a pas été choisi car une seule année est concernée. Enfin, les indices de croissance correspondant à ces années ont été mis en relation avec les années sélectionnées.

4) Résultats

4.1) Chronologies moyennes brutes et standardisées

Pour rappel, les chronologies moyennes brutes et standardisées ont toutes été obtenues via une moyenne robuste à double pondération qui nécessite au moins six données de croissance, ce qui explique pourquoi la date de commencement des chronologies ne correspond pas à la date de plantation (Tableau 6). Quant à la dernière année disponible, il s'agit de 2020 pour tous les sites. L'année 2021 n'a pas été prise en compte car, la campagne d'échantillonnage s'étant déroulée de mai à août de cette même année, le cerne de 2021 n'était pas encore présent pour certains peuplements ou pas totalement formé pour d'autres.

Le Tableau 6 rassemble les informations générales sur ces chronologies. Concernant les chronologies brutes, il ressort que la moyenne des largeurs de cerne ne suit pas le gradient de densité des peuplements, sauf pour les extrêmes. De fait, CDS, le moins dense avec 34,4 m²/ha, possède une moyenne de 6,24 mm contre 4,89 mm pour TI1, le plus dense avec 52,1 m²/ha. Cela semble logique puisque plus la densité est faible, moins il y a de compétition entre les arbres et plus ils ont accès aux ressources pour croître. Pour les peuplements intermédiaires, la relation entre densité et largeur de cerne n'est pas aussi claire. En outre, il semble que les deux peuplements de Libin aient une croissance plus stable car ils possèdent les écarts-types les plus faibles.

Quant à l'intercorrélation, LI1 (0,47) et LI2 (0,52) ont des valeurs inférieures aux autres sites. Comme expliqué précédemment, cela ne veut pas dire que l'interdatation a mal été réalisée car cela dépend de nombreux facteurs comme la localisation géographique, l'homogénéité des sites ou encore la sensibilité des arbres aux facteurs environnementaux. De plus, après plusieurs vérifications minutieuses, il n'y pas d'erreur à ce niveau-là. Ces deux sites sont peut-être dans une situation particulière liée à un ou plusieurs facteurs évoqués. La raison précise n'a pas été investiguée ici. Il n'est toutefois pas étonnant qu'ils aient une corrélation semblable puisqu'ils sont très proches en termes de distance. Pour les autres sites, puisqu'il n'existe pas de seuil limite pour affirmer qu'une chronologie est bien interdatée ou non et que l'appréciation est laissée à l'utilisateur, les corrélations ont été jugées satisfaisantes car elles sont toutes supérieures ou égales à 0,6.

Le Tableau 6 montre également que les autocorrélations d'ordre 1 (AC1) obtenues sont élevées pour tous les sites, à l'exception de TI2 (0,52). Pour rappel, cet indicateur renseigne l'influence des conditions de l'année n-1 sur la formation du cerne de l'année n. En regardant l'allure des séries (Figure 16), TI2 a en effet une tendance de décroissance avec l'âge beaucoup moins marquée que les cinq autres. Ce constat aurait pu inciter à ne pas effectuer la première standardisation pour ce peuplement mais, comme expliqué dans la méthodologie, tous les sites ont subi une double standardisation par souci d'équité. Pour la sensibilité moyenne (SM), les valeurs se situent autour de 0,18. Cela signifie que la variation moyenne de largeur entre deux cernes consécutifs est de 18%.

Concernant les chronologies standardisées, les Expressed Population Signal (EPS) sont tous supérieurs à la valeur seuil de 0,85, synonyme de chronologies peu bruitées. Pour rappel, cet indicateur informe sur la qualité de la standardisation et sur la représentativité des chronologies moyennes. De plus, les AC1 ont diminué après standardisation. Cela prouve que l'effet basse fréquence a bien été supprimé.

Tableau 6 : Statistiques générales sur les chronologies brutes et standardisées. AC1 = autocorrélation d'ordre 1 ; SM = sensibilité moyenne ; EPS = expressed population signal

	CDS	TI2	LI1	LI2	VI1	TI1
Début de la chronologie	1976	1971	1973	1969	1976	1969
Chronologie brute						
Largeur moyenne de cerne [mm]	6,24	5,45	5,60	5,29	5,64	4,89
Ecart-type [mm]	1,79	1,58	1,40	1,38	1,67	1,72
Intercorrélation	0,60	0,67	0,47	0,52	0,60	0,66
AC1	0,75	0,52	0,72	0,73	0,84	0,74
SM	0,18	0,22	0,17	0,18	0,15	0,21
Chronologie standardisée						
AC1	0,19	0,06	0,18	0,24	0,44	0,09
EPS	0,95	0,94	0,87	0,91	0,94	0,93

Les Figure 16 et Figure 17 reprennent respectivement les chronologies moyennes brutes et standardisées obtenues pour les différents sites. Les PY affectant le plus d'entre eux, que sont 1976, 1996, 1997, 2011 et 2018 (Tableau 7), sont affichés sur ces figures. L'interdatation a bien été effectuée car le synchronisme temporel entre ces PY est bien respecté.

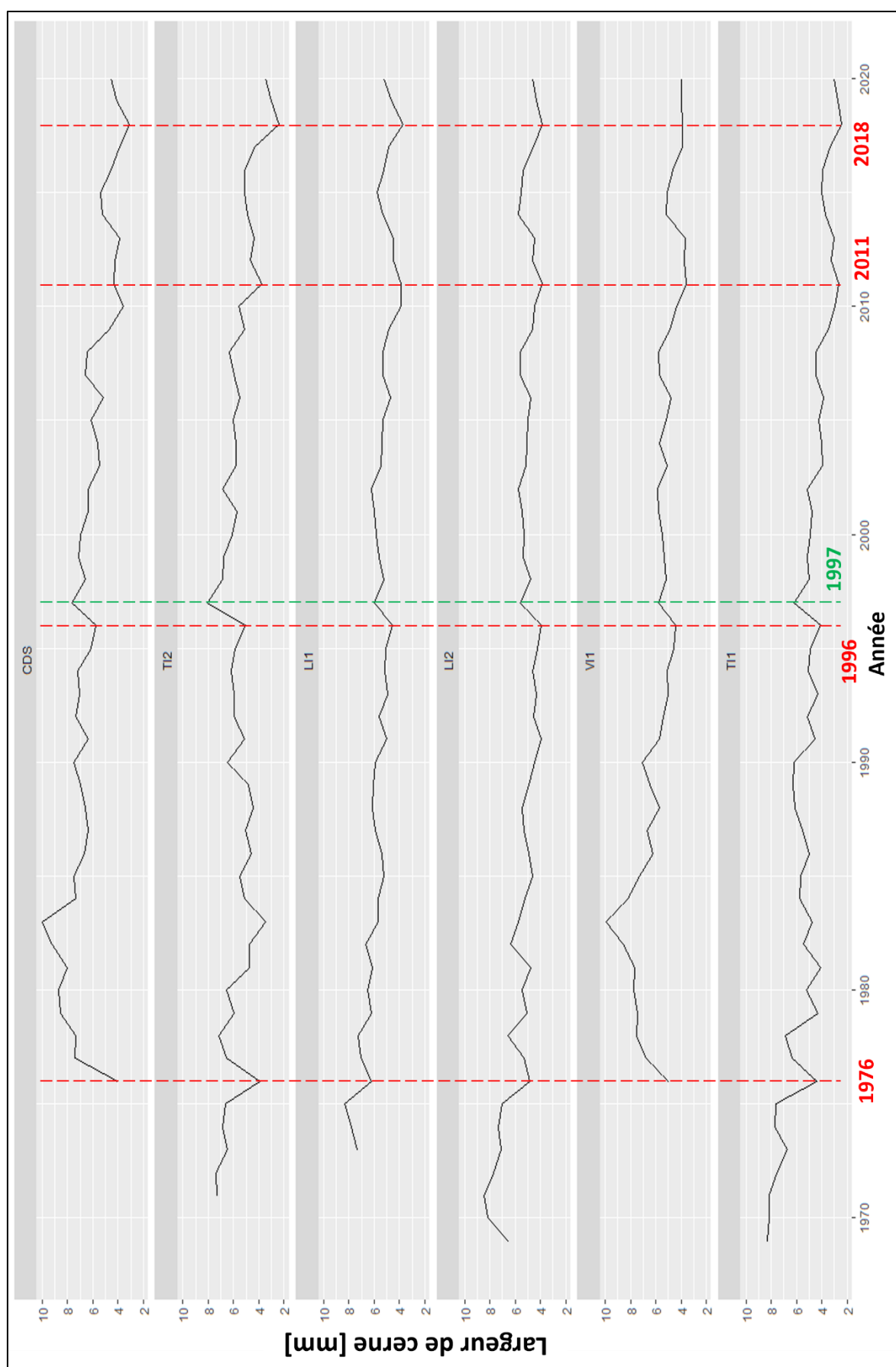


Figure 16 : Chronologies moyennes brutes des différents sites

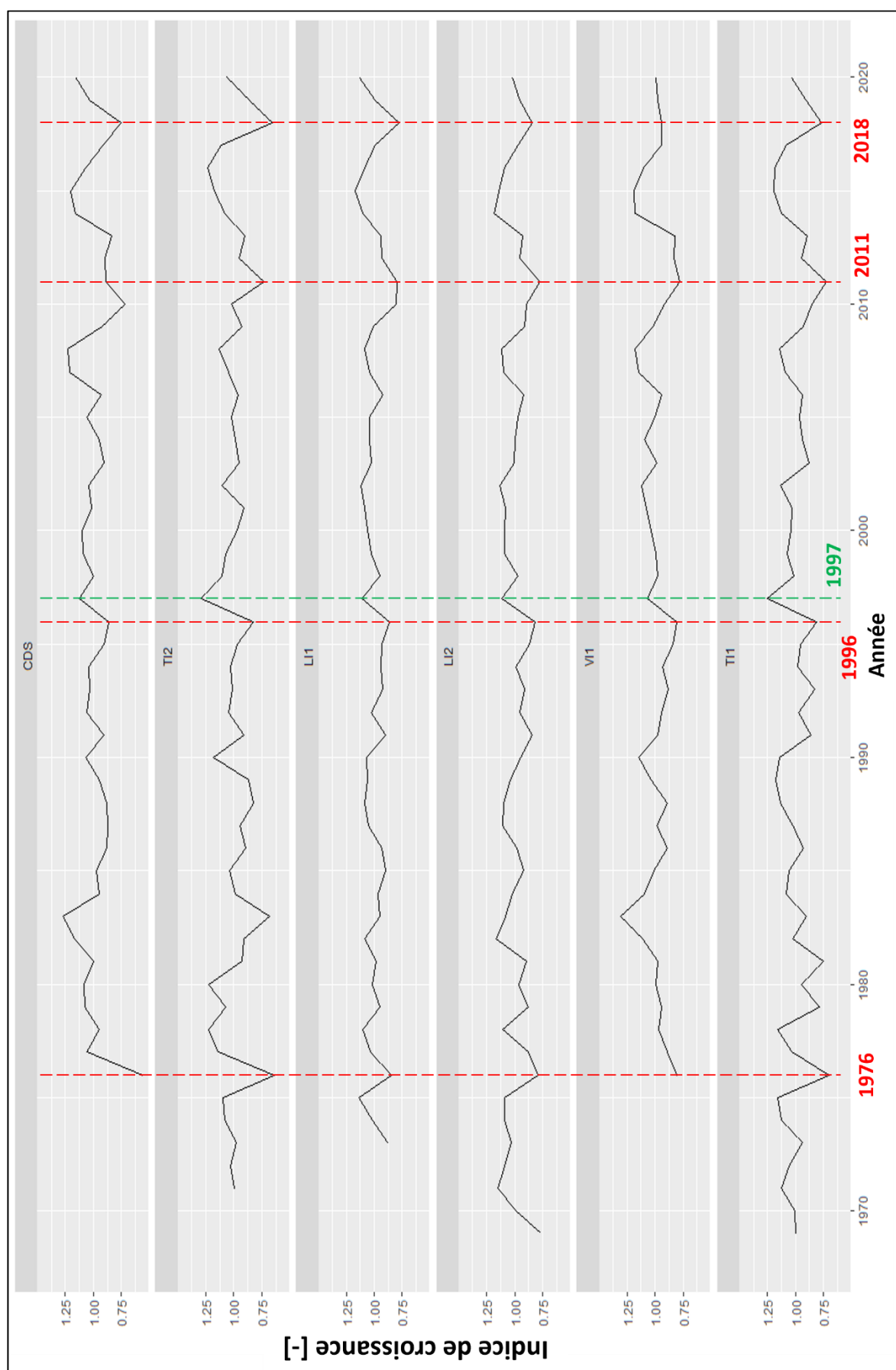


Figure 17 : Chronologies moyennes standardisées des différents sites

4.2) Années caractéristiques

Pour rappel, les années caractéristiques (PY) correspondent à des années avec une croissance exceptionnellement faible ou élevée. Elles sont nécessaires dans l'étape de l'interdatation pour vérifier le synchronisme temporel entre les chronologies. Pour les repérer, différentes méthodes existent et sont complémentaires, c'est pourquoi quatre d'entre elles ont été employées ici. Le Tableau 7 reprend les PY détectées par au moins deux méthodes et présentes sur au moins deux sites. Les PY positives sont 1983, **1997**, 2007 et 2014, et les négatives sont **1976**, 1991, **1996**, 2010, **2011** et **2018**. Celles en caractères gras sont présentes sur au moins la moitié des sites. Les conditions climatiques qui pourraient les avoir causées sont diverses : sécheresse printanière (**1976**, **1996**, **2011**, **2018**), sécheresse estivale (**1976**, 2010, **2011**, **2018**), hiver rigoureux (1991) et gel tardif (1991, 2010, **2011**) pour les PY négatives, et précipitations abondantes pour toutes les positives (IRM, 2015). Les résultats bruts par année pour chaque méthode et pour chaque site sont disponibles sur la figure 12 en annexe O.

Tableau 7 : Années caractéristiques les plus significatives. Les cases vertes correspondent à une année positive, les rouges à une négative et les vides à une non caractéristique. Les années en gras sont présentes sur au moins la moitié des sites. ND = non disponible

	CDS	TI2	LI1	LI2	VI1	TI1
1976	ND	-	-	-	ND	-
1983	+	-			+	
1991			-			-
1996		-			-	-
1997		+	+	+		+
2007	+				+	
2010	-		-			
2011		-		-	-	-
2014	+				+	
2018	-	-	-	-		-

Ces résultats montrent que 2018 a été l'année la plus néfaste pour la croissance du douglas. En effet, à l'exception de VI1, tous les peuplements ont été négativement impactés. Il faut toutefois préciser que 1976, année considérée comme ayant comporté une des sécheresses les plus extrêmes que l'Europe n'ait jamais subie (IRM, n.d.), n'apparaît pas pour CDS et VI1 simplement car les chronologies de ces deux sites commencent cette année-là. L'année 2011 a également influencé négativement deux tiers des peuplements. Côté positif, les précipitations abondantes de l'année 1997 ont été bénéfiques pour le douglas. Cette constatation peut néanmoins faire débat car il y a peut-être un effet relatif dû à l'année 1996 qui a impacté négativement la croissance de la moitié des peuplements.

Globalement, il y a plus de PY négatives (21) que de positives (10). Pour voir l'évolution de ces PY, il est possible de séparer les années de croissance disponibles (1969-2020) en deux groupes égaux : 1969-1995 et 1996-2020. Ainsi, le premier groupe compte deux années positives et sept négatives. Le second groupe contient 8 années positives et 14 négatives. En faisant le rapport des deux pour chaque groupe, il ressort que le pourcentage de PY négatives est passé de 78% à 64% entre 1969-1995 et 1996-2020. Une autre information importante à prendre en compte est que trois des six PY négatives repérées (2010, 2011 et 2018) sont situées dans les 10 dernières années de la chronologie (2010-2020).

4.3) Fonction de corrélation

Les Tableau 8 à Tableau 12 reprennent les coefficients de corrélation Bootstrap (BCC) obtenus entre les chronologies moyennes standardisées et certains facteurs climatiques (température maximale, moyenne et minimale, précipitations et SPEI) testés avec une fenêtre temporelle statique. Les résultats obtenus pour les jours chauds, les jours froids, les gelées tardives et les déficits hydriques ne sont pas présentés ici car aucun BCC n'est significatif. Ils sont toutefois disponibles sur la figure 13 en annexe P. Ces cinq tableaux représentent la synthèse des 36 graphes (six sites x six facteurs climatiques) obtenus. Comme exemple, la Figure 18 montre le résultat pour la température minimale et TI1. Les 36 graphes, réunis par facteur climatique, sont disponibles sur la figure 14 en annexe Q.

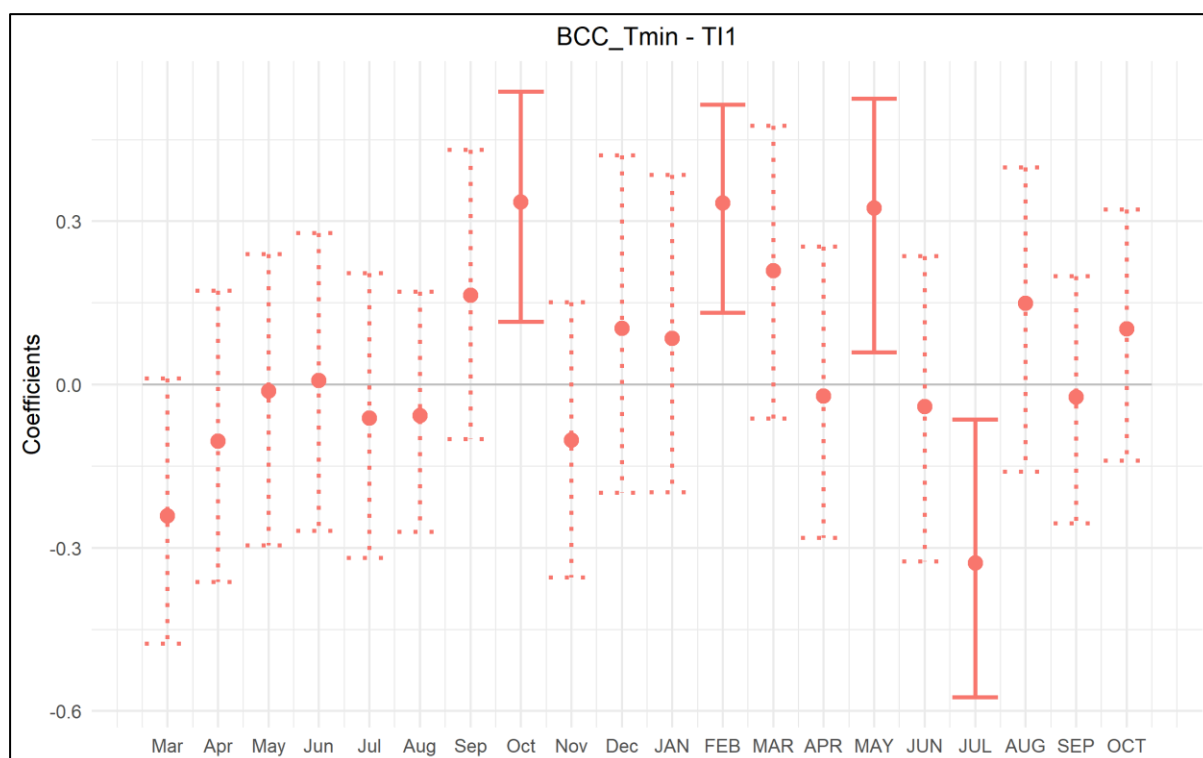


Figure 18 : Fonction de corrélation avec fenêtre statique entre la croissance et la température minimale pour TI1. La moyenne et l'écart-type de chaque coefficient de corrélation sont affichés. Les barres pleines représentent les corrélations significatives. L'année n-1 est représentée par les mois écrits en minuscules alors que ceux en majuscules font référence à l'année n

Les nombres entre parenthèses se rapportent à des BCC significatifs issus des résultats obtenus via la fenêtre temporelle mobile. Cette méthode a permis de repérer des corrélations qui n'étaient pas significatives au début mais qui le sont devenues ces dernières années. Toujours avec l'exemple de la température minimale pour TI1, les mois de septembre de l'année n-1 et de mars de l'année n n'ont pas été détectés avec la fenêtre statique. Or, les résultats avec la fenêtre mobile (figure 15 en annexe R) montrent que ces deux mois sont devenus significatifs sur les cinq derniers intervalles de temps testés. Le nombre entre parenthèses équivaut à la moyenne des cinq corrélations obtenues. Le même principe a été appliqué pour les autres situations. Seuls les BCC significatifs récents et successifs pendant un laps de temps équivalent à au moins un tiers de la chronologie ont été retenus. Ceux qui étaient significatifs au début de la série temporelle mais qui sont devenus non significatifs dans le temps ou ceux qui étaient significatifs récemment mais qui n'atteignaient pas le tiers requis n'ont pas été pris en compte.

Il arrive que les résultats de la fenêtre statique indiquent un mois significatif alors que ce mois n'apparaît pas clairement avec la fenêtre mobile. C'est notamment le cas avec mai de l'année n qui n'est significatif que sur le premier intervalle (1970-2004) (figure 15 en annexe R) alors qu'il ressort sur la Figure 18. Dans cette situation, mai de l'année n a été conservé pour deux raisons. La première est que les résultats obtenus avec la fenêtre statique ont été privilégiés car il s'agit de la méthode la plus courante utilisée en dendrochronologie. La seconde est qu'en regardant plus précisément les valeurs des corrélations de tous les intervalles de temps de la fenêtre mobile, il s'avère que la corrélation de 1970-2004 est effectivement la plus élevée mais que les autres sont assez proches. Le même constat a été observé dans les autres situations de ce genre.

Tableau 8 : BCC entre la croissance et la température maximale. Une case verte correspond à un BCC positif significatif alors qu'une case rouge renvoie à un BCC négatif significatif. Les nombres à l'intérieur des cases renseignent sur la valeur du BCC correspondant. Une case vide équivaut à un BCC non significatif (positif ou négatif). L'année n-1 est représentée par les mois écrits en minuscules alors que ceux en majuscules font référence à l'année n. Les peuplements sont classés par ordre croissant de surface terrière à mi-rotation. Les valeurs entre parenthèses se rapportent à des BCC significatifs issus des résultats obtenus via la fenêtre temporelle mobile

T° max	CDS	TI2	LI1	LI2	VI1	TI1
mars						
avril						
mai						-0,24
juin						
juillet						
août	-0,29					
septembre						
octobre	-0,37					
novembre						
décembre			0,39			(0,41)
JANVIER						
FÉVRIER		(0,4)	0,28			
MARS						
AVRIL						-0,29
MAI				-0,27	-0,27	
JUIN						
JUILLET						
AOÛT						
SEPTEMBRE						
OCTOBRE	-0,37	-0,34	-0,33	-0,3		-0,32

Ces résultats révèlent que la croissance est négativement impactée par la température maximale durant le mois d'octobre de l'année n et ce, pour cinq des six peuplements. En rassemblant avril et mai de l'année n, la croissance pendant ce printemps est aussi impactée négativement pour la moitié des sites. Plus anecdotique, celle de l'hiver entre les deux saisons de végétation (décembre de l'année n-1 et février de l'année n) n'était pas d'une grande importance mais avec les résultats obtenus via la fenêtre temporelle mobile, elle est devenue positive pour un tiers des peuplements.

Tableau 9 : BCC entre la croissance et la température minimale. Légende identique à celle du Tableau 8

T° min	CDS	TI2	LI1	LI2	VI1	TI1
mars						
avril			(-0,34)			
mai						
juin						
juillet						
août						
septembre	0,31					(0,38)
octobre	0,35		0,42	0,32	0,32	0,33
novembre						
décembre						
JANVIER						
FÉVRIER	0,34	0,27	0,44	0,26	0,31	0,34
MARS	0,44	0,31	0,38		0,3	(0,35)
AVRIL						
MAI	(0,43)			0,38		0,33
JUIN				(0,32)		
JUILLET		-0,32				-0,34
AOÛT						
SEPTEMBRE						
OCTOBRE						

Pour la température minimale, la fin de l'hiver (février et mars de l'année n) est une période critique. En effet, la croissance est positivement influencée par la température minimale et ce, pour la quasi-totalité des peuplements. La même constatation peut être tirée pour le mois d'octobre de l'année n-1, auquel septembre peut éventuellement s'ajouter. La croissance du mois de mai de l'année n est également corrélée positivement pour la moitié des sites, grâce au changement de situation récent pour CDS. Moins importante mais touchant un tiers des peuplements, celle du mois de juillet de l'année n est négativement impactée par la température minimale.

Tableau 10 : BCC entre la croissance et la température moyenne. Légende identique à celle du Tableau 8

T° moy	CDS	TI2	LI1	LI2	VI1	TI1
mars						
avril						
mai						
juin						
juillet						
août						
septembre						
octobre						
novembre						
décembre			0,34			
JANVIER						
FÉVRIER	0,44	0,42	0,47	0,28	(0,49)	0,45
MARS						
AVRIL						
MAI						
JUIN						-0,29
JUILLET						
AOÛT						
SEPTEMBRE						
OCTOBRE		-0,27				

La température moyenne influence la croissance du douglas quasi exclusivement pendant le mois de février de l'année n. Cette relation est positive et affecte tous les sites, VI1 ne rejoignant les autres sites que récemment. Ce résultat a déjà été observé avec la température minimale, ce qui n'est pas étonnant au vu du lien entre ces deux températures.

Tableau 11 : BCC entre la croissance et les précipitations. Légende identique à celle du Tableau 8

Précipitations	CDS	TI2	LI1	LI2	VI1	TI1
mars						
avril						
mai				0,26	0,34	
juin						
juillet						
août						
septembre						
octobre				0,27		
novembre						
décembre						
JANVIER						
FÉVRIER	0,3	0,3	0,41	(0,42)	0,26	0,41
MARS						
AVRIL						
MAI						
JUIN						
JUILLET			0,28	0,24		
AOÛT						
SEPTEMBRE						
OCTOBRE						

Concernant les précipitations, il semble que février de l'année n soit un mois important pour la croissance du douglas. En effet, les corrélations sont positives pour tous les sites. La corrélation de LI2 l'est toutefois devenue récemment. Dans une moindre mesure, la croissance durant les mois de mai de l'année n-1 et de juillet de l'année n est également impactée positivement par les précipitations.

Tableau 12 : BCC entre la croissance et SPEI (1 mois). Légende identique à celle du Tableau 8

SPEI_1	CDS	TI2	LI1	LI2	VI1	TI1
mars						
avril						
mai				0,27		
juin						
juillet						
août						
septembre						
octobre			0,26	0,26		
novembre						
décembre						
JANVIER						
FÉVRIER	(0,35)	0,28	0,39	(0,44)	(0,35)	0,39
MARS			0,27			
AVRIL						
MAI						
JUIN		0,31				
JUILLET			0,31			
AOÛT						
SEPTEMBRE						
OCTOBRE						

Avec les résultats de la fenêtre temporelle mobile, les résultats pour le SPEI sont assez semblables à ceux pour les précipitations (Tableau 11). La croissance du mois de février de l'année n est positivement corrélée par le SPEI. Les mois de mai et d'octobre de l'année n-1 ainsi que juillet de l'année n, auxquels peut s'ajouter juin, sont à nouveau présents. Ce lien avec les précipitations n'est pas étonnant puisqu'elles interviennent dans le calcul du SPEI.

Plus globalement, en regardant l'ensemble des cinq tableaux ci-dessus, il ressort que le mois de février de l'année n est omniprésent, sauf pour la température maximale. A côté de cela, la température minimale du mois d'octobre de l'année n-1 ainsi que la température maximale du mois d'octobre de l'année n sont cruciales, respectivement de façon positive et négative, pour la croissance du douglas. En outre, en regardant les mois détectés pour la (quasi) totalité des sites, une certaine relation peut être observée entre la valeur des BCC et la densité concernant les précipitations et le SPEI. De fait, ces valeurs semblent un peu plus faibles pour les peuplements les moins denses. Ce constat n'est pas partagé pour les trois températures où la relation est linéaire ou inexistante. A propos de la différence entre l'année n-1 et n, les BCC significatifs sont moins nombreux et généralement plus faibles pour l'année n-1.

4.4) Impact des sécheresses

Contrairement au Tableau 7 qui prend uniquement en compte la croissance du douglas, cette section se concentre sur les conditions climatiques via le SPEI. Les années communes entre le Tableau 7 et les Tableau 13 et Tableau 14 détaillés ci-dessous sont clairement liées, la sécheresse étant la cause de leur classification en année caractéristique.

Les Tableau 13 et Tableau 14 reprennent les indices de croissance par peuplement correspondant aux années définies comme comportant une sécheresse ($\text{SPEI} < -1,5$). Les SPEI associés à ces années sont également présents et correspondent à la moyenne des valeurs pour les sites concernés par un $\text{SPEI} < -1,5$. Les indices de croissance étant des données standardisées, leur moyenne est égale à un. L'évolution des SPEI printanier et estival pour chaque peuplement et pour la période 1961-2020 est présentée sur la figure 16 en annexe S.

Tableau 13 : Impact des sécheresses printanières sur la croissance du douglas. Les valeurs en caractères gras rouges sont celles qui s'éloignent fort de la moyenne ($\leq 0,85$). Les cases vides traduisent un $\text{SPEI} > -1,5$

Printemps	CDS	TI2	LI1	LI2	VI1	TI1	SPEI_3
1976	0,56	0,64	0,85	0,79	0,81	0,7	-2,26
2011		0,73	0,79	0,78	0,78	0,73	-1,59
2017	0,92	1,11	0,99	0,97	0,94	1,08	-1,61
2020	1,16	1,06	1,13	1,02	0,99	1,04	-1,78

Tableau 14 : Impact des sécheresses estivales sur la croissance du douglas. Légende identique à celle du Tableau 13

Eté	CDS	TI2	LI1	LI2	VI1	TI1	SPEI_3
1971		1		1,15		1,12	-1,61
1976		0,64	0,85	0,79	0,81	0,7	-1,53
1983					1,31		-1,58
1997			1,11	1,11			-1,55
2003	0,9	0,95				0,88	-1,60
2018	0,75	0,65	0,78	0,84	0,94	0,77	-1,90
2019	1,03						-1,55
2020		1,06				1,04	-1,74

Ces deux tableaux montrent que 1976 a été l'année la plus néfaste pour la croissance du douglas car les indices de croissance sont les plus faibles enregistrés dans cette étude, allant même jusqu'à 0,56 pour CDS. Cette année a comporté une sécheresse printanière et estivale mais celle du printemps a été extrême car le SPEI est inférieur à -2. Dans une moindre mesure,

2011 et 2018 ont également connu respectivement une sécheresse printanière et une estivale, toutes deux impactantes pour le douglas.

CDS et TI2, les peuplements les moins denses, semblent être ceux les plus impactés par les sécheresses en raison de leur indice de croissance toujours inférieur à 0,75. À l'inverse, VI1 est le peuplement le plus résistant avec des valeurs toujours supérieures à 0,78. En outre, il est le seul à ne pas avoir été touché par la sécheresse estivale de 2018. Ceci peut s'expliquer par son SPEI égal à -1,8, ce qui est légèrement inférieur à la moyenne des autres peuplements (-1,9).

Globalement, il y a plus de sécheresses estivales recensées que de printanières. Toutefois, à part pour 1976 et 2018, elles n'ont pas impacté plus de la moitié des peuplements. De plus, les indices de croissance sont souvent proches ou supérieurs à un. Quant aux printanières, elles touchent, presque à chaque fois, la totalité des peuplements. Le même constat peut être dressé pour 2017 et 2020. Un élément à noter est que l'année 2020, avec un SPEI de -1,78, n'a pas impacté la croissance du douglas, alors que l'année 2011, avec un SPEI inférieur égal à -1,59, lui a bel et bien causé du tort. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que 2020 est la dernière année disponible. Ainsi, l'ajustement des courbes de croissance théoriques lors de la double standardisation est moins précis pour cette année car il n'y a pas de donnée postérieure.

5) Discussion

5.1) Années caractéristiques

Le Tableau 7 montre que les années caractéristiques les plus significatives sont 1976, 1996, 2011 et 2018 pour les négatives, et 1997 pour les positives. Les causes de 1976, 2011 et 2018 seront détaillées plus loin dans la discussion. Selon l'IRM (2015), 1996 a connu une sécheresse printanière [avril-juin] et des précipitations abondantes sont tombées en 1997. Le Tableau 15 reprend les conditions climatiques associées à ces deux années. Les autres années détectées ne seront pas détaillées ici car elles ont touché moins de la moitié des peuplements. Il ressort que l'année 1996 a bien comporté une sécheresse printanière avec des mois d'avril et de juin chauds et secs. Quant à 1997, il y a certes eu beaucoup de précipitations mais elles n'étaient pas supérieures à la normale.

Tableau 15 : Conditions climatiques des années caractéristiques 1996 et 1997 par rapport à la période de référence 1954-2020. Les valeurs en rouge correspondent au nombre de jours avec une température maximale $\geq 25^{\circ}\text{C}$ exprimés en # (/an pour la période de référence). Les nombres entre parenthèses représentent la température maximale mensuelle pour 1996 et la moyenne des températures maximales pour la période de référence, exprimées en $^{\circ}\text{C}$. Les valeurs en bleu se réfèrent aux cumuls pluviométriques exprimés en mm (/an pour la période de référence). Toutes les valeurs équivalent à une moyenne des peuplements. Les signes + et – font référence à une année positive ou négative

Année caractéristique		Données de l'année		Période de référence	
Sécheresse printanière [avril-juin]					
1996 (-)	Avril	0 (23,3)	9,0	0 (12,4)	67,9
	Mai	1 (25,4)	89	1 (16,7)	78,0
	Juin	6 (30,2)	33,0	4 (19,6)	81,6
Précipitations abondantes					
1997 (+)		1016,5		1057,2	

A titre de comparaison, Manise (2012) a étudié les années négatives sur plusieurs essences (hêtre, chêne, épicéa, douglas) en Wallonie de 1971 à 2010 et il ressort que 1976 a affecté toutes les essences, 1983 et 1996 ont impacté uniquement les chênes, 2000 a touché les hêtres et la période 2003-2006 a concerné toutes les essences à nouveau. Vejpustková et Čihák (2019) ont confronté le douglas et l'épicéa en République Tchèque de 1961 à 2015 et ont identifié 1962, 1992, 1993, 2003, 2004 et 2015 comme années négatives pour l'épicéa, alors que le douglas n'était concerné que par 1976. En outre, ces deux études ont prouvé que le douglas est l'essence qui possède le moins d'années caractéristiques (positives et négatives). Cela montre sa résistance supérieure au climat en général par rapport aux autres essences. Castaldi et al (2020) ont travaillé uniquement sur le douglas en Italie de 1935 à 2012 et n'ont recensé que la période 1981-1982 comme année négative.

Il faut toutefois préciser que toutes ces études n'ont utilisé qu'une seule méthode pour repérer ces années caractéristiques. Ici, quatre méthodes complémentaires ont été employées. Il est donc normal qu'il y ait plus d'années détectées.

5.2) Réponse du douglas au climat

5.2.1) Influence des températures

Les résultats obtenus pour la température maximale (Tableau 8) révèlent que la croissance annuelle est négativement corrélée avec celle-ci durant le mois d'octobre de l'année n pour cinq des six peuplements. Cela signifie que plus la température maximale est élevée, plus la croissance est faible. VI1 est le seul site à ne pas avoir de corrélation significative. Ceci peut s'expliquer par son positionnement géographique. Avec l'altitude la plus élevée, il s'agit du site le plus froid et le plus humide en moyenne (Figure 9). Ces conditions lui permettent d'être moins impactés par la température maximale. Le cas échéant, cette explication sera également valable pour les autres facteurs climatiques.

L'effet de la température maximale sur les autres peuplements peut s'expliquer par deux phénomènes : la sénescence (Liu et al., 2018) et l'endurcissement au froid, aussi appelé l'aoûtement (Beck et al., 2004). Début automne, lors de la baisse des températures et de la diminution de la luminosité journalière, les arbres des zones tempérées de l'hémisphère nord enclenchent l'aoûtement, un processus de lignification des jeunes rameaux. Cela leur permet de stocker des réserves dans leurs tissus pour passer l'hiver. Cependant, une étude réalisée par Bansal et al (2015) a montré que l'aoûtement se déroule plus tard en automne en raison de la hausse globale des températures. Celles-ci ne descendant pas assez bas, le douglas se retrouve ainsi affaibli et vulnérable aux gelées précoces. Cette vulnérabilité peut être liée à la sénescence, processus ayant pour objectif de récupérer les nutriments compris dans les organes pérennes de l'arbre avant leur détachement. Ce mécanisme étant aussi retardée suite au réchauffement global, les gelées précoces risquent de tuer les jeunes aiguilles (non protégées par l'aoûtement) mais aussi celles matures avant qu'elles ne commencent leur sénescence. Ainsi, l'arbre pourrait voir sa croissance réduite pendant la fin de la saison de végétation en cours et se retrouver avec une réserve de nutriments diminuée pour commencer la saison de végétation suivante (Estiarte et Peñuelas, 2015).

Une autre explication pourrait être liée à la relation entre la respiration et la productivité primaire nette (PPN). Selon Girardin et al (2016), l'augmentation des températures entraîne une hausse de la respiration et par conséquent, une baisse de la PPN. Ils précisent néanmoins que cette réponse peut varier selon la fertilisation par le CO_2 et selon l'acclimatation de la respiration aux températures élevées. Duveneck et Thompson (2017) et Tang et al (2010) ajoutent que la relation entre la PPN et la température est positive au printemps et négative en été. En supposant un allongement de la saison de végétation, cela pourrait confirmer la corrélation négative du mois d'octobre de l'année n .

Une dernière hypothèse pourrait être liée à la diminution des précipitations estivales et à la décharge des sols associée. Manifestement, au vu des résultats, le douglas continue à croître en octobre. Les pluies hivernales n'ayant pas encore rechargé les sols, cette croissance automnale serait donc défavorisée par le manque d'eau. Toutefois, pour que cela soit valable, il faudrait que cela apparaisse avec un indicateur tel que le SPEI, ce qui n'est pas le cas ici.

Les corrélations négatives du printemps de l'année n (avril et mai) sont plus facilement compréhensibles car elles sont liées aux phénomènes de sécheresse printanière. Cette période est d'autant plus importante qu'elle correspond à la date de floraison du douglas (DREAL Centre-Val de Loire, 2019), phase gourmande en énergie et en eau. Il risque donc d'y avoir une sorte de compétition entre la croissance et la floraison.

Quant à la température minimale (Tableau 9), la croissance durant les mois de février et de mars de l'année n est corrélée positivement pour presque tous les sites. Cela signifie que le douglas est favorisé par les hivers doux. Ce constat est partagé par Feliksik et Wilczyński (2004) et par Castaldi et al (2020). Guehl et al (1985) expliquent que les aiguilles sont en réalité toujours photosynthétiquement actives tant que les températures ne descendent pas en dessous de -3°C . Ce phénomène permettrait donc de favoriser la croissance et d'améliorer le stockage du carbone pour l'année suivante (Gricar et al., 2015). Cette idée est d'autant plus vérifiée que la réactivation du cambium, ayant besoin d'énergie fournie par la photosynthèse, est stimulée par la hausse des températures (Rossi et al., 2007). Les hivers doux peuvent également réduire les risques d'embolie (Cochard et al., 2001), empêcher la formation de gel et accélérer la fonte des neiges. Sans neige, le réchauffement du sol et la croissance racinaire sont favorisés. Ce faisant, la formation des bourgeons ainsi que la maturation des aiguilles et des racines sont possibles et la saison de végétation se retrouve allongée. Finalement, tous ces éléments, accompagnés de réserves en eau suffisantes, promeuvent la formation de bois pendant le printemps suivant (Lebourgeois et al., 2010).

Octobre de l'année $n-1$ semble également être un mois important car cinq sites sur six montrent une corrélation positive. Ceci pourrait à nouveau être lié à l'endurcissement au froid. Comme expliqué précédemment, le douglas est plus susceptible de subir les effets des gelées précoces dus à la hausse des températures et à un aoûtement tardif. Néanmoins, une température minimale élevée permet d'empêcher ces gelées. Ce faisant, le douglas serait protégé et pourrait accomplir l'aoûtement plus tard dans l'année (Bansal et al., 2015). Un autre lien pourrait plus simplement être fait avec l'allongement de la saison de végétation (Linderholm, 2006). Ainsi, le douglas pourrait continuer à croître et à accumuler des réserves tant que la température minimale ne descend pas trop bas.

Le site qui ne présente pas de corrélation significative pour octobre de l'année $n-1$ est celui de T12. Il serait donc possible de penser que ce peuplement possède une caractéristique propre, comme des conditions climatiques moins limitantes, qui lui permet de pas être sensible à la température minimale durant ce mois. Cependant, cette information est à

relativiser car en regardant la figure 14 en annexe Q, il s'avère que la valeur de la corrélation est assez proche de celles des autres peuplements. Par conséquent, il se peut que cette corrélation se situe juste en dessous du seuil de significativité. D'autant plus que TI1, pour qui la corrélation est significative, n'a pas pu être distingué climatiquement parlant de TI2 par l'IRM puisque que ces deux peuplements sont trop proches. Le cas échéant, cette explication sera également valable pour les autres facteurs climatiques.

Les corrélations négatives durant le mois de juillet de l'année n pour un tiers des peuplements sont liées aux sécheresses estivales. Ainsi, une température minimale élevée est défavorable à la croissance du douglas. Le mois de mai de l'année n, corrélé positivement avec la moitié des sites, renseigne sur l'impact des gelées tardives. Avec une température minimale élevée et au-dessus de zéro, ce phénomène ne peut pas se dérouler. Ceci est notamment bénéfique pour la floraison.

Pour la température moyenne (Tableau 10), seul le mois de février de l'année n ressort clairement avec des corrélations positives. L'interprétation est la même que celle pour la température minimale. Ceci est logique puisque ces deux températures sont liées entre elles. Le Tableau 16 montre que la corrélation entre les deux est de 0,95, ce qui signifie que ces deux facteurs apportent la même information. Ce tableau n'est valable que pour CDS mais les résultats sont semblables pour les autres peuplements. Au contraire, les corrélations nulles ou légèrement négatives entre les températures d'une part et les précipitations et le SPEI de l'autre démontrent que les informations fournies par les deux parties sont indépendantes les unes des autres.

Tableau 16 : Corrélations entre les températures maximale, moyenne et minimale, les précipitations et le SPEI pour le site de CDS

	T° max	T° moy	T° min	P	SPEI
T° max	1	0,95	0,85	-0,29	-0,15
T° moy		1	0,94	-0,20	-0,07
T° min			1	-0,07	0,05
P				1	0,92
SPEI					1

5.2.2) Influence des précipitations

Concernant les précipitations (Tableau 11), février de l'année n est un mois important pour la croissance du douglas. En effet, les corrélations sont positives pour tous les sites. Les conditions pluviométriques juste avant le début de la saison de végétation semblent donc cruciales. Cela peut paraître logique mais peut-être que la baisse des précipitations estivales et la hausse des pluies hivernales (Figure 10) font en sorte que le processus de décharge des sols en été et de recharge en hiver va devenir de plus en plus conséquent. Dès lors, les

précipitations du mois de février seraient donc favorables à la reprise de la croissance du douglas, les autres mois hivernaux n'apparaissant pas puisque la croissance est (quasiment) à l'arrêt. En outre, il est possible que la saison de végétation, débutant habituellement au mois de mars, commence un peu plus tôt en raison de la hausse globale des températures. Cette phase de démarrage étant très gourmande en énergie, l'eau est essentielle. Un dernier point traite des critères utilisés pour la sélection des sites. Ceux-ci sont situés sur des sols avec une réserve en eau utile (RUM) maximale faible. Ils sont donc plus favorisés par les précipitations que les sites avec une RUM élevée qui ont une plus grande réserve d'eau disponible dans le sol en cas de déficit hydrique climatique. Un tiers des peuplements est également impacté positivement par les pluies des mois de mai de l'année n-1 et de juillet de l'année n. Cela peut laisser présager de l'effet des sécheresses printanières et estivales. Les précipitations sont donc bénéfiques lors de ces événements.

A propos du SPEI³ (Tableau 12), la moitié des sites est corrélée de façon positive et significative avec le mois de février de l'année n sur toute la période disponible. L'autre moitié l'est devenue plus récemment. Cela signifie que ces sites étaient moins impactés par la sécheresse mais l'évolution des conditions environnementales ont rendu cette relation significative. Il ne faut pas oublier que l'âge peut également avoir un effet sur ce passage à la significativité. Skubel et al (2015) ont étudié trois peuplements canadiens de *Pinus strobus* L. d'âges différents (11, 39 et 74 ans) entre 2008 et 2013 et ont montré que les deux peuplements les plus jeunes avaient un usage de l'eau plus efficient en moyenne que le plus vieux. En outre, les besoins en eau augmentent avec l'âge en raison de la surface foliaire et de la hauteur supérieures. L'usage de l'eau moins efficient combiné avec les besoins élevés en eau des peuplements âgés pourraient donc expliquer la significativité récente de la corrélation avec le SPEI.

Pour le reste, les mois de mai de l'année n-1 et juillet de l'année n sont à nouveau présents. L'interprétation est semblable à celle des précipitations, la corrélation entre ces deux facteurs étant de 0,92 (Tableau 16). La croissance annuelle est aussi corrélée positivement avec le SPEI durant octobre de l'année n-1. Ceci pourrait rejoindre l'interprétation de la température maximale. Ce mois étant situé à la fin de la phase de décharge estivale en eau du sol et avant la phase de recharge hivernale, des précipitations précoces sont donc bénéfiques pour la croissance. Avec les résultats des précipitations et du SPEI, il ressort que la croissance du douglas est favorisée par les hivers humides.

5.2.3) Influence du climat de l'année précédente

L'hypothèse émise est que les conditions environnementales de l'année précédente peuvent influencer la formation du cerne de l'année en cours. Dans les faits, les corrélations significatives (positives ou négatives) de l'année n-1 sont moins nombreuses et généralement

³ Le SPEI est la différence standardisée entre les précipitations et l'ETP. Une différence élevée signifie donc plus de précipitations.

plus faibles que celles de l'année n. Ces résultats montrent que, dans une moindre mesure, l'année n-1 peut influencer l'année n mais les conditions de l'année n sont plus impactantes. A titre de comparaison, Lévesque et al (2015) ont réalisé une étude sur la réponse à la sécheresse de plusieurs résineux dont le douglas. Ils estiment que les essences concernées sont, de manière significative, négativement impactées par les sécheresses mais qu'elles sont aussi très résilientes car leur croissance est revenue à la normale un ou deux ans après. Selon eux, l'année n-1 n'aurait donc pas tellement d'effet sur l'année n.

5.3) Effet de la densité

Concernant les précipitations (Tableau 11) et le SPEI (Tableau 12), il ressort que les valeurs des corrélations du mois de février de l'année n pour CDS et TI2, les deux peuplements les moins denses, sont globalement plus faibles que celles des autres sites. Cela signifie que ces deux peuplements sont moins sensibles aux précipitations. Ce constat est logique puisque plus la densité augmente, plus la compétition entre les arbres est forte et plus l'accès à l'eau est limité (Aussenac, 2000). A propos des températures, la relation entre la croissance et la densité est nulle ou inexistante. De fait, les valeurs des corrélations sont assez stables pour la température maximale durant octobre de l'année n (Tableau 8), pour la température minimale durant octobre de l'année n-1 (Tableau 9) et pour la température moyenne durant février de l'année n (Tableau 10), et ne présentent pas d'évolution claire pour la température minimale durant février et mars de l'année n (Tableau 9). Cependant, ces résultats sont difficiles à affirmer avec certitude au vu du nombre limité de sites étudiés et de la gamme de valeurs de densité restreinte et non homogène. Des calculs d'accroissements radiaux pour chaque peuplement auraient éventuellement pu apporter des informations complémentaires.

En guise de comparaison, Rais et al (2014) ont montré que la croissance des peuplements de douglas les moins denses du sud de l'Allemagne a été moins affectée par la sécheresse de 2003 que celle des peuplements les plus denses. L'augmentation de l'espace disponible pour le développement des racines et des houppiers leur a permis de mieux résister au stress hydrique rencontré. Toutefois, il faut préciser que cette étude n'a porté que sur deux peuplements (avec des densités de 29,2 et 27,1 m²/ha), et s'est basée sur l'indice de Reineke (SDI) (Reineke, 1933) et non pas sur la surface terrière à mi-rotation. Une autre étude, réalisée par Lebourgeois et al (2014) mais portant sur le hêtre et le sapin blanc, a prouvé que les arbres d'une même essence sous une densité faible ou moyenne (< 45 m²/ha) présentent une réponse semblable au climat, peu importe leur statut social. Quant à une situation de densité élevée (> 45 m²/ha), la sensibilité à la sécheresse augmente avec la dominance des arbres.

5.4) Impact des sécheresses

Les résultats (Tableau 13 et Tableau 14) montrent que trois années ont comporté une ou deux sécheresses néfastes pour la croissance du douglas : 1976 (extrême), 2018 (sévère) et 2011 (sévère). Le Tableau 17 permet de comparer les conditions thermique et pluviométrique

entre ces trois années et la période de référence 1954-2020. Les valeurs indiquées sont valables uniquement pour les deux peuplements de Libin. Ils ont été choisis car leurs indices de croissance sont les plus faibles durant ces années (Tableau 13 et Tableau 14). Pour 1976, CDS n'a pas été retenu car il n'a pas été impacté par la sécheresse estivale cette année-là.

L'année 1976 a été marquée par une sécheresse printanière et estivale. Tous les cumuls pluviométriques sont inférieurs aux normales mensuelles. Le mois de juin a été particulièrement chaud et sec avec une température maximale qui correspond à la normale et des précipitations qui n'ont atteint que 5,7 mm (contre 80,9 mm normalement). Les mois d'avril et d'août ont également été très secs. La sécheresse printanière de 2011 est caractérisée par des mois d'avril et de mai assez secs, et un mois de juin très chaud. Celle estivale de 2018 a compté un mois de juillet très chaud et très sec, un mois d'août très chaud et plutôt sec et un mois de septembre plutôt sec.

Tableau 17 : Différence climatique entre les trois années de sécheresse et la période de référence 1954-2020 pour les peuplements de Libin. Les valeurs en rouge correspondent aux nombres de jours avec une température maximale $\geq 25^{\circ}\text{C}$ pour le printemps et $\geq 30^{\circ}\text{C}$ pour l'été exprimés en # (/an pour la période de référence). Les nombres entre parenthèses représentent la température maximale mensuelle pour les années de sécheresse et la moyenne des températures maximales pour la période de référence, exprimées en $^{\circ}\text{C}$. Les valeurs en bleu se réfèrent aux cumuls pluviométriques exprimés en mm (/an pour la période de référence). Le caractère gras renseigne sur les valeurs en dessous des normales pour les précipitations et au-dessus des normales pour la température. Les mois sélectionnés correspondent au printemps [avril-juin] et à l'été [juillet-septembre]

	1976	2011	2018	1954-2020
Avril	0 (21,1)	1 (25,1)		0 (12,7)
	27,8	33,1		69,6
Mai	5 (28,9)	2 (28)		1 (16,9)
	60,2	27,4		79,6
Juin	16 (33,7)	5 (32,9)		4 (19,9)
	9,1	87,2		82,0
Juillet	10 (34,1)		4 (34,5)	1 (21,8)
	69,9		8,0	85,5
Août	0 (28,9)		5 (34,4)	1 (21,5)
	21,5		60,7	85,1
Septembre	0 (22,2)		0 (26,7)	0 (18,2)
	62,1		54,4	76,5

Le fait qu'il y ait globalement plus de sécheresses estivales recensées que de printanières peut s'expliquer par la diminution des précipitations estivales. Néanmoins, les sécheresses printanières affectent plus la croissance du douglas car, contrairement à celles estivales, elles

ont concerné la quasi-totalité des peuplements à chaque fois. Sergent et al (2014) ont montré que plus le déficit en eau intervient tôt dans la saison, plus la croissance du douglas sera négativement impactée. Si le stress se produit fin hiver ou début printemps, le douglas, démarrant à peine une nouvelle saison de végétation, n'aura pas le temps d'accumuler des ressources et devra directement puiser dans ses réserves de l'année passée. Si ce stress précoce n'est pas levé rapidement par un apport de précipitations, l'arbre en pâtira également en été et c'est ce qu'il s'est passé en 1976. Ce phénomène permet aussi d'expliquer le fait que les sécheresses estivales (hormis 1976 et 2018), bien que plus nombreuses, ont été moins néfastes et ont impacté moins de peuplements. Ces années-là ont eu des printemps sans stress majeur qui ont permis aux arbres de les supporter. En outre, il aurait été intéressant d'avoir des informations plus précises sur la phénologie du douglas. Ainsi, il aurait été possible de dire si ce stress précoce est dû au positionnement dans le cycle phénologique ou au fait que la perturbation dure potentiellement plus longtemps puisqu'elle commence plus tôt.

Ces résultats laissent présager que le douglas est plutôt résistant aux sécheresses sévères ($\text{SPEI} < -1,5$) en Wallonie. Il faut vraiment avoir une sécheresse extrême ($\text{SPEI} < -2$) pour que sa croissance soit affectée. Ce constat est partagé par Sergent et al (2014) et par Vejpustková et Čihák (2019). Ces deux études ont montré que la croissance du douglas est très vulnérable aux épisodes de sécheresse exceptionnels et récurrents. Elles se sont basées toutes les deux sur 2003, reconnue comme une année particulièrement sèche. Sergent et al ont déterminé une réduction de croissance de 30,5% durant cette année par rapport à la période 1989-2008. Ici, bien que 2003 apparaisse pour la moitié des peuplements comme sécheresse estivale, le douglas a été très peu impacté par cette année. Il faut toutefois préciser que la Wallonie, comparée à d'autres régions européennes, a été relativement épargnée par la sécheresse de 2003. Granier et al (2007) ont étudié plusieurs peuplements un peu partout en Europe dont un situé à Vielsalm. Ce dernier n'a comptabilisé que 28 jours de stress avec une intensité faible contre, par exemple, 172 jours avec une forte intensité dans un peuplement de l'est de l'Allemagne. En outre, Vielsalm a conservé une réserve en eau utile maximale élevée pendant l'été 2003.

5.4.1) Perspectives d'amélioration

Cependant, la pertinence des résultats obtenus pour cette partie aurait pu être améliorée car la méthode utilisée a été simplifiée à partir d'une étude réalisée par Steckel et al (2020). La complexité de celle-ci et le manque de temps disponible pour ce travail ont fait qu'il n'a pas été possible de la reproduire entièrement. L'approche développée ici est donc incomplète mais elle permet d'avoir déjà un premier aperçu de la problématique traitée. Pour être plus précis, il aurait fallu commencer par avoir une sélection plus rigoureuse des années de sécheresse. Steckel et al (2020) ont utilisé un critère de SPEI similaire à celui de ce travail, mais également un critère basé sur les PY. Ce dernier implique que l'année donnée doit être

considérée comme une PY négative selon la méthode *normalization in a moving window*. Ainsi, seules les années classées comme PY négative et sécheresse selon le SPEI sont retenues pour la suite. Ce double critère permet de s'assurer que seule la sécheresse soit responsable de la croissance exceptionnellement faible, et non le *masting*⁴, les maladies, les insectes ou encore le gel. Cependant, il ne permet pas de prendre en compte les années de sécheresse au cours desquelles les arbres auraient peu ou pas réagi.

Les années sélectionnées par cette approche sont ensuite utilisées pour calculer les indices de résistance, de récupération et de résilience (Figure 19). Ceux-ci pourraient apporter une réelle plus-value au travail réalisé ici car, comparés uniquement à l'indice de croissance, ils permettent de mieux décrire l'impact des sécheresses sur la croissance. Selon Lloret et al (2011), la résistance est le rapport entre la croissance pendant l'événement de sécheresse (C) et la croissance moyenne pendant la période pré-sécheresse (C_{av}), et décrit la capacité des arbres à amortir le stress subi. La récupération est le rapport entre la croissance moyenne pendant la période post-sécheresse (C_{ap}) et C, et mesure l'aptitude de l'arbre à restaurer un niveau de croissance après une perturbation. La résilience est le rapport entre C_{ap} et C_{av} , et montre l'aptitude de l'arbre à retrouver le taux de croissance observé avant la sécheresse. Dans leur article, Steckel et al (2020) ont défini C_{av} et C_{ap} comme étant la croissance moyenne des trois années avant et après la sécheresse. Selon eux, cette période de trois ans représente un bon compromis entre un laps de temps suffisamment long, l'assurance d'une bonne estimation de la croissance moyenne avant et après sécheresse, et le risque d'un chevauchement des périodes pré- et post-sécheresse avec une autre sécheresse adjacente.

Enfin, ces auteurs ont créé un modèle linéaire mixte où la réponse (résistance, résilience ou récupération) dépend de facteurs fixes et aléatoires. Ces derniers étaient causés par le regroupement spatial des arbres échantillonnés alors que les fixes pouvaient être l'essence, le type de peuplement ou encore les conditions stationnelles. Concernant le douglas, il aurait été intéressant de tester la densité comme facteur fixe pour voir si elle exerce une influence sur la réponse à la sécheresse et ainsi, compléter les informations de la section précédente.

⁴ Fructification irrégulière en termes d'abondance d'une année à l'autre.

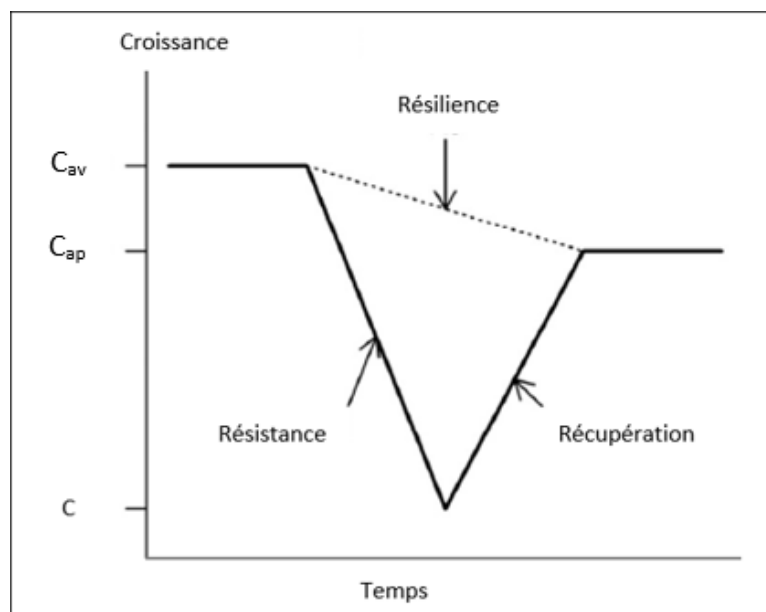


Figure 19 : Illustration des concepts de résistance, résilience et récupération

5.5) Conséquences pour la gestion forestière

Au vu de la situation inquiétante du douglas qui est sujet aux attaques de différents ravageurs et aux effets des changements climatiques, les acteurs forestiers se posent naturellement la question suivante : faut-il abandonner le douglas ? Même si les craintes sont fondées, il ne faut pas prendre de décisions trop prématurées car cette essence a de nombreuses qualités : productivité élevée, propriétés mécaniques intéressantes, grande capacité d'adaptation en Wallonie et potentiel d'avenir face aux changements climatiques (remis en question aujourd'hui). De plus, malgré les incertitudes, le douglas a plutôt bien franchi les obstacles jusqu'ici, comparé à l'épicéa par exemple. L'évolution de son prix au m³, qui est resté relativement stable en fonction du temps, le prouve (OEWB, 2021).

Ensuite, ce choix est difficile à prendre car que mettre à la place ? Les essences conseillées par le fichier écologique des essences (Petit et al., 2017) ne sont déjà pas très nombreuses et celles utilisées en forêt le sont encore moins. Il est possible de planter des essences exotiques, comme le cèdre de l'Atlas, mais il y a peu, voire pas du tout, d'informations quant à leur survie en Wallonie. Surtout que le douglas, comparé à d'autres essences résineuses ou feuillues, reste le moins sensible au climat (Manise, 2012; Vejpusťková et Čihák, 2019). Lévesque et al (2015) partagent aussi cet avis et précisent que la sensibilité moyenne⁵ du douglas, équivalente à 0,19 et semblable aux sensibilités obtenues ici (Tableau 6), est inférieure à celle d'autres résineux comme le pin noir (0,21), le pin sylvestre (0,23), le mélèze (0,29) et l'épicéa (0,23). Il s'avère que le douglas, même sous condition de déficit hydrique, a la possibilité de fermer ses stomates tardivement (annexe A), ce qui lui permet de réduire la perte d'eau par transpiration et de maintenir un système hydraulique opérationnel. Ainsi, sa capacité

⁵ Pourcentage moyen de variation de largeur entre deux cernes consécutifs

photosynthétique peut être maintenue. Une fois cet événement terminé, l'activité stomatique et photosynthétique reviennent très rapidement à la normale, témoignant d'une aptitude de récupération très performante (Lassoie et Salo, 1981). Tout ceci permet au douglas de conserver un niveau de croissance élevé et ce, même en période de sécheresse.

La gestion forestière doit être adaptée afin d'améliorer les capacités de résistance, résilience et récupération par rapport aux événements climatiques. Spiecker et al (2019) estiment que des éclaircies adaptées et bien programmées permettent d'augmenter la résilience des peuplements car cela réduit la compétition pour l'eau. Cette ressource hydrique est cruciale car la récupération est plus rapide lorsque la réserve en eau utile maximale est élevée (Sergent, 2011). Un autre moyen pour améliorer la récupération est de restaurer la fertilité nutritive des sols. De fait, Sergent et al (2014) ont montré que les peuplements sur les sites les plus fertiles en azote ont présenté des vitesses de récupération plus importantes après un épisode de sécheresse que ceux sur les sites moins fertiles. Pour enrichir les sols pauvres, des apports d'engrais azotés peuvent être envisagés. Cette technique a déjà porté ses fruits dans des peuplements de sapin (Lebourgeois et al., 1993). De plus, Vejpusťková et Čihák (2019) précisent que la résistance à la sécheresse doit être un critère important lors du choix de la provenance pour effectuer une plantation. Spiecker et al (2019) ajoutent que les variétés *cesia* et *glauca* du douglas (celui étudié ici est la variété *menziesii*) sont plus vulnérables aux maladies comme la rouille suisse, et que la provenance joue également un rôle important.

Un autre élément possible pour améliorer ces capacités est de recourir aux peuplements mélangés. Ce type de gestion forestière a déjà prouvé ses avantages pour de nombreuses essences (Pretzsch et al., 2013; Steckel et al., 2020). En Wallonie, le douglas est majoritairement mélangé avec l'épicéa (Alderweireld et al., 2015). Il est également possible de le mixer avec des feuillus comme le hêtre commun. Thomas et al (2015) ont étudié cette association et bien que le douglas soit largement plus compétiteur en raison notamment de sa croissance plus rapide, de sa meilleure efficacité de l'eau ou encore de son ombrage efficace des plantes concurrentes, le mélange de ces deux essences semble donner des résultats concluants. La productivité n'est, sans surprise, pas supérieure à celle d'un peuplement pur de douglas mais la combinaison du hêtre avec maximum 33% de douglas donne la plus grande productivité. Il y a aussi un avantage pour le hêtre qui souffre de plus en plus avec les effets des changements climatiques et qui pourrait ainsi subsister. Le douglas pourrait par conséquent être une essence intéressante à mélanger afin d'obtenir des peuplements à la fois avec une production de bois importante et avec une plus grande résistance et résilience. Lévesque et al (2015) partagent ce point de vue et proposent de combiner le douglas avec des essences plus sensibles à la sécheresse comme l'épicéa ou le pin sylvestre.

En Wallonie, un projet pilote intitulé « Forêt résiliente » a été lancé récemment et vise à encourager les propriétaires forestiers à réfléchir différemment leur gestion pour régénérer

leurs forêts et les orienter vers une forêt plus résiliente aux changements climatiques. L'idée est de planter des peuplements mélangés avec des essences adaptées à ces changements et intégrant davantage la biodiversité. Si tous les critères sont respectés, les gestionnaires peuvent bénéficier d'une aide physique et financière pour réaliser ces plantations. Le Bois de Lauzelle, forêt universitaire appartenant à l'UCLouvain et prônant la recherche scientifique, a pu profiter de cette aide pour planter des peuplements test inédits comme un mélange sapin de Nordmann - tilleul.

Enfin, l'OWSF (2020) ne recommande pas de délaisser le douglas mais conseille de faire attention à plusieurs points :

- Même si cette règle vaut pour toutes les essences, il est important de rappeler qu'il faut planter le douglas dans des stations où il est à l'optimum. Bien qu'il ait une grande capacité d'adaptation et que le fichier écologique des essences le considère comme étant à l'optimum partout en Wallonie, il faut veiller à avoir des conditions locales favorables comme un sol frais et bien aéré.
- La plantation est une étape critique dans la vie d'un peuplement et doit donc être réalisée correctement. Balleux (2009) a écrit un guide pour bien réussir les plantations de douglas. Les racines doivent notamment être disposées de façon adéquate pour éviter qu'elles ne s'emmêlent. La période de plantation est également importante pour qu'il y ait suffisamment d'eau à disposition. En suivant ces instructions, les risques de stress de début de vie seront considérablement réduits et les jeunes arbres auront plus de chances de survivre. Une bonne plantation est d'autant plus importante que ce sont surtout les jeunes peuplements qui souffrent des changements climatiques et des sécheresses notamment (OWSF, 2021). Arrivés à l'âge adulte, les arbres sont peu impactés (Lévesque et al., 2015).
- Les attaques de champignons, courantes dans les plantations, sont favorisées par une atmosphère humide. Cette condition peut se réaliser lorsque les plants se retrouvent confinés par une strate herbacée abondante. Des dégagements sont donc nécessaires pour empêcher cette situation.
- Le douglas est souvent géré comme l'épicéa mais cette essence requiert des interventions plus dynamiques afin d'éviter de recréer les situations de confinement évoquées ci-dessus.

Ces mesures ne garantissent pas la survie du douglas mais elles permettent de réduire au maximum les stress qu'il peut subir. Un dernier point important à prendre en considération est le fait d'attendre d'être sûr que l'arbre soit bien mort. La cécidomyie du douglas peut parfois totalement défolier un arbre mais cela ne veut pas forcément dire qu'il est mort pour autant. Il vaut mieux attendre fin mai, lorsque le débourrement est terminé, avant de prendre une décision.

6) Conclusion

Les principaux résultats de cette étude montrent que la croissance du douglas est essentiellement influencée positivement par les températures minimale et moyenne, les précipitations et le SPEI durant le mois de février de l'année *n*. Ceci signifie que la croissance du douglas est favorisée par les hivers doux et humides, ce qui est un avantage avec les changements climatiques annoncés. Elle est également impactée positivement par la température minimale au cours du mois d'octobre de l'année *n-1* et négativement par la température maximale pendant le mois d'octobre de l'année *n*. Le désavantage derrière cela est que son aoûtement est menacé par la hausse des températures maximales automnales, le rendant potentiellement plus vulnérable aux gelées précoces (Bansal et al., 2015). Celles-ci pourraient tuer les jeunes aiguilles avant la maturité et celles matures avant qu'elles ne commencent leur sénescence (Estiarte et Peñuelas, 2015). Néanmoins, l'augmentation des températures minimales automnales contrebalance ce risque. Une autre hypothèse pourrait être que la respiration soit favorisée au détriment de la productivité primaire nette en cas de hausse des températures (Girardin et al., 2016). Ces relations en février et en octobre, alors que la saison de végétation du douglas s'étend de mars à octobre, montrent bien que les conditions environnementales au début et à la fin de la saison sont cruciales pour sa croissance. L'allongement de cette saison de végétation, dû au réchauffement global, pourrait en être la cause (Linderholm, 2006).

Le douglas est moins influencé par le climat, et notamment par les sécheresses, que d'autres essences comme le mélèze d'Europe, l'épicéa commun et le pin sylvestre (Lévesque et al., 2015). De fait, sa régulation stomatique tardive lui permet de mieux résister aux déficits hydriques et de conserver ainsi un niveau de croissance élevé (Angelier, 2007). Cette capacité n'est toutefois pas infaillible. Lorsque la sécheresse est extrême, comme celles de 1976 et de 2018, la croissance du douglas est quand même réduite. En outre, une sécheresse printanière, même si moins sévère comme celle de 2011, sera plus dommageable qu'une sécheresse estivale en raison du stockage impossible des ressources et de l'épuisement des réserves (Sergent et al., 2014). Le nombre d'années caractéristiques négatives, souvent liées aux sécheresses, est en hausse ces dernières années. Le douglas risque donc d'y être confronté plus souvent dans le futur.

Quant à l'effet de la densité des peuplements, il n'a pas été clairement démontré. La largeur des cernes est logiquement plus grande dans les peuplements moins denses en raison de la compétition moins forte. Les peuplements les moins denses semblent moins impactés par les précipitations et le SPEI en raison de valeurs de corrélation globalement plus faibles, ce qui est logique puisque l'accès à l'eau y est moins restreint. Concernant les températures, la relation entre la croissance et la densité est nulle ou inexistante.

Au vu de ces résultats, le douglas wallon présente des caractéristiques intéressantes dans le contexte actuel. La décision de ne plus planter de douglas est compliquée à prendre puisqu'il

possède de nombreux avantages et que les autres résineux présents actuellement en Wallonie sont plus sensibles au climat (Lévesque et al., 2015). De plus, les peuplements adultes sont globalement peu impactés. En revanche, les plantations souffrent des ravageurs et des sécheresses. Il faut donc réaliser ces plantations correctement et au bon endroit afin de réduire au maximum les stress et ainsi augmenter les chances de survie (OWSF, 2021).

Si le douglas n'est vraiment plus souhaité, il faudra se tourner vers d'autres essences considérées comme ayant un potentiel d'avenir. Les espèces méditerranéennes comme le cèdre de l'Atlas sont souvent citées (Pirronitto et al., 2020). Toutefois, le manque d'informations quant à leur capacité d'adaptation en Wallonie est criant. Il faudrait donc réaliser plus d'expériences avec des peuplements test, comme ce qui a été fait dans le Bois de Lauzelle. Le projet pilote « Forêt résiliente » de la Région wallonne peut aider à ce niveau-là.

Pour conclure, j'aimerais citer une phrase marquante entendue lors d'un cours : « La forêt est un art et une science ». Une science car il existe plusieurs principes théoriques qui régissent la sylviculture. Un art car un arbre reste un être vivant avec son côté imprévisible. Il y aura donc toujours une part d'incertitude dans la gestion forestière et c'est à l'Homme de s'adapter.

Bibliographie

- Aitken, S.N., Yeaman, S., Holliday, J.A., Wang, T., Curtis-McLane, S., 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evol. Appl.* 1, 95–111.
<https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Alderweireld, M., Burnay, F., Pitchugin, M., Lecomte, H., 2015. Inventaire Forestier Wallon - Résultats 1994 - 2012. SPW, DGO3, DNF.
- Allen, R., Pereira, L., Smith, M., Raes, D., 1998. Crop evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements, irrigation and drainage paper 56, FAO. ed. Rome.
- Angelier, A., 2007. Douglasaies françaises. Guide des sylviculteurs, Office national des forêts. Paris.
- Aussenac, G., 2000. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Ann Sci* 57, 287–301.
<https://doi.org/10.1051/forest:2000119>
- Aussenac, G., Granier, A., 1988. Effects of thinning on water stress and growth in Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 18, 100–105. <https://doi.org/10.1139/x88-015>
- Balleux, P., 2009. Réussir ses plantations de douglas. SPW - DNF - Fiche Tech. 19.
- Bansal, S., St. Clair, J.B., Harrington, C.A., Gould, P.J., 2015. Impact of climate change on cold hardiness of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*): environmental and genetic considerations. *Glob. Change Biol.* 21, 3814–3826. <https://doi.org/10.1111/gcb.12958>
- Beck, E.H., Heim, R., Hansen, J., 2004. Plant resistance to cold stress: Mechanisms and environmental signals triggering frost hardening and dehardening. *J. Biosci.* 29, 449–459.
<https://doi.org/10.1007/BF02712118>
- Biévelet, C., Henin, J.-M., Jourez, B., Hebert, J., Lecomte, H., 2007. Le douglas en Région wallonne, état des lieux et tendances. *Forêt.Nature* 90, 27.
- Bille, F., 2011. La rouille suisse du Douglas. *Silva Belg.* 6/2011, 14.
- Biondi, F., Qeadan, F., 2008. Inequality in Paleorecords. *Ecology* 89, 1056–1067.
- Biondi, F., Waikul, K., 2004. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Comput. Geosci.* 30, 303–311.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.11.004>
- Blasing, T.J., Solomon, A.M., Duveck, D.N., 1984. Response function revisited. *Tree-Ring Bull.* 44, 1–15.
- Bock, L., Legrain, X., Veron, P., Bracke, C., Bah, B.B., Lejeune, P., 2008. Carte Numérique des Sols de Wallonie.
- Bolte, A., Ammer, C., Löf, M., Madsen, P., Nabuurs, G.-J., Schall, P., Spathelf, P., Rock, J., 2009. Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand. J. For. Res.* 24, 473–482.
<https://doi.org/10.1080/02827580903418224>
- Bréda, N., Badeau, V., 2008. Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? *Ecosystèmes Évén. Clim. Extrêm.* 340, 651–662. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.08.003>
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., Dreyer, E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann Sci* 63, 625–644. <https://doi.org/10.1051/forest:2006042>
- Bunn, A.G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26, 115–124.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Bussotti, F., Pollastrini, M., Holland, V., Brüggemann, W., 2015. Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environ. Exp. Bot.* 111, 91–113.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.11.006>
- Castaldi, C., Marchi, M., Vacchiano, G., Corona, P., 2020. Douglas-fir climate sensitivity at two contrasting sites along the southern limit of the European planting range. *J. For. Res.* 31, 2193–2204. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01041-5>

- CDAF, 2008. Douglas : propriétés, défauts et usages [WWW Document]. Orientat. Sylvic. URL http://www.cdaf.be/orientations_sylvicoles.html#mark (accessed 2.24.22).
- Cochard, H., Lemoine, D., Améglio, T., Granier, A., 2001. Mechanisms of xylem recovery from winter embolism in *Fagus sylvatica*. *Tree Physiol.* 21, 27–33. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.1.27>
- Colin, G., 2002. Les forêts françaises après les tempêtes de décembre 1999. *Inventaire For. Natl.*
- Cook, E.R., Kairiukstis, L.A., 1990. *Methods of Dendrochronology : Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Cook, E.R., Peters, K., 1981. The smoothing spline : a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Res.* 41, 45–53.
- Cropper, J.P., 1979. Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bull.* 39, 47–59.
- Dale, V.H., Joyce, L.A., McNulty, S., Neilson, R.P., Ayres, M.P., Flannigan, M.D., Hanson, P.J., Irland, L.C., Lugo, A.E., Peterson, C.J., Simberloff, D., Swanson, F.J., Stocks, B.J., Wotton, B.M., 2001. Climate Change and Forest Disturbances: Climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. *BioScience* 51, 723–734. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0723:CCAFD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0723:CCAFD]2.0.CO;2)
- De Melo Moura, J.D., 1996. Utilisation en structures des résineux à faible densité : conséquences technologiques de scénarios sylvicoles extrêmes (Theses). Université Henri Poincaré - Nancy 1.
- Domec, J., Gartner, B.L., 2002. How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood? *J. Exp. Bot.* 53, 2369–2379. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf100>
- DREAL Centre-Val de Loire, 2019. Évolution des dates de floraison du Douglas à Orléans [WWW Document]. URL <http://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr/evolution-des-dates-de-floraison-du-douglas-a-a3455.html> (accessed 3.7.22).
- Dumé, G., Gauberville, C., Mansion, D., Rameau, J.-C., Bardat, J., Bruno, E., Keller, R., 2018. *Flore forestière française. Guide écologique illustré. Tome 1 : plaines et collines (nouvelle édition)*, Centre National de la Propriété Forestière. ed.
- Duveneck, M.J., Thompson, J.R., 2017. Climate change imposes phenological trade-offs on forest net primary productivity. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 122, 2298–2313. <https://doi.org/10.1002/2017JG004025>
- Efron, B., 1979. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *Ann. Stat.* 7, 1–26.
- 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. *Glob. Change Biol.* 21, 1005–1017. <https://doi.org/10.1111/gcb.12804>
- European Environment Agency, 2017. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 (No. 1).
- Feliksik, E., Wilczyński, S., 2004. Dendroclimatological regions of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) in western Poland. *Eur. J. For. Res.* 123, 39–43. <https://doi.org/10.1007/s10342-004-0017-7>
- Fritts, H.C., 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London, New York, San Francisco.
- GIEC, 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* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)], Cambridge University Press. In Press. ed.
- GIEC, 2014. *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. Genève, Suisse.

- Girard, Q., 2009. La forêt face aux événements climatiques extrêmes : étude de l'impact de la sécheresse de 2003 sur la croissance des arbres des forêts françaises à partir des données IFN.
- Girardin, M.P., Hogg, E.H., Bernier, P.Y., Kurz, W.A., Guo, X.J., Cyr, G., 2016. Negative impacts of high temperatures on growth of black spruce forests intensify with the anticipated climate warming. *Glob. Change Biol.* 22, 627–643. <https://doi.org/10.1111/gcb.13072>
- Giuggiola, A., Bugmann, H., Zingg, A., Dobbertin, M., Rigling, A., 2013. Reduction of stand density increases drought resistance in xeric Scots pine forests. *For. Ecol. Manag.* 310, 827–835. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.030>
- Granier, A., Reichstein, M., Bréda, N., Janssens, I.A., Falge, E., Ciais, P., Grünwald, T., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Facini, O., Grassi, G., Heinesch, B., Ilvesniemi, H., Keronen, P., Knohl, A., Köstner, B., Lagergren, F., Lindroth, A., Longdoz, B., Loustau, D., Mateus, J., Montagnani, L., Nys, C., Moors, E., Papale, D., Peiffer, M., Pilegaard, K., Pita, G., Pumpanen, J., Rambal, S., Rebmann, C., Rodrigues, A., Seufert, G., Tenhunen, J., Vesala, T., Wang, Q., 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agric. For. Meteorol.* 143, 123–145. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.004>
- Gricar, J., Prislán, P., De Luis, M., Gryc, V., Hacurova, J., Vavrčik, H., Čufar, K., 2015. Plasticity in variation of xylem and phloem cell characteristics of Norway spruce under different local conditions. *Front. Plant Sci.* 6.
- Grissino-Mayer, H.D., 2001. Evaluating crossdating accuracy : a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Res.* 57, 205–221.
- Guehl, J.M., Clerc, B., Desjeunes, J.M., 1985. Etude comparée des potentialités hivernales d'assimilation carbonée de trois conifères de la zone tempérée (*Pseudotsuga menziesii* Mirb., *Abies alba* Mill. et *Picea excelsa* Link.). *Ann. Sci. For. INRAEDP Sci.* 42, 23–28.
- Guiot, J., 1991. The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bull.* 51, 39–41.
- Holmes, R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.* 43.
- Houllier, F., Bontemps, J.-D., Dhôte, J.-F., 2006. Changement de productivité des forêts: diagnostics et théories. *For. Pollut. Journ. Etudes Environ. For. Société XVI-XXe Siècles* 17, 55–60.
- Hout Info Bois, n.d. Les essences [WWW Document]. URL <https://www.houtinfobois.be/essences-applications/essences/> (accessed 2.24.22).
- Huart, O., Rondeux, J., 2001. Genèse, évolution et multiples facettes d'une maladie inhabituelle affectant le hêtre en région wallonne. *Forêt.Nature* 8–19.
- IRM, 2015. Événements remarquables depuis 1901 [WWW Document]. IRM. URL <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/evenements-remarquables-depuis-1901> (accessed 4.8.22).
- IRM, n.d. La sécheresse : situation du printemps 2018 [WWW Document]. IRM. URL <https://www.meteo.be/fr/infos/actualite/2018/la-secheresse-situation-actuelle> (accessed 4.9.22a).
- IRM, n.d. Ce que l'on sait sur les pluies exceptionnelles des 14 et 15 juillet 2021 [WWW Document]. IRM. URL <https://www.meteo.be/fr/infos/actualite/ce-que-lon-sait-sur-les-pluies-exceptionnelles-des-14-et-15-juillet-2021> (accessed 4.9.22b).
- IRM, n.d. Bilan climatologique de l'année 2003 [WWW Document]. IRM. URL <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2002-2005/2003/2003> (accessed 2.22.22c).
- IRM, n.d. La sécheresse 2016-2017 : les archives [WWW Document]. IRM. URL <https://www.meteo.be/fr/infos/newsletter/articles-2017/la-secheresse-2016-2017-les-archives> (accessed 5.23.22d).

- Jetschke, G., van der Maaten, E., van der Maaten-Theunissen, M., 2019. Towards the extremes: A critical analysis of pointer year detection methods. *Dendrochronologia* 53, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.11.004>
- Johnson, W.K., 1948. Resistant vitality of the sequoias. *Or. State Coll.*
- Joussement, F., Titeux, H., Ponette, Q., 2020. Identification des zones à risques nutritionnels. Plan quinquennal de recherche et de vulgarisation forestières, rapport succinct, juin 2020.
- Krueger, K.W., Trappe, J.M., 1967. Food Reserves and Seasonal Growth of Douglas-Fir Seedlings. *For. Sci.* 13, 192–202. <https://doi.org/10.1093/forestscience/13.2.192>
- Landmann, G., Dupouey, J.-L., Badeau, V., Lefevre, Y., Bréda, N., Nageleisen, L.-M., Chuine, I., Lebourgeois, F., 2007. Le hêtre face aux changements climatiques. *Rendez-Vous Tech. ONF, Office national des forêts* 29–38. <https://doi.org/hal-01195001f>
- Lassoie, J.P., Salo, D.J., 1981. Physiological response of large Douglas-fir to natural and induced soil water deficits. *Can. J. For. Res.* 11, 139–144. <https://doi.org/10.1139/x81-019>
- Lebourgeois, F., Becker, M., Bonneau, M., 1993. Influence d'une fertilisation minérale sur la croissance radiale de sapinières dépérissantes dans les Vosges. *Rev. For. Fr.* 45, 639–650.
- Lebourgeois, F., Eberlé, P., Mérian, P., Seynave, I., 2014. Social status-mediated tree-ring responses to climate of *Abies alba* and *Fagus sylvatica* shift in importance with increasing stand basal area. *For. Ecol. Manag.* 328, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.038>
- Lebourgeois, F., Gomez, N., Pinto, P., Mérian, P., 2013. Mixed stands reduce *Abies alba* tree-ring sensitivity to summer drought in the Vosges mountains, western Europe. *For. Ecol. Manag.* 303, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.04.003>
- Lebourgeois, F., Mérian, P., 2012. Principes et méthodes de de la dendrochronologie, Master. Nancy, France.
- Lebourgeois, F., Paul, E., Nicolas, G., Mérian, P., Seynave, I., 2012. Quelles essences favoriser dans les peuplements mélangés réguliers pour augmenter la résistance et la résilience des arbres au climat et à ses aléas ? Etude dendroécologique multi'espèces en contextes collinéen et montagnard - Rapport Scientifique, Réseau AFORCE Adaptation des forêts au changement climatique, Septembre 2012.
- Lebourgeois, F., Rathgeber, C.B.K., Ulrich, E., 2010. Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *J. Veg. Sci.* 21, 364–376. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01148.x>
- Legay, M., 2014. Effets attendus du changement climatique sur l'arbre et la forêt, in: *L'arbre et La Forêt à l'épreuve d'un Climat Qui Change*, La Documentation Française. pp. 33–64.
- Leroy, Q., 2022. Alerte scolyte. *Off. Wallon Santé For.*
- Lévesque, M., Rigling, A., Brang, P., 2015. Réponse à la sécheresse de conifères indigènes et exotiques : une étude dendroécologique. *Rev. For. Fr.* 67, 407–420. <https://doi.org/10.4267/2042/59955>
- Linderholm, H.W., 2006. Growing season changes in the last century. *Agric. For. Meteorol.* 137, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.006>
- Lindner, M., Fitzgerald, J.B., Zimmermann, N.E., Reyer, C., Delzon, S., Maaten, E. van der, Schelhaas, M.-J., Lasch, P., Eggers, J., Maaten-Theunissen, M. van der, Suckow, F., Psomas, A., Poulter, B., Hanewinkel, M., 2014. Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *J. Environ. Manage.* 146, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.030>
- Liu, Q., Piao, S., Janssens, I.A., Fu, Y., Peng, S., Lian, X., Ciais, P., Myneni, R.B., Peñuelas, J., Wang, T., 2018. Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. *Nat. Commun.* 9, 426. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02690-y>
- Lloret, F., Keeling, E.G., Sala, A., 2011. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120, 1909–1920. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x>

- Manise, T., 2012. Estimation du bilan hydrique et du risque de stress hydrique pour des peuplements d'avenir en Région wallonne. UCLouvain - Earth Life Inst.
- Martinez-Meier, A., Sanchez, L., Pastorino, M., Gallo, L., Rozenberg, P., 2008. What is hot in tree rings? The wood density of surviving Douglas-firs to the 2003 drought and heat wave. *For. Ecol. Manag.* 256, 837–843. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.05.041>
- Maxwell, R.S., Larsson, L.-A., 2021. Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application. *Dendrochronologia* 67, 125841. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125841>
- Mérian, P., 2012a. Variations spatio-temporelles de la réponse au climat des essences forestières tempérées : quantification du phénomène par approche dendroécologique et influence de la stratégie d'échantillonnage (Theses). AgroParisTech.
- Mérian, P., 2012b. POINTER and DENDRO - Two applications under R software for analyzing tree response to climate using dendroecological approach. *Rev. For. Française* 64, 789–798.
- Mosteller, F., Tukey, J.W., 1977. *Data Analysis and Regression : A Second Course in Statistics*, p. 588. ed.
- Nageleisen, L.-M., Piou, D., Saintonge, F.-X., Riou-Nivert, P., 2009. La santé des Forêts - Maladies, insectes, accidents climatiques... Diagnostic et prévention. Ministère de L'Agriculture et de la Pêche;Département de la Santé des Forêts, Paris.
- Narayanaraj, G., Wimberly, M.C., 2013. Influences of forest roads and their edge effects on the spatial pattern of burn severity. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 23, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.12.006>
- Neuwirth, B., Schweingruber, F.H., Winiger, M., 2007. Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *EuroDendro 2005 Hum. Environ.* 24, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2006.05.004>
- Nicault, A., Bégin, Y., Joël, G., 2011. La standardisation des séries dendrochronologiques, in: *La Dendroécologie. Principes, Méthodes et Applications*. Laval, pp. 199–228.
- OEWB, 2021. *PanoraBois Wallonie édition 2021*.
- OEWB, n.d. *PanoraBois Wallonie édition de 2012 à 2021 [WWW Document]*. Panorabois. URL <https://www.oewb.be/la-filiere/panorabois> (accessed 2.24.22).
- Orazio, C., Stojnic, S., Stojanovic, D., Gartzia-Bengoetxea, N., Hayes, S., 2014. Influence du changement climatique sur les forêts européennes et sur le secteur forestier.
- OWSF, 2021. La lettre d'info de l'OWSF n°8. Données 2020.
- OWSF, 2020. La lettre d'info de l'OWSF n°7. Données 2019.
- OWSF, 2016. La lettre d'info de l'OWSF n°3. Données 2015.
- OWSF, 2014. La lettre d'info de l'OWSF n°1. Données 2012-2013.
- OWSF, n.d. *Contarinia pseudotsugae : Un nouvel insecte détecté sur Douglas*.
- Perin, J., Hebert, J., Lejeune, P., Claessens, H., 2016. Nouvelles normes sylvicoles pour les peuplements purs équiennes d'épicéa et de douglas.
- Perin, J., Thier, O., Claessens, H., Lejeune, P., Hébert, J., 2014. Nouvelles courbes de productivité harmonisées pour le douglas, l'épicéa et les mélèzes en Wallonie. *For. Wallonne* 129, 26–41.
- Petit, S., Cordier, S., Claessens, H., Ponette, Q., Vincke, C., Marchal, D., Weissen, F., 2017. Fichier écologique des essences. Forêt.Nature, UCLouvain-ELIe, ULiège-GxABT, SPWARNE-DNF [WWW Document]. URL fichierecologique.be (accessed 2.22.22).
- Pirronitto, S., Schmitz, S., Claessens, H., 2020. Le cèdre de l'Atlas en Wallonie : premier état des lieux de la situation. *Forêt.Nature* 157, 40–46.
- Potop, V., Boroneanț, C., Možný, M., Štěpánek, P., Skalák, P., 2014. Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic. *Theor. Appl. Climatol.* 115, 563–581. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0908-y>
- Pretzsch, H., Schütze, G., Uhl, E., 2013. Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biol.* 15, 483–495. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x>

- Rais, A., van de Kuilen, J.-W.G., Pretzsch, H., 2014. Growth reaction patterns of tree height, diameter, and volume of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) under acute drought stress in Southern Germany. *Eur. J. For. Res.* 133, 1043–1056. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0821-7>
- Reineke, L.H., 1933. Perfection a stand-density index for even-aged forest. *J. Agric. Res.* 46, 627–638.
- Rigling, D., Prospero, S., 2018. *Cryphonectria parasitica*, the causal agent of chestnut blight: invasion history, population biology and disease control. *Mol. Plant Pathol.* 19, 7–20. <https://doi.org/10.1111/mpp.12542>
- Robinet, C., Rousselet, J., Imbert, C.-E., Sauvard, D., Garcia, J., Goussard, F., Roques, A., 2010. Le réchauffement climatique et le transport accidentel par l'homme responsables de l'expansion de la chenille processionnaire du pin. *For. Wallonne 1988 - 2015 Devient For. Nat.* 19–27.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., Carraro, V., 2007. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia* 152, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0625-7>
- Saltré, F., Saint-Amant, R., Gritti, E.S., Brewer, S., Gaucherel, C., Davis, B.A.S., Chuine, I., 2013. Climate or migration: what limited European beech post-glacial colonization? *Glob. Ecol. Biogeogr.* 22, 1217–1227. <https://doi.org/10.1111/geb.12085>
- Schiller, G., Cohen, Y., 1995. Water regime of a pine forest under a Mediterranean climate. *Agric. For. Meteorol.* 74, 181–193. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02195-P](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02195-P)
- Schmid, M., Pautasso, M., Holdenrieder, O., 2014. Ecological consequences of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) cultivation in Europe. *Eur. J. For. Res.* 133, 13–29. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0745-7>
- Schmitt, A., Trouvé, R., Seynave, I., Lebourgeois, F., 2020. Decreasing stand density favors resistance, resilience, and recovery of *Quercus petraea* trees to a severe drought, particularly on dry sites. *Ann. For. Sci.* 77, 52. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00959-9>
- Schmitz, S., Charlier, A., Delahaye, L., Chandelier, A., 2016. La santé des jeunes plantations de douglas en Wallonie : un état des lieux. *Forêt.Nature* 138.
- Schweingruber, F.H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F., Bräker, O.U., 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 8, 9–38.
- Sergent, A.-S., 2011. Diversité de la réponse au déficit hydrique et vulnérabilité au dépérissement du douglas. Université d'Orléans.
- Sergent, A.-S., Rozenberg, P., Bréda, N., 2014. Douglas-fir is vulnerable to exceptional and recurrent drought episodes and recovers less well on less fertile sites. *Ann. For. Sci.* 71, 697–708. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0220-5>
- Skubel, R., Arain, M.A., Peichl, M., Brodeur, J.J., Khomik, M., Thorne, R., Trant, J., Kula, M., 2015. Age effects on the water-use efficiency and water-use dynamics of temperate pine plantation forests. *Hydrol. Process.* 29, 4100–4113. <https://doi.org/10.1002/hyp.10549>
- Spiecker, H., Lindner, M., Schuler, J., 2019. Douglas-fir – an option for Europe. *EFI What Sci. Can Tell Us* 9.
- SRFB, n.d. Le scolyte. URL https://www.srfb.be/informations-sur-les-forets/le_scolyte/ (accessed 2.26.22).
- Steckel, M., del Río, M., Heym, M., Aldea, J., Bielak, K., Brazaitis, G., Černý, J., Coll, L., Collet, C., Ehbrecht, M., Jansons, A., Nothdurft, A., Pach, M., Pardos, M., Ponette, Q., Reventlow, D.O.J., Sitko, R., Svoboda, M., Vallet, P., Wolff, B., Pretzsch, H., 2020. Species mixing reduces drought susceptibility of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) – Site water supply and fertility modify the mixing effect. *For. Ecol. Manag.* 461, 117908. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117908>

- Taeger, S., Fussi, B., Konnert, M., Menzel, A., 2013. Large-scale genetic structure and drought-induced effects on European Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings. *Eur. J. For. Res.* 132, 481–496. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0689-y>
- Tang, G., Beckage, B., Smith, B., Miller, P.A., 2010. Estimating potential forest NPP, biomass and their climatic sensitivity in New England using a dynamic ecosystem model. *Ecosphere* 1, art18. <https://doi.org/10.1890/ES10-00087.1>
- Thomas, F.M., Bögelein, R., Werner, W., 2015. Interaction between Douglas fir and European beech - Investigations in pure and mixed stands. *Forstarchiv* 86, 83–91. <https://doi.org/10.4432/0300-4112-86-83>
- ULG, n.d. Estimation de l'indice de productivité [WWW Document]. *Gest. Ressour. For.* URL <https://www.gembloux.ulg.ac.be/gestion-des-ressources-forestieres/> (accessed 2.18.22).
- 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* 47.
- Vejpustková, M., Čihák, T., 2019. Climate Response of Douglas Fir Reveals Recently Increased Sensitivity to Drought Stress in Central Europe. *Forests* 10. <https://doi.org/10.3390/f10020097>
- Vennetier, M., 2012. Changement climatique et dépérissements forestiers : causes et conséquences, in: *Changement Climatique et Modification Forestière*. CNRS, pp. 50–60.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.* 23, 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wigley, T.M.L., Briffa, K.R., Jones, P.D., 1984. On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23, 201–213.
- Zang, C., Biondi, F., 2015. treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography* 38, 431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>
- Zeng, H., Peltola, H., Talkkari, A., Venäläinen, A., Strandman, H., Kellomäki, S., Wang, K., 2004. Influence of clear-cutting on the risk of wind damage at forest edges. *For. Ecol. Manag.* 203, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.057>

Réponse du douglas au climat en Wallonie via une approche dendrochronologique

Alexis Van Eecke

L'avenir du douglas est incertain en Wallonie en raison des effets des changements climatiques. Si les peuplements adultes semblent résister, les plantations souffrent des sécheresses et se font attaquer par différents ravageurs. Plus globalement, en Europe, sa capacité à avoir une bonne résistance aux sécheresses est remise en question depuis quelques années. Jusqu'à aujourd'hui, aucune recherche ne s'est penchée uniquement sur le douglas en Wallonie alors qu'il s'agit de la deuxième essence résineuse la plus représentée dans cette région. L'objectif de cette étude est donc d'étudier la réponse de cette essence au climat afin d'évaluer son potentiel d'avenir en Wallonie. L'impact propre des sécheresses ainsi que l'effet de la densité des peuplements sur cette réponse y sont également abordés. Pour ce faire, une approche dendrochronologique a été utilisée. Celle-ci permet d'étudier l'impact du climat et de l'environnement sur la croissance des arbres via l'analyse des largeurs de cerne.

Les résultats montrent que la croissance du douglas est principalement impactée durant les mois de février et d'octobre, sans doute liée à l'allongement de la saison de végétation dû au réchauffement global. D'un côté, le douglas est favorisé par les hivers doux et humides, ce qui est bon signe avec le contexte actuel. De l'autre, son aoûtement et sa sénescence sont menacés par la hausse des températures maximales automnales. Les aiguilles se retrouvent ainsi vulnérables aux gelées précoces. Toutefois, l'augmentation associée des températures minimales contrebalance ce risque. En outre, en cas de hausse des températures, la respiration est favorisée au détriment de la productivité primaire nette. Concernant les sécheresses, le douglas est plus résistant aux déficits hydriques que d'autres résineux grâce à sa régulation stomatique qui lui permet de garder ses stomates ouverts plus longtemps. Il faut vraiment une sécheresse extrême pour que sa croissance soit réduite. Quant à la densité des peuplements, les différences étant trop minimes ou inexistantes, son effet sur la croissance n'a pas été clairement démontré.

Le douglas a donc encore sa place en Wallonie en raison de ses nombreux avantages et de sa faible sensibilité climatique. L'abandonner est risqué car les candidats indigènes à sa succession sont peu nombreux, voire inexistantes. Deux solutions sont par conséquent possibles : continuer de planter du douglas mais le faire correctement (adéquation stationnelle, microclimat local compatible, pas d'obstacle au développement racinaire) pour augmenter ses chances de survie ou importer des essences exotiques mais sans certitude de leur acclimatation.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro