
Une évaluation dendroécologique du bouleau verruqueux (*Betula pendula* Roth.) en Région Wallonne, étude de son adaptabilité face au changement climatique

Auteur : Merckx, Céleste

Promoteur(s) : De Mil, Tom; Claessens, Hugues

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/19432>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



**UNE ÉVALUATION
DENDROÉCOLOGIQUE DU BOULEAU
VERRUQUEUX (*BETULA PENDULA*
ROTH.) EN RÉGION WALLONNE, ÉTUDE
DE SON ADAPTABILITÉ FACE AU
CHANGEMENT CLIMATIQUE.**

MERCKX CELESTE

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES
NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024

(CO)-PROMOTEUR(S): DE MIL TOM & CLAESSENS HUGUES

© « Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.
Le présent document n'engage que son auteur. »

**UNE ÉVALUATION
DENDROÉCOLOGIQUE DU BOULEAU
VERRUQUEUX (*BETULA PENDULA*
ROTH.) EN RÉGION WALLONNE, ÉTUDE
DE SON ADAPTABILITÉ FACE AU
CHANGEMENT CLIMATIQUE.**

MERCKX CELESTE

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES
NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024

(CO)-PROMOTEUR(S): DE MIL TOM & CLAESSENS HUGUES

Remerciements

J'ai pris l'habitude de toujours lire les remerciements à la fin d'un roman. J'ai donc développé, au fil du temps, l'envie de moi-même en écrire un jour. Cette occasion est la première. Et force est de constater que malgré mes innombrables répétitions insomniaques, planifiant tout ce que je pourrai y inscrire le jour venu, je ne sais pas quoi dire. En vérité, il y a tellement de moments, de souvenirs, d'amour et de mains tendues que, même moi, j'ai du mal à y croire. Je vais donc aller à l'essentiel.

Je souhaite remercier l'équipe du service de Biologie du bois au Musée royal de l'Afrique centrale pour son accueil et plus particulièrement Hans Beeckman et Kévin Lievens. Kévin, merci pour ta transmission et ta patience.

Mr. De Mil, merci de m'avoir fait confiance pour ce sujet d'étude. J'ai grâce à vous découvert la dendrochronologie et ses multiples applications. J'ai maintenant une solide base pour me plonger plus en avant vers cette branche qui, je dois bien l'avouer, m'attire de plus en plus. Merci également pour votre dévouement, que ce soit envers vos étudiants ou envers la recherche. Vos multiples casquettes, qui vous font osciller entre volonté de travail et père de famille, m'impressionnent. J'espère moi-même avoir réussi à montrer ne fut-ce qu'un quart de votre détermination.

Mr. Claessens, vous êtes le professeur qui avez le plus impacté mes choix d'étude. Je ne me destinais pas à la sylviculture, je ne me destinais pas à grand-chose à vrai dire... Le monde est trop vaste pour se focaliser sur un seul choix, c'est ce que je pensais. Et puis, avec vous, j'ai découvert l'immensité de la forêt, elle qui a aujourd'hui une grande place dans ma vie. Votre disponibilité et votre écoute pour quiconque viendrait à en avoir besoin. Votre gentillesse et votre franche bonhomie. Vos conseils avisés et vos savoirs passionnés. Je ne pense pas me tromper en disant que vous êtes l'archétype du professeur que tout le monde souhaiterait connaître.

Lorna, merci de ton accompagnement et de ta personnalité aussi directe que généreuse. Tu me parlais, au tout début, de ton envie de partager. Je crois bien que le mot « partage » est ce qui nous réunit le plus, et ce n'est pas quelque chose de si commun. Qu'il s'agisse de ton temps, de tes encouragements ou de ton soutien, je n'aurai pu être mieux secondée que par toi. Je te souhaite de tout cœur une bonne poursuite dans tes recherches, il ne fait aucun doute qu'elles seront minutieuses et de qualité.

♪ *Iris – The Goo Goo dolls*

Mazarine, Marine et Camille, merci d'exister. Merci d'avoir supporté mes vocaux interminables, merci de votre foi en moi, merci d'être toujours présentes quand cela compte vraiment. Vous êtes légendaires, merci de faire de moi votre Trylle préférée. Rares sont les gens qui nous acceptent tels que nous sommes, qui nous comprennent si bien.

♪ *Where you lead I will follow – Carole King*

À ma famille, qui est d'un soutien infailible. Loin des yeux mais pas loin du cœur n'a jamais été aussi vrai. Pour mon père, qui sait aussi bien manier les mots que la maryse. Merci de m'avoir transmis ta créativité, ta générosité et de continuer de me suivre dans mes folles aventures. Pour ma mère, savant mélange de détermination et de sensibilité. Merci de m'avoir

portée vers le haut, vers la connaissance et le vaste monde. Pour mes grands-mères, incarnation de la ténacité et du féminisme. Merci pour vos mots doux et votre amour. Enfin, pour la seule et l'unique, ma sœur de cœur. Stacey, merci d'avoir été là, depuis toujours. Notre lien en étonnera toujours plus d'un. Merci d'avoir résolu mes plublèmes, merci de tes relectures de travaux pendant toutes ces années, merci pour nos fous rires, pour nos voyages et pour partager ma moitié de cerveau.

♪ *Dirty paws – Of monsters and men*

À mon fidèle compagnon à quatre pattes. Même s'il ne lira pas ses lignes, il mérite d'y figurer. On ne peut espérer meilleure boule de poil en soutien émotionnel. Merci de me suivre de bureau en fauteuil, sur les genoux ou sur mon clavier, je n'ai qu'à tourner la tête pour te voir à mes côtés. Que ta vie soit longue, j'espère bien vivre encore pleins d'aventures avec toi.

♪ *Woodland – The Paper Kites*

Enfin, à toi qui aimes terminer ton assiette par le meilleur, tu figures donc en dernier. On se sait, tout ce que je pourrais écrire ici sera en dessous de la réalité. Ces neuf années avec toi, c'est une chance que je mesure chaque jour. Merci d'avoir été mon refuge, ma maison, l'élément de stabilité qu'il manquait à ma vie. Merci d'avoir toujours cru en moi, de manière inconditionnelle. La vie et les aventures sont douces à tes côtés.

RÉSUMÉ

Avec à court terme un réchauffement planétaire prévu à 1,5°C¹, le changement climatique et ses conséquences obligent à une réévaluation des modes de gestion sylvicole et des essences composant nos forêts. Les maladies émergentes et les dépérissements observés dans l'essentiel de nos essences de production posent question. Espèce très répandue et considérée comme essence à haut potentiel pour l'avenir de nos forêts, le bouleau verruqueux (*Betula pendula* Roth.) fait encore assez peu l'objet d'études dendrochronologiques en Europe de l'Ouest. Des études réalisées dans le nord de l'Europe² et en Europe de l'Est³ démontrent toutefois qu'il y a un intérêt certain à étudier la relation entre la croissance radiale du bouleau et le climat. Une recherche menée par Dubois⁴ a permis de souligner l'importance d'une gestion adaptée en vue d'une meilleure valorisation. Ce travail vise deux objectifs : la détermination des facteurs climatiques affectant sa croissance radiale et l'évaluation de sa résilience face à des perturbations climatiques extrêmes telles que des sécheresses. Les réponses en croissance de *B. pendula* face aux conditions météorologiques ont été étudiées pour huit peuplements situés en Région Wallonne selon des méthodes classiques de dendrochronologie. Les résultats montrent une influence majeure des précipitations estivales / automnales survenues au cours de l'année précédant la formation du cerne. L'élévation des températures accentue la tendance des sécheresses et impacte la croissance. L'étude de la résilience montre une capacité de tolérance certaine, bien qu'elle ne puisse être garantie sur le long terme.

Mots-clés : Dendrochronologie, Dendroécologie, Largeurs de cernes, Analyse de la résilience, Changement climatique, Bouleau verruqueux, *Betula pendula*

ABSTRACT

With global warming predicted to reach 1.5°C in short term¹ climate change and its consequences are forcing us to reassess our silvicultural management methods and the species that make up our forests. Emerging diseases and decline observed in most of our production species are raising questions. Silver birch (*Betula pendula* Roth.), a widespread species considered to have high potential for the future of our forests, is still relatively little under-researched in terms of dendrochronology in Western Europe. However, studies carried out in northern Europe² and eastern Europe³ show that there is a definite interest in studying the relationship between the radial growth of birch and climate. Research carried out by Dubois⁴ has highlighted the importance of appropriate management to improving production. This work has two objectives: to determine the climatic factors affecting radial growth and to assess resilience in the face of extreme climatic disturbances such as drought. The growth responses of *B. pendula* to meteorological conditions were studied for eight stands located in the Walloon Region using conventional dendrochronology methods. The results show a major influence of summer and autumn rainfall in the year preceding the formation of the ring. Rising temperatures are accentuating the trend towards drought and impacting on growth. The study of resilience shows a certain capacity for tolerance, although this cannot be guaranteed in the long term.

Keywords: Dendrochronology, Dendroecology, Tree rings width, Resilience analysis, Climate change, Silver birch, *Betula pendula*

TABLE DES MATIÈRES

1. ÉTAT DE L'ART	1
1.1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	1
1.1.1. EN BELGIQUE	1
1.1.2. IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUES POUR LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS	2
1.1.3. QUELLES SOLUTIONS ?	3
1.2. LA FORÊT BELGE AUJOURD'HUI.....	5
1.3. LE BOULEAU, UNE ESSENCE D'AVENIR ?	6
1.3.1. DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE ^{42 43}	7
1.3.2. DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE ET DONNÉES AUTÉCOLOGIQUES EN FORÊT WALLONNE	8
1.3.3. PRODUCTION, PROPRIÉTÉS ET VALORISATION	9
1.4. LA DENDROÉCOLOGIE COMME OUTIL D'ÉVALUATION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE .	11
2. OBJECTIF DE L'ÉTUDE	12
3. MATÉRIEL ET MÉTHODES	12
3.1. ZONE D'ÉTUDE	12
3.2. DONNÉES CLIMATIQUES	14
3.3. COLLECTE DES ÉCHANTILLONS	15
3.3.1. IDENTIFICATION DES ARBRES ET RELEVÉ D'INFORMATIONS	16
3.3.2. PRÉLÈVEMENT DES CAROTTES.....	18
3.4. TRAITEMENT DES ÉCHANTILLONS ET COLLECTE DES DONNÉES	18
3.4.1. PRÉPARATION DES SECTIONS MINCES	18
3.4.2. SCAN DES SECTIONS MINCES.....	20
3.4.3. TRAITEMENT DES IMAGES	20
3.4.4. DÉLIMITATION DES LARGEURS DE CERNE	21
3.1.1. STANDARDISATION DES SÉRIES DE CERNES BRUTES.....	23
3.1.2. CONSTRUCTION DES DIFFÉRENTES CHRONOLOGIES PAR PEUPEMENT	24
3.1.3. STATISTIQUES SUR LES CHRONOLOGIES	24
3.1.4. ANALYSE DU LIEN CROISSANCE-CLIMAT.....	27
3.2. ANNÉES CARACTÉRISTIQUES.....	28
3.2.1. DÉTECTION DES ANNÉES CARACTÉRISTIQUES	28
3.2.2. ÉVALUATION DE LA RÉSILIENCE.....	28
4. RÉSULTATS.....	30
4.1. ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES CHRONOLOGIES.....	30
4.2. ANALYSE DES ANNÉES CARACTÉRISTIQUES ET DE LA RÉSILIENCE DES PEUPEMENTS	32
4.3. ÉTUDE DU LIEN CROISSANCE-CLIMAT	36
5. DISCUSSION	42

5.1.	LES FACTEURS CLIMATIQUES INFLUENÇANT LA CROISSANCE RADIALE	43
5.2.	<i>B. PENDULA</i> , UNE ESSENCE RÉSILIENTE.....	45
6.	<u>CONCLUSION</u>	<u>46</u>
7.	<u>RÉFÉRENCES</u>	<u>48</u>
8.	<u>ANNEXES.....</u>	<u>57</u>

1. État de l'art

1.1. Le changement climatique

Depuis des années, les forêts sont l'objet d'un dérèglement qui trouve sa source à plus grande échelle, le changement climatique. Composant 30% des terres émergées du globe, leurs enjeux sont importants et requièrent une attention toute particulière sur les moyens à disposition pour innover et pallier la perte de ressources qui en découlera⁵. Les différents impacts du changement climatique sur les forêts sont le résultat d'un changement d'intensité et de fréquence de paramètres biotiques et abiotiques tels que la température, la concentration en gaz à effet de serre, la sécheresse, les événements venteux, les précipitations, les feux de forêts et les pathogènes⁶. Par ailleurs, l'interaction entre ces facteurs peut engendrer des effets plus importants, qu'ils soient négatifs ou positifs, par exemple le seuil de température d'essaimage du scolyte pouvant arriver plus tôt dans l'année du fait de l'augmentation des températures globale⁷. Bien que les altérations du climat ne soient pas nouvelles, ces changements s'opèrent de manière bien plus rapide et leurs effets sont visibles en à peine quelques décennies¹.

1.1.1. En Belgique

Le dernier rapport climatique fourni par l'IRM⁷, indique depuis 1981 un réchauffement saisonnier significatif par décennie de $+0,45^{\circ}\text{C}$, $+0,39^{\circ}\text{C}$, $+0,40^{\circ}\text{C}$ et $+0,31^{\circ}\text{C}$, correspondant respectivement à l'hiver, au printemps, à l'été et l'automne. Montrant ainsi une nette augmentation des températures printanières et estivales, soit, pendant les saisons de végétation.

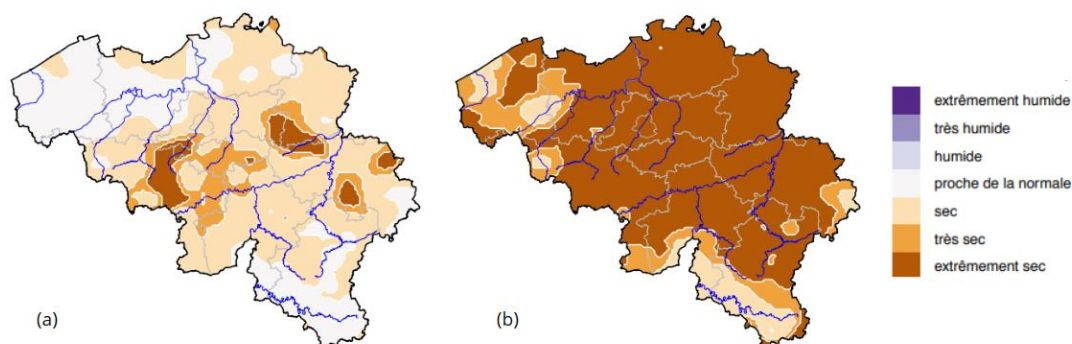


Figure 1. Situation au 31 Mai 2020 pour des observations du 01/03/2020 au 31/05/2020. Indice de sécheresse calculé sur les 3 mois printaniers : (a) uniquement sur base des précipitations (SPI-3) et (b) avec prise en compte de l'évaporation⁷.

Pour la Belgique, la comparaison entre la moyenne des températures pour la période 1833-1863 et la période 1989-2019 montre une augmentation de $2,1^{\circ}\text{C}$. Les 22 années les plus chaudes se concentrent sur les 31 dernières années et le top 6 se situe après 2005. Qui plus est, ce rapport fait le constat d'une augmentation de la fréquence, de l'intensité ainsi que de la durée des sécheresses, plus particulièrement en période de végétation (Figure 1). Le rapport de synthèse

du GIEC¹ est tout aussi alarmant, annonçant un réchauffement planétaire de 1,5°C à court terme.

Des études centrées sur l'établissement de scénarios futurs en Europe centrale, attestent d'une augmentation des sécheresses et de leur gravité ainsi que leur présence plus importante durant les saisons de croissance et ce, que nos émissions soient modérées ou extrêmes⁸.

1.1.2. Impacts du changement climatiques pour les écosystèmes forestiers

Au premier abord, une légère augmentation de température en saison de végétation pourrait ne pas susciter d'inquiétude. Elles occasionnent en effet de meilleures conditions de croissance et une plus grande absorption du carbone en allongeant la période qui débute plus tôt et se termine plus tard⁹. Toutefois, ceci n'est plus vrai quand il s'agit de températures plus élevées et d'autant moins quand les événements extrêmes tels que les sécheresses ou les températures caniculaires sont pris en considération. À cela faut-il encore ajouter d'autres facteurs émergeant de sources variées. La spirale du déclin de Manion (Figure 2a) décrit trois catégories de facteurs qui, associés ou non, peuvent mener à la mort de l'arbre : prédisposants, déclenchants et aggravants. Manion¹⁰ proposait ainsi l'hypothèse selon laquelle le déclin de l'individu se fait en trois étapes et selon ces différents facteurs. Par la suite, Bossel¹¹ et Mueller-Dumbois¹² ont décrit la possibilité d'une mortalité par le biais d'un unique stress, si ce dernier est subit sur le long terme. Selon McDowell¹³, l'hypothèse émise est que la manière dont les différents mécanismes (biotiques et abiotiques) peuvent impacter l'arbre, dépendent de l'intensité et de la durée du stress hydrique. Enfin, Allen et al.¹⁴ offrent une vue d'ensemble plus complexe des relations physiologie/climat (Figure 2b). Il n'y a qu'une petite partie du climat actuel qui dépasse le seuil de mortalité, contrairement à une plus grande partie pour le climat futur, ce qui indique un risque plus élevé de mortalité pour les populations actuelles. Le résultat des effets du changement climatique sur les écosystèmes forestiers apparaît donc bien souvent sous la forme d'un dépérissement, qu'il soit localisé sur une petite superficie ou généralisé sur une plus grande étendue. Par ce biais, la perturbation climatique induit indirectement des effets dévastateurs sur le cycle du carbone par libération de ce dernier, auparavant stocké dans l'écosystème forestier et par la diminution du potentiel des forêts en tant que puits de carbone¹⁵. Selon une étude menée par van der Woude et al.¹⁶, l'année 2022 bat tous les records de températures en Europe avec 30% du continent en sécheresse estivale critique, présentant une réduction nette de l'échange en carbone écosystémique de 57-62 TgC avec facteurs aggravants comme : des incendies, des conditions printanières peu favorables, une chaleur atmosphérique excessive et un manque d'humidité durant l'été.

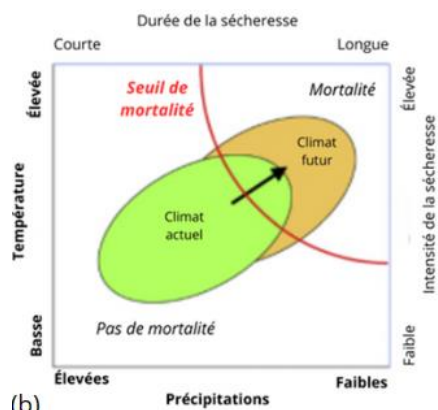
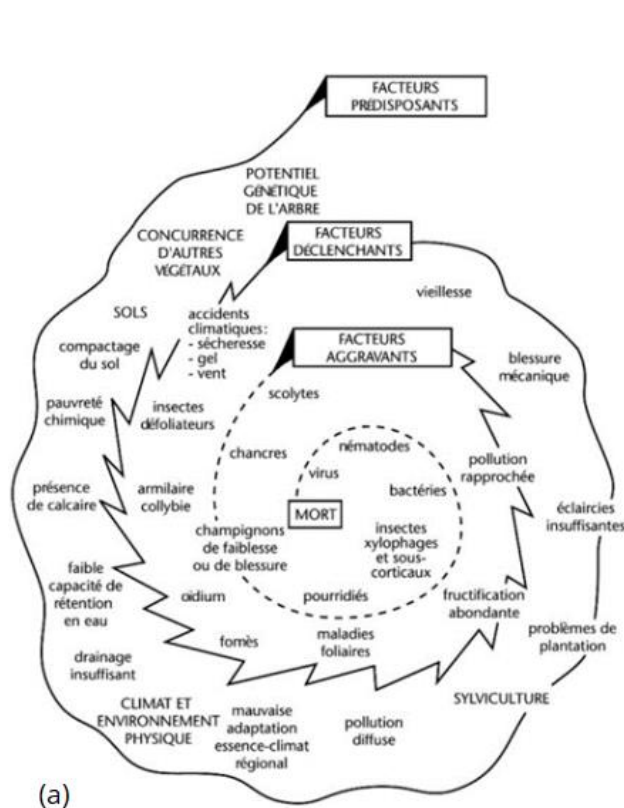


Figure 2. (a) Spirale du déclin de Manion décrivant les facteurs biotiques et abiotiques pouvant mener à la mort de l'arbre¹⁰ – Figure traduite et adaptée par Landmann¹⁷. (b) Diagramme montrant la variabilité entre le climat actuel et les projections futures – Figure adaptée de Allen et al.¹⁴.

1.1.3. Quelles solutions ?

Il existe plusieurs stratégies d'adaptation face au changement climatique pouvant être employées par les peuplements forestiers :

- **La plasticité phénotypique** : les plantes possèdent un éventail de traits fonctionnels leur permettant de faire face à des contraintes environnementales et climatiques¹⁸. Plus ces traits seront variés au sein d'un peuplement, plus la richesse génétique de ce dernier sera élevée et plus il sera en capacité de s'acclimater¹⁹. La plasticité phénotypique correspond à l'expression de différents phénotypes au départ d'un même génotype dans un environnement donné²⁰, une stratégie très utile au vu des fluctuations climatiques actuelles. Ce sont les facteurs épigénétiques qui conduisent à des changements d'expression dans les gènes et donc dans le phénotype²¹.
- **Les adaptations locales** : il s'agit d'un processus de sélection naturelle, lorsqu'une espèce présente une meilleure adaptation face à un environnement donné, cela mène à la sélection de nouveaux génotypes mieux adaptés à l'échelle locale²². Cette stratégie dépend donc du changement génétique par sélection de la population concernée et est notamment fonction du type de dispersion des graines et du pollen²³. Les espèces à dissémination anémochore ont un fort potentiel d'adaptation locale²², bien qu'il faille

tenir compte que le taux de réussite de formation des graines est lui-même limité par les contraintes climatiques, les populations impactées dépendent alors d'autres populations, contrecarrant le concept d'adaptation « locale »²⁴.

- **La migration** : la capacité de dispersion des graines et du pollen influera directement sur l'évolution naturelle des peuplements. Les espèces à dissémination anémochore peuvent avoir des vitesses de propagation assez élevées que pour suivre le déplacement des zones climatiques²². À l'inverse, les espèces à dissémination barochore peuvent nécessiter un laps de temps considérablement plus long pour accomplir des migrations. Prenons l'exemple de la recolonisation post-glaciaire par le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) en Europe centrale à partir de refuges localisés dans les Alpes du Nord et les Carpates, qui a présenté un taux de migration moyen de 250 à 270 mètres par an, bien en deçà des valeurs de 1000 mètres ou plus par an nécessaires pour suivre les déplacements actuels des zones climatiques²⁴.

Reste également l'intervention de l'homme, par le biais d'une gestion forestière durable et raisonnée. L'application de cette dernière peut cibler différentes étapes de la sylviculture comme présenté à la figure 3²⁵ :

- **Adaptation** : une diversification avec des essences en mélange, mieux adaptées à la station et aux futures conditions climatiques, mettant en valeur des espèces indigènes et protégeant la biodiversité²⁶.
- **Atténuation** : une gestion améliorée de la régénération peut encore améliorer la résilience et même augmenter la valeur du stockage de carbone par augmentation de la densité, des rotations plus courtes ou la mise en valeur d'essences plus productives.
- **Récolte** : rendre celle-ci plus sélective en faisant attention à la protection du sol et du sous-étage tout en encourageant la régénération naturelle, c'est réduire la libération de carbone.
- **Matériaux bois** : privilégier son utilisation, à défauts des alternatives industrielles également plus coûteuses en énergie, permet un stockage de carbone sur le long terme

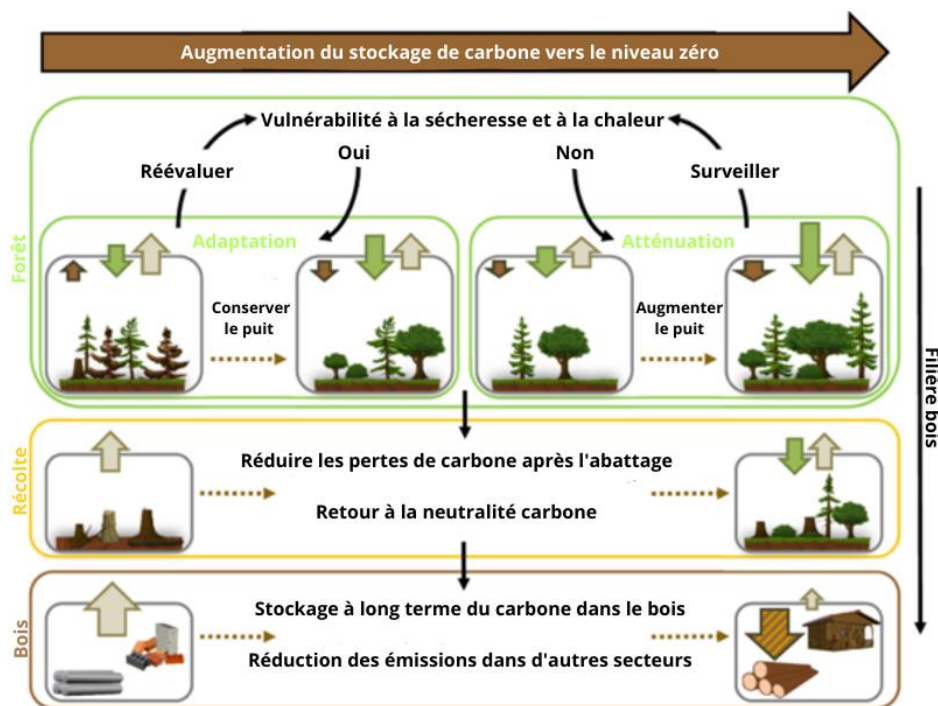


Figure 3. Gestion des forêts en vue d'augmenter le stockage du carbone – Figure adaptée de Wolf & Paul-Limoges²⁵.

1.2. La forêt Belge aujourd'hui

À sa petite échelle, la Belgique n'a pas à envier ses voisins concernant le pourcentage de forêts dont elle est pourvue. Avec un score honorable de 23% pour son taux de boisement à l'échelle nationale, c'est en réalité les forêts wallonnes qui font la part belle dans le secteur forestier en Belgique puisque 33% du territoire wallon est occupé par celles-ci²⁷. Dans les forêts dites « de production » ou « productives », qui correspondent aujourd'hui à 85% de la forêt wallonne et constituent la majorité de notre panel forestier, on retrouve essentiellement cinq essences de production, ci-après par ordre croissant de matériel sur pied (valeurs pour 2015 en millions de m³ sur écorce) : l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) H. Karst) - 49,80 ; le chêne sessile et pédonculé (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) et *Q. robur* L.) – 35,20 ; le hêtre – 23,20 ; le pin sylvestre et le pin noir d'Autriche (*Pinus sylvestris* L. et *Pinus nigra* R. Legay) – 18,4 ; le douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.) – 6,80p²⁷. La production de bois d'œuvre et d'industrie constitue la majorité de la production forestière Belge, comptant ainsi pour près de 80% de la récolte totale²⁷.

Néanmoins, depuis plusieurs décennies déjà les gestionnaires et propriétaires forestiers doivent faire face à des émergences imprévues, directement ou indirectement liées aux changements climatiques. Citons notamment la crise sanitaire du Hêtre²⁸ celle de l'épicéa commun^{29 30}, le dépérissement du chêne³¹, la chalarose du frêne³² ou encore plus récemment, l'observation d'une dégradation de l'état sanitaire des peuplements de douglas^{33 34 35}.

Le lien entre l'augmentation de la variabilité du climat et les bioagresseurs, bien que complexe, peut conduire à ces crises sanitaires. Prenons l'exemple de la crise du scolyte (*Ips typographus* L. et *Pityogenes chalcographus* L.) ayant provoqué d'importantes mortalités dans les peuplements d'épicéa³⁶. C'est le résultat d'une association principalement entre un facteur prédisposant, les sécheresses et les canicules qui vont fragiliser l'arbre, et d'un facteur aggravant, les scolytes qui sont des ravageurs s'attaquant aux arbres affaiblis²⁹. Si à cela s'ajoute la prolongation des périodes à températures favorables et l'augmentation de ces dernières, le cycle de vie des scolytes se voit favorisé, induisant une pullulation telle qu'il y a attaque d'arbres sains³⁶. Un autre exemple serait celui de la chalarose du frêne, une essence très réactive aux variations climatiques, qui, se trouvant déjà affaiblie, a vu sa dégradation accélérée par un champignon (*Hymenoscyphus fraxineus* forme asexuée, *Chalara fraxinea*), responsable de la chalarose du frêne et pour qui le climat actuel est extrêmement profitable³⁷.

Quel est donc l'avenir de nos peuplements de production si les essences principales sont mises à mal ? La diversification, oui, mais quelles essences choisir ?

1.3. Le bouleau, une essence d'avenir ?

Parmi les essences possibles, l'introduction d'espèces exotiques peut être envisagée, à condition que les risques encourus soient établis et étudiés en amont. Une autre option consisterait à favoriser l'utilisation d'essences indigènes, plus à même de s'établir dans nos forêts de manière efficace et harmonieuse. Par ailleurs, le panel d'essences indigènes présente quantité d'espèces jusqu'à présent inconsidérées et dévalorisées dans le secteur de la production du bois, aussi appelées essences « mineures ». On y retrouve notamment le bouleau verruqueux (*Betula pendula* Roth.) et le bouleau pubescent (*Betula pubescens* Ehrh.), des essences pourtant pionnières et présentes en quantité et sur une grande variété de stations. Dans le dernier rapport de la FAO sur l'évaluation des ressources forestières mondiales³⁸, le genre *Betula* sp. fait partie des quatre premières essences que l'on retrouve en Belgique à raison de 6,20 Mm³ sur écorce, soit 17% de la surface forestière productive wallonne³⁹ et 3% (5%) du volume forestier total (feuillus)⁴. Si l'on ajoute à cela sa capacité à croître rapidement au stade juvénile⁴⁰ et sa facilité à s'étendre en peuplements purs ou en mélange sur des milieux perturbés⁴¹ cela en fait a priori une essence de choix pour l'avenir.

Cependant, il reste des inconnues quant à l'adaptabilité du bouleau verruqueux face au changement climatique dans les forêts d'Europe de l'Ouest en comparaison du centre, de l'Est et du nord de l'Europe, où quantité d'études ont déjà été réalisées sur cette espèce considérée comme une essence de production majeure. En effet, près de 90% de la ressource en bouleau est localisée dans le nord de l'Europe et en Russie⁴. Citons notamment les études réalisées par Matisons et al.³ et Levanic t. & Eggertsson² à l'est de la mer Baltique et dans le Nord de

l'Islande, démontrant une adaptabilité certaine du bouleau verruqueux face à des changements modérés en climat local. Les facteurs qui furent relevés dans ces études, selon la région étudiée, et influençant majoritairement la croissance sont la disponibilité en eau pour l'été / le printemps et les températures en été / au printemps.

La recherche menée dans le cadre de ce travail de fin d'études se focalisera uniquement sur le bouleau verruqueux, qui est le plus fréquent dans les forêts wallonnes, du fait de sa plus large amplitude écologique (Figure 6) et possède donc le plus grand potentiel sylvicole.

1.3.1. Description morphologique^{42 43}

B. pendula est un arbre d'une longévité pouvant atteindre une centaine d'année. Généralement de taille moyenne mais pouvant atteindre les 30 m de hauteur, il possède un houppier peu dense avec un port de branches tombantes. Au stade juvénile, l'écorce est brune et deviendra blanche/argentée avec le vieillissement. Celle-ci présente également des lenticelles gris foncé disposées horizontalement pouvant devenir des crevasses importantes (Figure 4c). Ses feuilles alternes triangulaires, de 3 à 7 cm de long, sont irrégulièrement doublement dentées (Figure 4b). Il s'agit d'une espèce monoïque portant des chatons mâles et femelles unisexués à dispersion anémochore. Les chatons mâles peuvent faire jusqu'à 10 cm à maturité (Figure 4e), et se développent en été pour polliniser durant le printemps. Les chatons femelles peuvent faire jusqu'à 3 cm de long. Une fois pollinisés, ils se transforment en cônes pendants (Figure 4d), se désagrégant en petits fruits ailés au mois d'août (Figure 4a)



Figure 4. (a) Graine ailées ; (b) Feuilles irrégulièrement doublement dentées ; (c) Écorce fortement crevassées à maturité ; (d) Cônes ; (e) Chatons mâles. Crédits des images respectivement : ©James Paul ; ©Tracy Houston Durrant ; ©Merckx Céleste ; ©Giovanni Caudullo ; ©Graham Calow.

1.3.2. Distribution géographique et données autécologiques en forêt wallonne

À l'échelle de la région wallonne, le bouleau se retrouve partout (Figure 5). La plus grande surface occupée par ceux-ci est située en Ardennes (59% de la surface) mais tenant compte du taux de boisement, c'est le Condroz qui se distingue avec une richesse en bouleaux de 38% contre 26% dans les Ardennes⁴⁴.

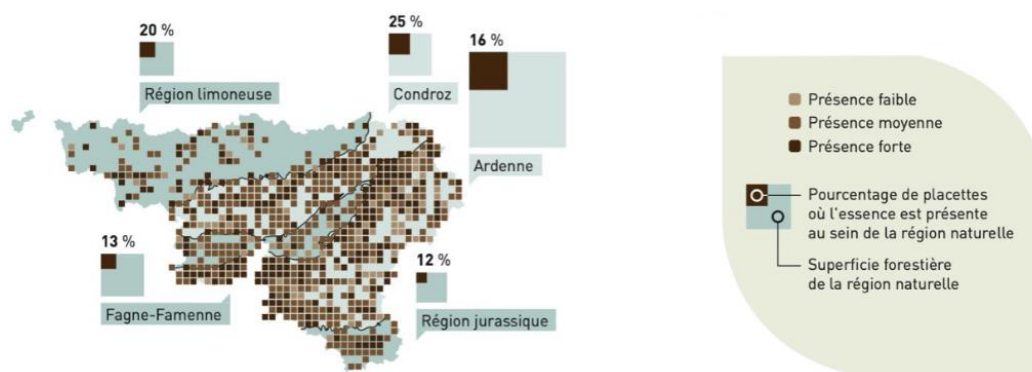


Figure 5. Distribution et ressources en forêt wallonne du bouleau verruqueux et du bouleau pubescent – Figure disponible sur le site du Fichier écologique des essences³⁹. Une représentation de la distribution en bouleau verruqueux uniquement est disponible sur le site de l'atlas de la flore¹. Cependant, lors de l'écriture de ce travail la carte proposée était encore composée de données non-validées, elle n'est donc pas reprise ici.

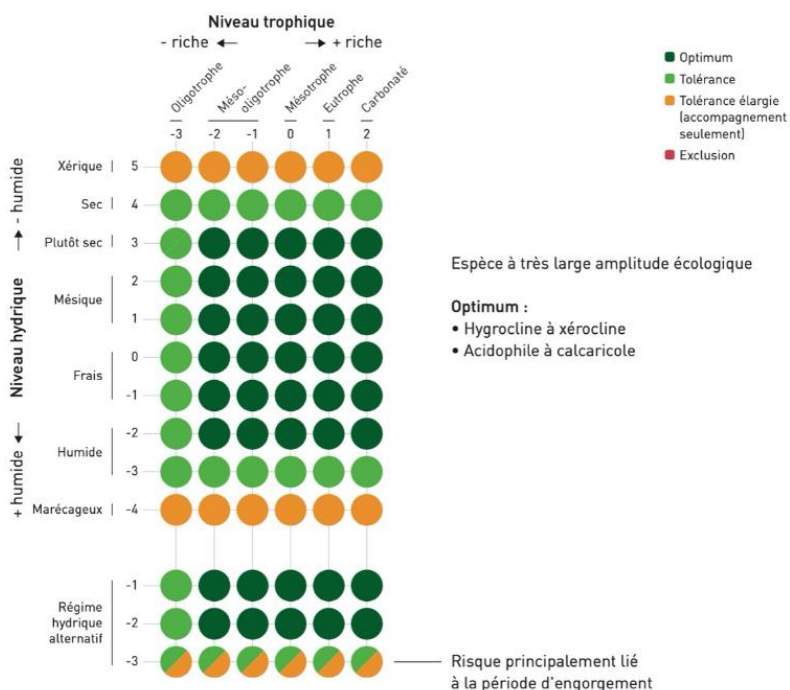


Figure 6. Écogramme d'aptitude du bouleau verruqueux – Figure disponible sur le site du Fichier écologique des essences³⁹.

¹ GT Atlas de la flore de Wallonie – *Betula pendula*
<https://observatoire.biodiversite.wallonie.be/Especies/Flore/atlas/taxon.aspx?name=Betula%20pendula>

L'Écogramme de *B. Pendula* témoigne de sa large amplitude écologique, indiquant une grande tolérance à des niveaux hydriques et trophiques variés (Figure 6). À cela s'ajoute son caractère héliophile et pionnier, qui lui permettent de coloniser efficacement de nombreuses stations. L'espèce, bien que réputée pour sa grande tolérance à la sécheresse^{47 48 49}, est également connue pour avoir une sensibilité climatique accrue au début de la période de végétation, contrastant ainsi ses réponses aux signaux climatiques.

1.3.3. Production, propriétés et valorisation

La figure 7 présente la courbe de croissance de *B. pendula* qui a une croissance très précoce et vigoureuse durant les 20 à 30 premières années avec une période de croissance maximum pendant les 15 premières années, celle-ci étant longue chez *B. pendula* comparé à *B. pubescens*⁴¹. Il peut ainsi atteindre 30 m de hauteur à 50 ans, avec un seuil d'exploitabilité maximum vers 70 ans, après quoi il y a de hauts risques d'apparition de coloration et d'un cœur pourri⁴⁹. De plus, le bouleau est une essence à bois dur et possède une bonne productivité pouvant atteindre un accroissement en volume annuel moyen de 5 à 10 m³/ha/an⁴¹.

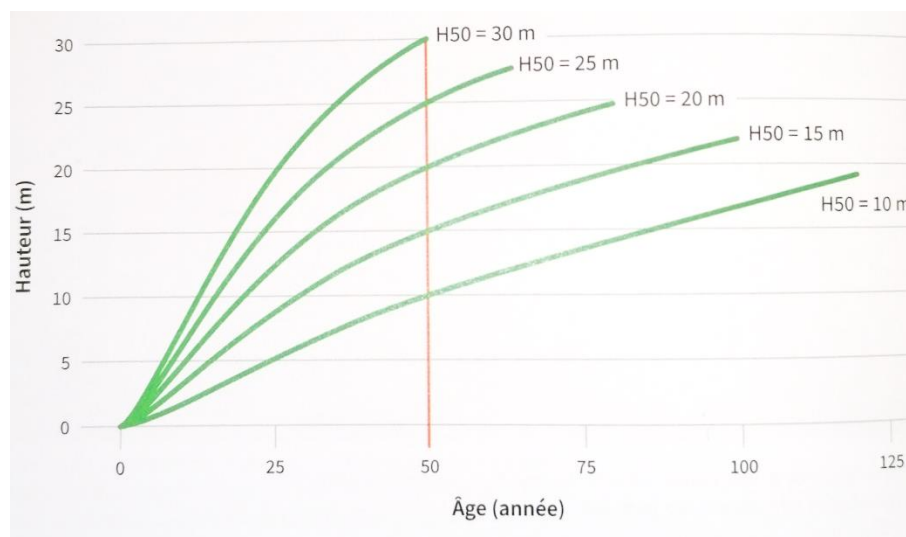


Figure 7. Faisceau de courbes de croissance en hauteur du bouleau en fonction de l'âge et selon diverses classes de productivité¹⁴².

Des recherches récentes menées par Héloïse Dubois⁴ explorent les différents scénarios sylvicoles possibles afin de mettre en place une gestion adaptée du bouleau en Wallonie, que ce soit en peuplement pur ou en mélange. Puisque le bouleau ne fait encore que trop rarement partie intégrante de la sylviculture en Belgique, ces recherches innovantes montrent des clés d'exploitation qui permettront d'augmenter la qualité de productivité du bouleau en forêt wallonne.

Concernant les propriétés anatomiques, chimiques, physiques et mécaniques du bois de bouleau, elles sont équivalentes qu'il s'agisse du verruqueux ou du pubescent. Une distinction

toutefois se fait au niveau de la densité plus élevée chez *B. pendula* lui conférant des capacités légèrement meilleures^{48 49 50}. Il est également à noter que la largeur de cernes n'influe pas sur ses propriétés⁵¹.

Par rapport à d'autres essences de production il s'agit d'un solide concurrent (Tableau 1). Effectivement, ses propriétés sont assez comparables à celles du hêtre⁵², faisant de lui une essence propice à l'utilisation en bois de structure et d'industries. Si le bouleau verruqueux investit beaucoup de son énergie dans sa croissance, cela se fait toutefois au détriment de sa tolérance au stress⁵³.

Les potentialités de valorisation du bois de bouleau sont nombreuses. Du fait des tendances actuelles en aménagements intérieurs, il est fortement demandé pour ses qualités esthétiques ayant un bois clair ainsi qu'un grain fin et régulier⁴. On le retrouve donc en usinage notamment pour du sciage et du déroulage en vue de produire divers produits d'ameublements. Enfin, il est également très commun de le retrouver dans la production de pâte à papier³⁹, du fait de ses caractéristiques très propice à ce secteur, à savoir : sa couleur claire, une grume aisément écorçable ainsi que des fibres nombreuses, courtes et rigides⁴.

Tableau 1. Propriétés physiques et mécaniques du bois de hêtre, de chêne, de bouleau et d'épicéa, déterminées sur des éprouvettes normalisées, selon Wagenführ et Scheiber⁵⁴, Heräjärvi⁴⁹ (en Finlande), Boedts⁵⁵ (en Belgique) – Tableau par Dubois¹⁴².

	Bouleau	Hêtre	Chêne indigène	Épicéa
Densité à 12-15 % d'humidité (kg/m ³)	650 (510-830) **654 (± 40)	720 (540-910)	690 (430-960)	470 (330-680)
Porosité (%)	59	55	57	71
Retrait volumétrique (%)	13,7-14,2 (*18,0)	17,9 (14,0-21,0)	12,2-15,0	11,6-12,0
Retrait volumétrique par 1 % d'humidité (%/%)	0,23	0,46-0,60	0,45	0,39-0,40
Contrainte de rupture en flexion statique (Mpa)	147 (76-155) *114 **100 (± 13)	123 (74-210)	Pédonculé : 88 (74-105) Sessile : 110 (78-117)	78 (49-136)
Dureté (J/cm ²)	10,0 (4,5-13,0)	10,0 (3,0-19,0)	6,0 (1,0-16,0)	4,6 (1,0-11,0)
Module d'élasticité (GPa)	14,5-16,5 *14,5 **15,0 (± 2,2)	16,0 (10,0-18,0)	Pédonculé : 11,7 (10,0-13,2) Sessile : 13,0 (9,2-13,5)	11,0 (7,3-21,4)

1.4. La dendroécologie comme outil d'évaluation des impacts du changement climatique

La réponse d'un arbre face au changement climatique est dépendante de sa plasticité structurelle et fonctionnelle⁵⁶ et par conséquent, de son patrimoine génotypique⁵⁷. Effectivement, plus une population possède de génotypes et donc de variabilité génétique, plus grande sera sa plasticité phénotypique et plus elle aura de chance de s'adapter aux perturbations environnementales⁵⁸.

Les populations de bouleau possèdent une grande variabilité génétique du fait de la dispersion anémochore hautement efficace du pollen produit qui s'effectue sur de très grandes distances⁵⁹. Les taux moyens journaliers de production de pollen vont de 1000 à 10.000 grains par m³ d'air⁶⁰ et sa vitesse est d'environ 1 cm s⁻¹⁶¹ ce qui lui permet d'atteindre jusqu'à 2000 km depuis sa zone d'émission⁶². Sa présence à grande échelle favorise donc les échanges de gènes, augmentant davantage la variation génétique des peuplements⁵⁷.

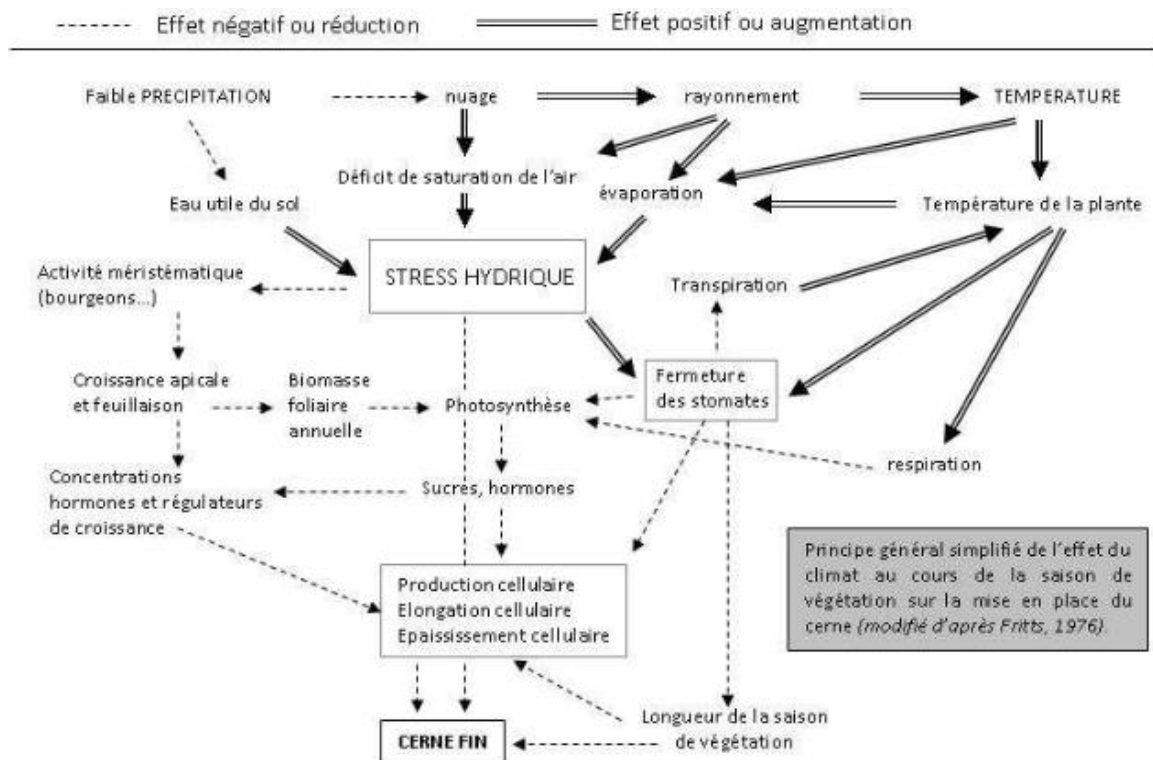


Figure 8. Schéma simplifié illustrant l'influence du climat sur la formation du cerne annuel⁶³ – modifié d'après Fritts⁶⁴.

Pour étudier la réponse des arbres aux facteurs climatiques à l'échelle interannuelle, l'utilisation de la dendrochronologie, soit l'étude de l'évolution temporelle de la croissance secondaire annuelle en lien avec le climat, est déjà fortement utilisée au sein de la communauté scientifique⁶⁵. Plus spécifiquement, le terme "dendroécologie" est employé lorsque la largeur des cernes est utilisée pour examiner l'impact de l'environnement sur la croissance et la dynamique des forêts⁶³. L'utilisation des largeurs de cernes comme proxy permet d'englober

entre autres les diverses influences exercées par les facteurs environnementaux, l'effet « âge cambial », les processus physiologiques de l'espèce, les conditions propres à la station et diverses perturbations internes (e.g., densité, compétition, sénescence, sylviculture) et externes (e.g., feu, tempêtes, pathogènes)^{66 67 63}. L'influence du climat sur l'élaboration du cerne annuel est illustrée sur la figure 8⁶³.

2. Objectif de l'étude

L'objectif global de cette étude consiste à évaluer la réponse en croissance radiale de *B. pendula* face au changement climatique par une étude dendrochronologique à l'échelle de la région Wallonne. Avec une attention particulière concernant les événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses. Cette réponse sera évaluée sur base de l'évolution interannuelle de la largeur de cerne. Les questions de recherche suivante ont été formulées :

1. Quels sont les facteurs climatiques qui influencent la croissance radiale du bouleau verruqueux en Wallonie ?
2. Le bouleau verruqueux présente-t-il un comportement résilient face aux événements climatiques extrêmes passés ?

3. Matériel et méthodes

3.1. Zone d'étude

La zone d'étude se situe en Belgique et plus précisément en Wallonie (Figure 9). Les sites de prélèvement (Figure 10) se situent dans divers secteurs de la carte des zones bioclimatiques, à différentes altitudes (Tableau 2) et présentent des caractéristiques stationnelles variées (Tableau 3), accentuant l'hétérogénéité de l'échantillonnage. Le découpage de cette carte est « basé sur des critères climatiques liés au comportement des essences ligneuses »⁶⁸. Dans le cadre de cette étude, les différentes zones bioclimatiques visitées sont les Plaines et Vallées Scaldisiennes, Sambre et Meuse et Condroz, Fagne-Famenne et Calestienne, la basse et moyenne Ardenne et l'Ardenne centro-orientale (Figure 9).

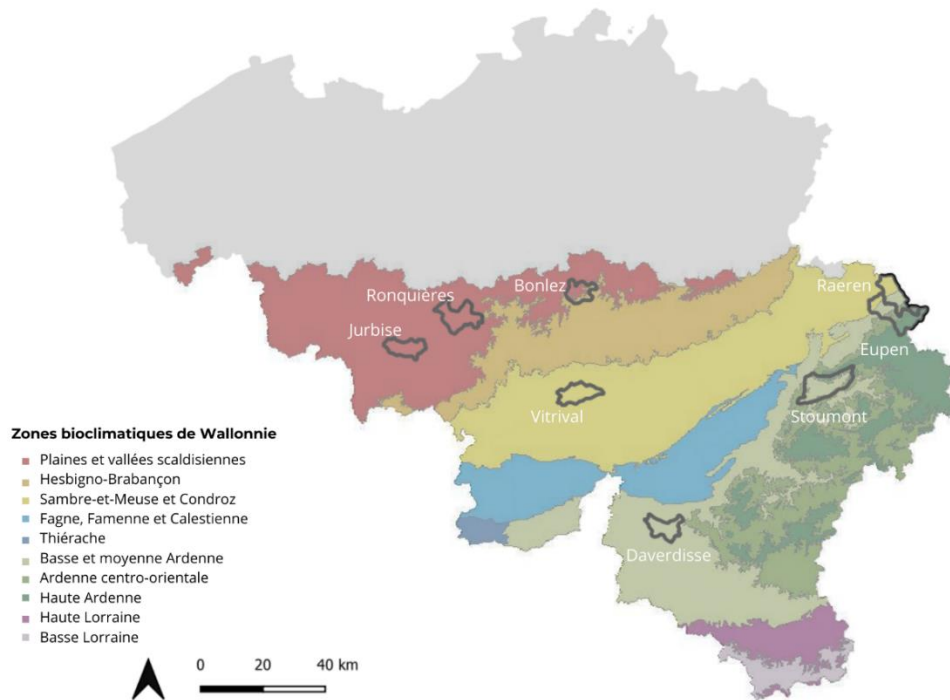


Figure 9. L'étude se réalise à l'échelle de la Région Wallonne. Diverses zones bioclimatiques ont été visitées pour l'échantillonnage, les noms attribués aux peuplements sont indiqués de même que la délimitation des communes concernées – Carte réalisée sur QGIS *A coruña* version 3.10.10. Carte bioclimatique de Wallonie : Géoportail de la Wallonie².

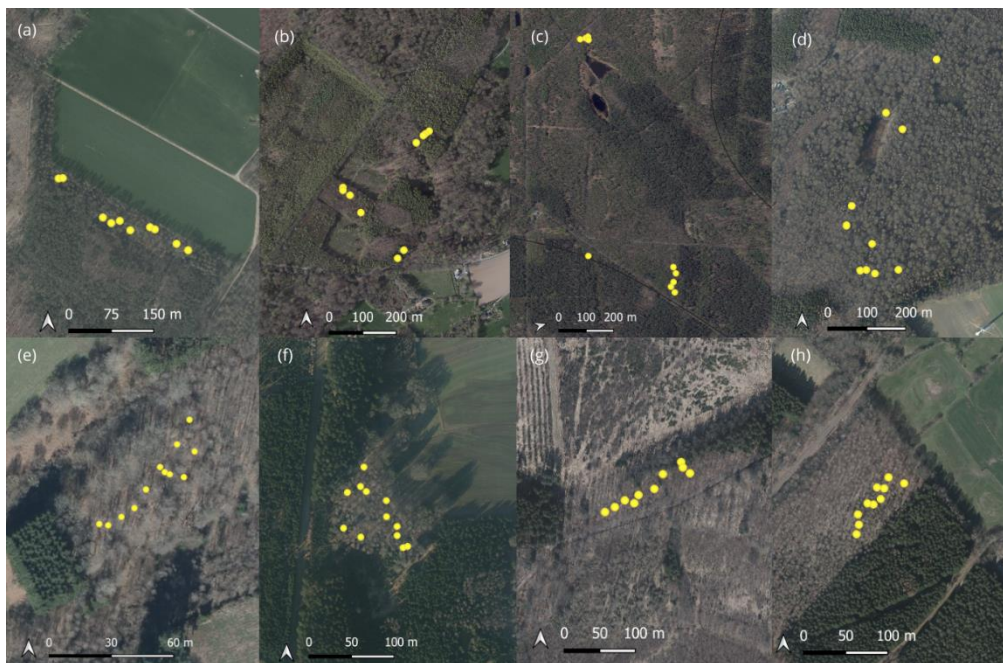


Figure 10. Illustration du positionnement des arbres au GPS RTK dans les sites. (a) Bonlez, (b) Ronquières, (c) Jurbise, (d) Vitrival, (e) Daverdisse, (f) Stoumont, (g) Eupen, (h) Raeren – Carte réalisée sur QGIS *A coruña* version 3.10.10. Fond de carte : Orthophotos 2021.

² [Carte bioclimatique de Wallonie \(BIOCLIM\) | Géoportail de la Wallonie](#)

Au vu de la complexité de se voir accorder l'accès et le carottage sur les parcelles, l'échantillonnage n'est ni aléatoire, ni systématique. Cependant, le choix varié des peuplements tente de prendre en compte une plus large amplitude environnementale et climatique. Les accès aux sites ont été permis soit par le DNF et le cantonnement ciblé, soit par les propriétaires privés.

Tableau 2. Caractéristiques des sites et des bouleaux sélectionnés. N : Nombre d'arbres échantillonnés effectivement utilisés, n : Nombre de carottes prélevées effectivement utilisées, Âge : moyenne (min-max), DBH₁₅₀ : Diamètre à 150 cm de hauteur moyenne(min-max) pour le site, Htot : hauteur totale mesurée moyenne(min-max) pour le site. Les hauteurs pour le site de Daverdisse n'ayant pu être mesurées suite aux conditions de terrain, Htot présente une valeur NA.

Site	Altitude (m)	Coordonnées	Peuplement	N	n	Âge	DBH ₁₅₀ (cm)	Htot (m)
JURBISE	90	(50.499845, 3.869632)	Boulaie pure	5	5	70(54-89)	34(31-35)	26(23-30)
BONLEZ	120	(50.710169, 4.708262)	Boulaie pure	4	7	58(53-59)	40(35-47)	24(21-29)
RONQUIERES	145	(50.612543, 4.188726)	Mélange	10	16	34(24-46)	33(30-40)	24(22-29)
VITRIVAL	240	(50.378727, 4.647863)	Mélange	5	5	73(62-87)	42(38-44)	26(23-30)
STOUMONT	290	(50.386509, 5.805716)	Boulaie pure	4	4	69(51-76)	36(28-42)	34(24-29)
RAEREN	355	(50.657621, 6.107624)	Boulaie pure	2	3	55(53-56)	32(26-36)	23(21-28)
DAVERDISSE	420	(50.014270, 5.107637)	Mélange	5	7	60(56-63)	41(32-53)	NA
EUPEN	480	(50.616983, 6.170157)	Boulaie pure	5	5	69(53-71)	42(38-43)	23(18-27)

Tableau 3. Caractéristiques stationnelles des sites prélevés. Informations provenant du Fichier écologique des essences (Petit et al., 2017).

Site	Altitude (m)	Type de sol	Drainage naturel	Niveau hydrique	Niveau trophique	Exposition
JURBISE	90	Sablo-limoneux	Excessif / Modéré	2	-3	Neutre
BONLEZ	120	Limoneux	Favorable	1	-1	Neutre
RONQUIERES	145	Limoneux	Favorable	1	-1	Neutre
VITRIVAL	240	Limoneux	Pauvre / Très pauvre	-2 RHA	-1	Neutre
STOUMONT	290	Limoneux à charge schisto-gréseuse	Modéré / Assez pauvre	-1 RHA	-2	Neutre
RAEREN	355	Limoneux à charge schisto-gréseuse	Favorable	2	-2	Neutre
DAVERDISSE	420	Limoneux à charge schisto-phyladeuse	Favorable	3	-2	Chaud
EUPEN	480	Limoneux à charge schisto-gréseuse	Modéré / Pauvre	-3 RHA	-1	Neutre

3.2. Données climatiques

Les températures moyennes mensuelles (en ° C) ainsi que les précipitations totales mensuelles (en mm) de 1970 à 2018 pour la commune de Uccle proviennent de l'IRM. Cet ensemble de données est repris dans le diagramme ombrothermique présenté à la figure 11. Des données climatiques antérieures à 1970 ont été utilisées à l'échelle des peuplements, mais puisque les

chronologies principales sont étudiées de 1970 à 2018, ce sont ces dernières qui sont représentées.

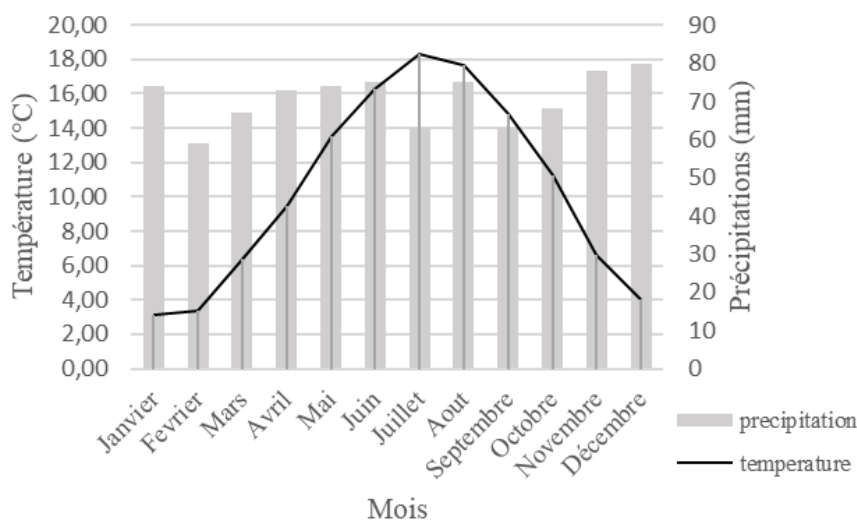


Figure 11. Diagramme ombrothermique reprenant les températures moyennes mensuelles (°C) et les précipitations moyennes mensuelles (mm) pour la commune de Uccle de 1970 à 2018 (Source des données : IRM³).

3.3. Collecte des échantillons

L'échantillonnage global reprend un ensemble de huit peuplements comprenant 65 arbres sélectionnés sur base de différents critères, dont leur âge devant se situer entre 45 et 80 ans et possédant une circonférence moyenne de 115 cm à 1,5 m de hauteur, afin d'assurer la maturité des peuplements en évitant des problèmes liés à la sénescence comme la présence d'un cœur pourri (Tableau 2) et pour obtenir des chronologies assez longues. Cette étude s'est heurtée à une contrainte importante concernant le choix des arbres et des peuplements. En effet, les peuplements comptant la présence de vieux sujets de *B. pendula* en grand nombre sont peu communs. Par ailleurs, des propriétaires ont pu conduire à un choix arbitraire de certains arbres sur leur propriété ne permettant pas l'application d'un relevé dendrochronologique plus qualitatif^{69 70 71}.

Concernant le carottage, le nombre minimum d'arbres à carotter fut fixé à 10, nombre pouvant aller jusqu'à 12. À raison de deux à trois carottes par arbre, un total de 188 carottes ont été récoltées. A noter qu'au vu du temps imparti, il a fallu restreindre le nombre d'échantillons réellement utilisé (Tableau 2). La répétition du nombre d'arbres par station permettra par la suite de faciliter l'étape de datation croisée, visant à attribuer correctement à chaque cerne son année de formation.

³ <https://www.meteo.be/fr/bruxelles>

Sur le terrain et pour des individus plus âgés, il est difficile de faire la distinction entre *B. pendula* et *B. pubescens*, c'est pourquoi l'utilisation d'une méthode chimique établie par Lundgren et al.⁷² est utilisée en cas de doute (Figure 12). Cette méthode consiste à immerger un morceau d'aubier dans une solution de 2,4 dinitrophenylhydrazine (2,4-DNPH), en résultera une solution trouble en présence du bouleau verruqueux tandis qu'elle restera limpide s'il s'agit du bouleau pubescent⁷². Cette réaction s'explique par une plus forte concentration de platyphylloside, un glucoside diarylheptanoïde, chez *B. pendula*, qui réagit avec la solution par formation d'un précipité orange. *B. pendula* possède en effet une concentration supérieure en platyphylloside, à savoir 20 à 60 mg/g d'écorce sèche contre $\leq 0,5$ mg/g d'écorce sèche pour *B. pubescens*⁷². Le platyphylloside contient un groupement carbonyle en fin de chaîne qui réagit la 2,4-DNPH pour former des phénylhydrazones qui vont précipiter⁷³.

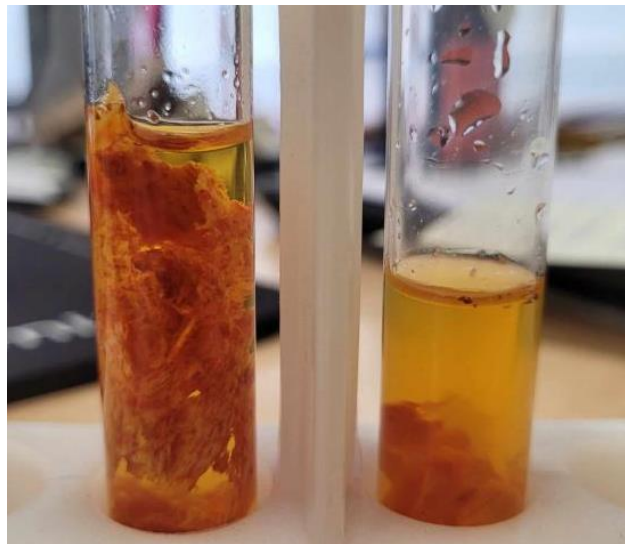


Figure 12. Différenciation du *B. pendula* et de *B. pubescens* à l'aide de la 2,4-DNPH. Présence d'un précipité trouble à droite permettant l'identification du bouleau verruqueux. ©Zeoli Lorna

B. pendula et *B. pubescens* possèdent également un hybride interspécifique qu'il est compliqué d'identifier, bien qu'une méthode utilisant la spectroscopie par réflectance ai permis d'établir que cet hybride était biochimiquement plus proche de *B. pubescens*⁷⁴. Cet hybride reste toutefois assez rare et est généralement stérile, *B. pendula* étant diploïde ($2n = 28$) et *B. pubescens* étant tétraploïde ($2n = 56$)⁷⁵.

3.3.1. Identification des arbres et relevé d'informations

Les arbres désignés ont été identifiés par un numéro au moyen d'un marquage à la bombe sur l'écorce. L'identifiant reprend donc l'espèce, les trois premières lettres de la localité et le numéro de l'arbre. Ainsi, l'arbre BV_DAV_1 est le premier bouleau identifié en provenance de la placette de Daverdisse. L'emplacement exact des arbres a été repris au moyen d'un GPS de

précision RTK (*Real-time kinematic positioning*) (Figure 10). La sélection des arbres fut réalisée sur base de différents critères :

- **Dominance** : les arbres sélectionnés sont dominants ou (co-) dominants. Puisqu'ils sont davantage exposés aux aléas climatiques, cette sélection permet un échantillonnage représentatif de la réponse pour l'ensemble du peuplement⁶³. Par ailleurs, leur croissance est également moins affectée par d'autres variables telles que la compétition ou la gestion sylvicole⁷¹.
- **L'état sanitaire** : les arbres ne doivent présenter aucun signe de maladie quelconque pour ne pas biaiser l'étude. Toutefois, la présence de nécroses sur le tronc de certains individus fut relevée sur le terrain (Figure 13). Selon Mme. Schmitz⁴, chercheuse spécialisée dans les pathogènes forestiers au CRAW, la présence de ces suintements sur le tronc accompagnés de nécroses sous-corticales chez le bouleau se présenterait déjà depuis quelques années mais de manière plus fréquente depuis quelques mois. Les analyses effectuées révèlent que divers champignons sont impliqués. Néanmoins, il s'agit en majorité du genre *Neonectria* sp., connu également pour causer la maladie du Chancre. Cette émergence a également été signalée dans les pays voisins. L'hypothèse est qu'il s'agit d'un pathogène secondaire se développant sur des individus déjà stressés, possiblement dû au changement climatique. Son rôle est toutefois assez mal cerné à l'heure actuelle. Comme la plupart des chancres, *Neonectria* ne dégrade pas le bois mais consomme les sucres présents dans le phloème, affaiblissant l'arbre face aux conditions environnementales et permettant une porte d'entrée à d'autres pathogènes⁷⁶.
- **La rectitude du tronc** : les arbres doivent être le plus droit possible afin d'éviter la présence d'un cœur excentré qui pourrait conduire à des différences marquées au niveau des largeurs de cernes.

D'autres variables ont été reprises, notamment (Tableau 2) :

- **La hauteur totale** ainsi que **la hauteur de la première branche vivante** des arbres sélectionnés. Elles ont été mesurées à l'aide d'un vertex.
- **La circonférence à 1,30 m** (international) et à **1,50 m** (Wallonie) a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban.

⁴ Informations obtenues lors d'un échange de mail



Figure 13. Images prises lors de l'échantillonnage, présence de suintements brunâtres sur le tronc. À gauche, sur le site de Daverdisse. À droite, sur le site de Ronquières.

3.3.2. Prélèvement des carottes

Les carottes ont essentiellement été prélevées à 1,30 m de hauteur au moyen d'une tarière de Pressler d'un diamètre de 5 mm, l'orientation du prélèvement se faisant de manière aléatoire. La carotte prélevée est ensuite stockée dans une paille en papier avec l'identifiant suivant : espèce_localité_num_A/B. Par exemple, la carotte BV_DAV_01_A correspond à la carotte A du bouleau verruqueux n°01 en provenance de Daverdisse. L'ensemble des pailles en papier est ensuite transporté dans un tube de transport pour les protéger.

3.4. Traitement des échantillons et collecte des données

L'étude des largeurs de cernes se réalise sur l'ensemble des sections minces scannées. Au total, 88 sections minces auront été réalisées en laboratoire mais seulement 51 coupes auront été conservées et scannées. Effectivement, les coupes dont la qualité ne permet pas une visualisation idéale des cernes ont été écartées (Annexe 3) puisque l'étape du scan est extrêmement chronophage, le nombre de répliques est donc limité.

3.4.1. Préparation des sections minces

Pour le traitement en laboratoire, les carottes sont coupées à l'aide du microtome à carottes WSL (*Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research*)⁷⁷ en vue d'obtenir des sections minces d'environ 30-45 μm d'épaisseur. La carotte est placée sur l'appareil avec les fibres à la verticale de manière à réaliser la coupe transversalement (Figure 14a). L'échantillon doit être humidifié à l'aide d'un pinceau, ceci afin d'éviter de multiples cassures sur la section. Avant la coupe, un morceau de ruban adhésif est appliqué sur la carotte afin

qu'après passage de la lame, la section mince soit plus facile à manipuler. Une fois la coupe réalisée, le morceau de ruban adhésif contenant la section est disposé sur une lame préalablement humidifiée avec de l'éthanol à 50° de façon à ce que le ruban adhésif puisse se détacher (Figure 14b).

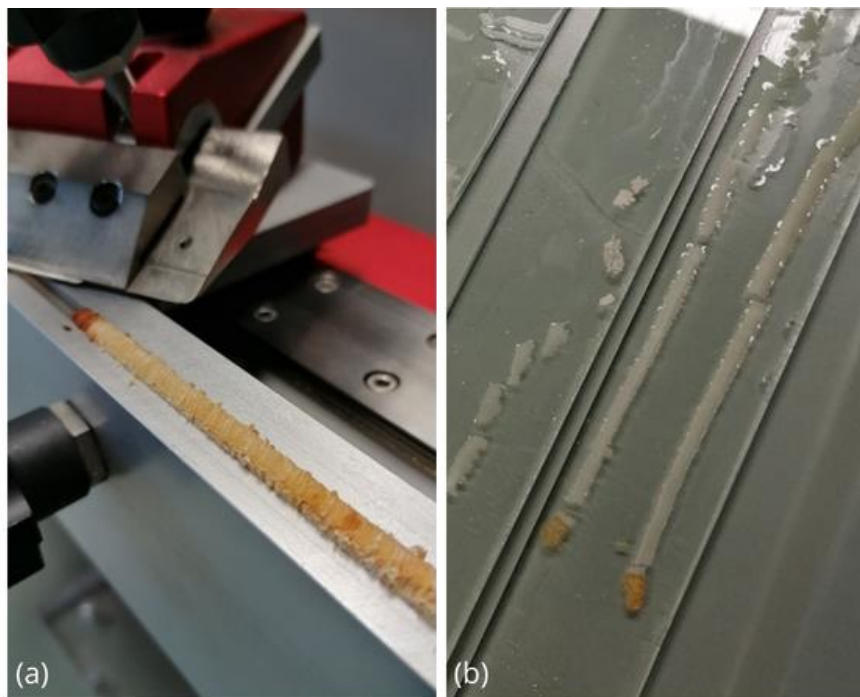


Figure 14. (a) Positionnement de la carotte dans le micro-tome à carottes ; (b) Sections minces fraîchement coupées disposées sur la lame en verre.

Avant toute manipulation de la section sous hotte, une vérification préliminaire de la qualité de la coupe est effectuée au moyen d'un microscope optique CX21FS2 OLYMPUS, de manière à éviter de traiter des coupes qui s'avéreront inutiles par la suite. Les sections minces sont ensuite colorées à l'aide d'un mélange de safranine et de bleu d'alcan, permettant une meilleure visualisation puisque ces colorants fixent respectivement la lignine et la cellulose (Figure 15a). Le temps de repos après application du colorant est de cinq minutes, des chronomètres sont à disposition sur les tables de travail sous hotte. Les sections minces ainsi colorées sont ensuite déshydratées par bains d'éthanol successifs de trois minutes à concentrations croissantes (50°, 75°, 96° et 100°). Les coupes sont alors fixées entre lames et lamelles avec de l'Euparal comme liquide de montage. Finalement, les coupes sont mises à sécher pendant plusieurs jours avec disposition de petits poids sur le dessus et ce, afin d'éviter la formation de bulles d'air durant le séchage (Figure 15b).

Lorsqu'il y a réalisation de plusieurs sections minces pour un même échantillon (prévention en cas de pertes, de casse, de mauvaises surprises lors du scan ...), un « i » est ajouté à la fin du code définit préalablement. Par exemple, l'échantillon *DAV_BV_1_A_ii* est donc la deuxième

section mince réalisée pour la carotte A du bouleau verruqueux n°01 du site de Daverdisse. L'identification des échantillons se réalise au moyen d'un marqueur indélébile directement inscrit sur la lame du côté de l'écorce.

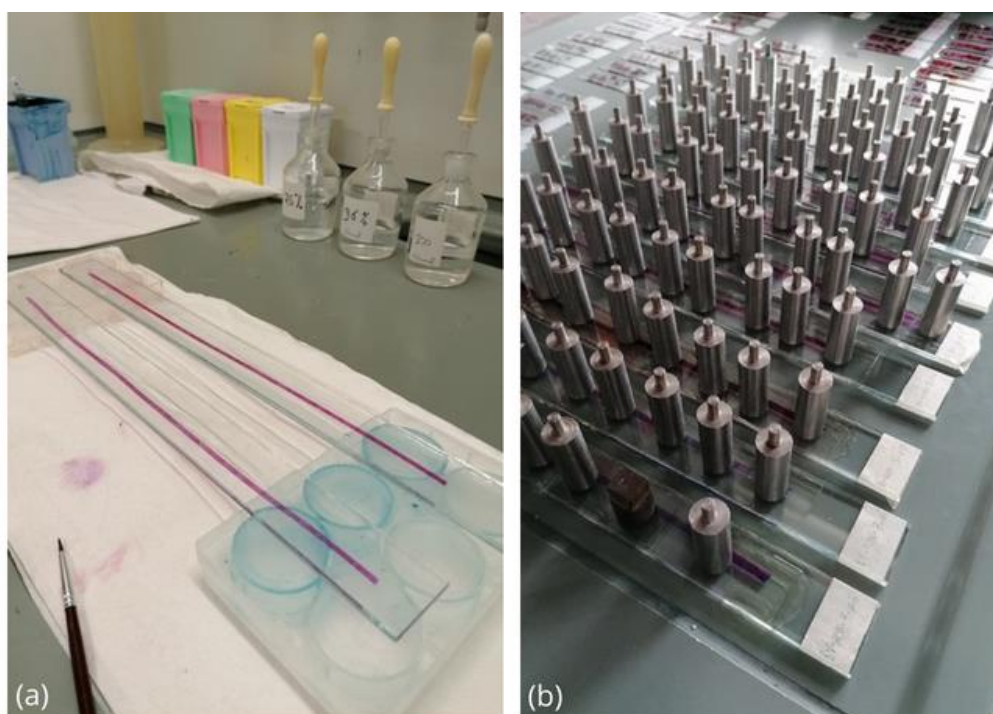


Figure 15. (a) Coloration des sections minces et déshydratation par bains d'éthanol ; (b) Séchage des coupes réalisées avec application de poids.

3.4.2. Scan des sections minces

Par la suite, les échantillons sont scannés à l'aide d'un microscope optique OLYMPUS BX60 à lumière transmise muni d'une table motorisée et du logiciel OLYMPUS Stream Motion. Étant donné la longueur des sections minces, plusieurs scans sont réalisés donnant plusieurs images récoltées pour une même coupe. Le code défini en avant du process est donc à nouveau complété par une lettre minuscule indiquant l'ordre dans lequel les images doivent être replacées pour reconstituer l'entièreté de la coupe. Les sections minces scannées sont ensuite marquées d'une gommette orange.

3.4.3. Traitement des images

Afin de réduire la taille du fichier contenant le scan de la coupe et pour faciliter son utilisation future, quelques modifications sont à réaliser dans le logiciel IMAGEJ 1.53t⁷⁸ couplé à FIJI, une distribution contenant des plugins centrés sur l'analyse d'images biologiques⁷⁹. Les manipulations effectuées comprennent le passage de l'image en 8-bits, une rotation horizontale en vue de mettre le coté écorce à droite, la rotation éventuelle de l'image pour la mettre la plus plane possible et l'utilisation de la fonction « crop » pour supprimer les parties non-utiles de l'image.

Pour la suite, il est nécessaire d'obtenir la résolution et de l'appliquer aux informations contenues dans l'image. Lors de chaque scan, une échelle a été fixée sur l'image obtenue. La division du nombre de pixels contenus dans la longueur de l'échelle sur la longueur elle-même permet d'obtenir une résolution de 22.337,06 ppp. Cette résolution fut appliquée à chaque image par utilisation de l'application Core Processor, faisant partie d'un trio de logiciels téléchargeable sur <https://dendrochronomics.ugent.be>^{80 81 82 83}.

3.4.4. Délimitation des largeurs de cerne

A l'aide de l'application Ring Indicator^{80 81 82 83}, les étapes de positionnement des limites de cernes et la datation ont été effectuées. Une fois toutes les images délimitées et datées, un fichier Excel contenant les largeurs de cernes par année est obtenu.

À noter que cette étape se voit parfois complexifiée par la présence d'anomalies comme des faux cernes, des cernes manquants, des cernes discontinus aussi appelés *wedging rings* ou encore des tâches médullaires, qui, dans cette étude, sont très souvent présentes en limite de cerne. Quelques exemples sont illustrés à la figure 16. Les faux-cernes sont le résultat d'une variation de croissance intra-annuelle dont les causes peuvent être multiples, comme une sécheresse de courte durée durant la saison de végétation, des gelées tardives se présentant assez tôt dans la saison ou encore après de graves attaques d'insectes². Dans cette même idée, un cerne manquant peut être expliqué par une croissance quasi nulle⁸⁴. Un autre type d'anomalie fut rencontré, l'absence totale de vaisseaux se présentant sous deux formes différentes : sur une zone restreinte « en bande » au sein d'un cerne et sur un cerne complet (Figure 17). Dans une approche plus qualitative, certaines des années présentant cette anomalie seront mises en relation visuellement avec les graphes des températures et des précipitations des années concernées. Il convient de préciser que ces anomalies ont été rencontrées à plusieurs reprises, et non uniquement sur les carottes présentées. Pour ne pas surcharger ce travail et puisqu'il s'agit d'une approche secondaire, seules ces carottes seront illustrées.

Les largeurs de cernes obtenues et la datation préliminaire effectuée, il faut alors vérifier que les années attribuées l'ont été correctement et ce, tenant compte des anomalies possibles, grâce à l'interdatation. Cette vérification s'opère d'abord visuellement et par la suite à l'aide de l'application Core Comparison^{80 81 82 83} et de COFECHA 6.06P⁸⁵, ce qui permet de corriger la datation réalisée préalablement et d'assurer une plus grande qualité des mesures effectuées³. COFECHA va mettre en corrélation chaque série de largeur de cerne d'un site avec la série moyenne globale des sites, permettant ainsi l'identification de discordances ou d'erreurs⁸⁶.

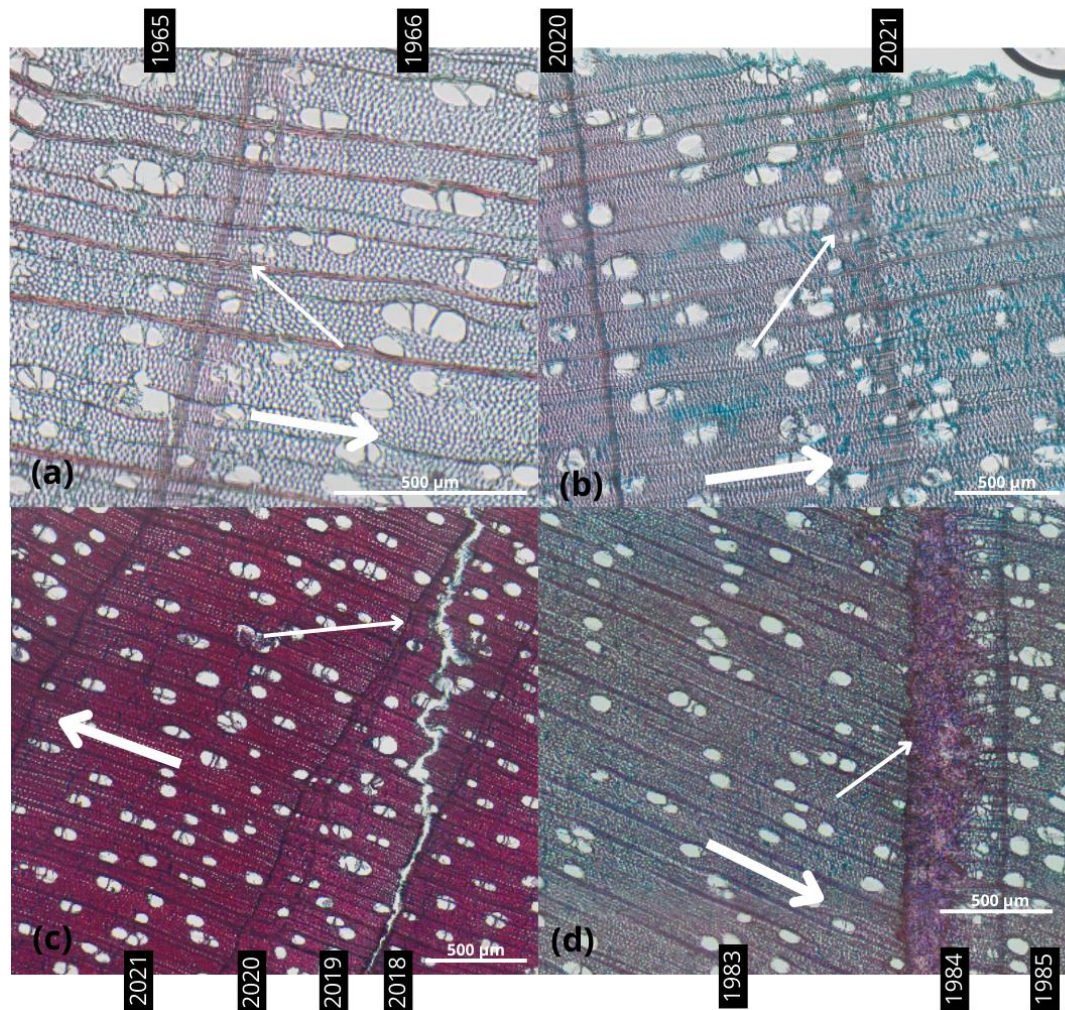


Figure 16. (a) Suspicion de faux-cerne en 1966 - BV_EUP_10_A_d ; (b) Suspicion de faux-cerne en 2021 – BV_ROM_05_A_ii_e ; (c) Présence d'un *Wedging ring* en 2020 – BV_ROM_09_A_h ; (d) Présence d'une tâche médullaire en bordure de limite de cerne en 1984 – BV_DAV_01_B_i_c. Les différentes anomalies sont indiquées par la flèche plus fine tandis que la plus épaisse indique le sens de la croissance, de la moelle vers l'écorce.

3.1. Traitement des données et lien avec le climat

Toutes les analyses décrites ci-dessous ont été effectuées sur les séries de largeurs de cernes obtenues précédemment avec le logiciel *R statistical software* (v4.3.2)⁸⁷. Les packages utilisés sont notamment : *dplyr* (v1.7.5)^{88 89 90}, *tidyr* (v1.3.0)⁹¹, *dplyr* (v1.1.4)⁹², *ggplot2* (v3.4.4)⁹³, *readxl* (v1.4.3)⁹⁴. Lorsqu'il y a utilisation de packages plus spécifiques pour certaines étapes, ces derniers sont précisés.

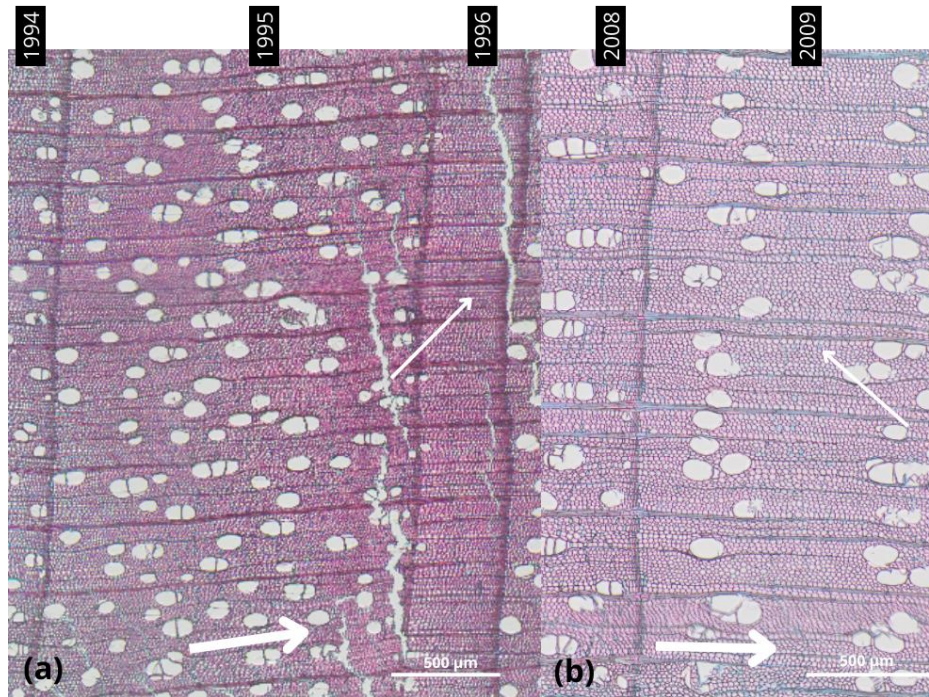


Figure 17. (a) Cerne correspondant à l'année 1996 présentant une absence de vaisseaux – BV_VIT_07_B_c ; (b) Cerne de l'année 2009 présentant une zone « en bande » avec absence de vaisseaux – BV_ROM_01_A_ii_g. Les différentes zones sont indiquées par la flèche plus fine tandis que la plus épaisse indique le sens de la croissance, de la moelle vers l'écorce.

3.1.1. Standardisation des séries de cernes brutes

Les largeurs de cernes intègrent une grande diversité de signaux issus de l'environnement et du contexte biologique⁶⁶. Les fréquences de variation des largeurs de cernes diffèrent selon la provenance du signal, par exemple, on retrouve généralement les signaux dus à la gestion sylvicole dans la moyenne fréquence⁸⁴. Puisque cette étude se focalise sur la variation interannuelle des largeurs de cerne sous l'influence du climat (signal haute fréquence), il faut enlever le signal basse et moyenne fréquence qui, dans cette étude, créent un bruit de fond^{63 84}, c'est la standardisation. Par un ajustement des données brutes avec une fonction spécifique produisant des valeurs prédites, l'obtention d'un indice de largeur de cerne standardisé se fait grâce au rapport entre les valeurs brutes et les valeurs prédites⁶³. De cette manière, le signal d'intérêt est conservé tandis que les autres sont atténués⁸⁴.

Ici les séries individuelles brutes ont été doublement standardisées (Figure 19). Une première fois à l'aide d'une courbe exponentielle négative comme décrite dans Fritts⁶⁴, permettant l'estimation du signal basse fréquence intégrant notamment les signaux liés à l'âge de l'arbre⁶³.

La seconde fois grâce à une spline cubique de lissage^{66 95}, pour une fréquence de coupure de 50% avec une rigidité fixée à 10 ans, estimant ainsi le signal moyenne fréquence comportant entre autres les effets de la sylviculture⁸⁴.

3.1.2. Construction des différentes chronologies par peuplement

Une fois les séries individuelles standardisées, la chronologie maitresse est alors établie pour chaque peuplement. Cette dernière s'obtient par calcul de la moyenne robuste à double pondération^{66 96 97} avec au préalable pré-blanchiment des séries dans le but d'éliminer l'autocorrélation⁹⁸. Deux types de chronologies sont ainsi produites avec la fonction *chron*, une chronologie standard et une chronologie résiduelle. L'utilisation de la chronologie résiduelle dans cette étude des relations largeurs de cernes – climat est privilégiée. La chronologie résiduelle obtenue par la fonction *chron* résulte de l'utilisation d'un modèle autorégressif multivarié sur la chronologie standard. Bien que statistiquement très proche d'une chronologie standard, et possédant une qualité similaire, la chronologie résiduelle possède des résultats avec moins de variance d'erreur et élimine les autocorrélations de premier ordre de grande amplitude^{66 99 96}. On observe, dans les études dendrochronologiques, l'utilisation de la chronologie standard ou de la chronologie résiduelle, de manière générale les résultats diffèrent assez peu. Il est toutefois toujours utile de préciser sur quelle chronologie ont été effectuées les analyses.

Une chronologie résiduelle supplémentaire, construite uniquement avec les sites possédant la meilleure interdatation fut également mise en lien avec le climat. Ceci afin de vérifier par la suite s'il y a présence de signaux communs entre les deux chronologies résiduelle établies.

3.1.3. Statistiques sur les chronologies

La qualité et la robustesse des chronologies fut vérifiée à l'aide de différents outils présentés ci-dessous. A noter qu'il a fallu au préalable regrouper les données des carottes provenant d'un même arbre. Par application d'un masque créé avec la fonction *autoread.ids* du package *dplR*, les données sont moyennées par arbre avant de calculer les statistiques.

- **Rbar.bt** : il s'agit de la corrélation moyenne entre les séries individuelles. Cet indice permet d'obtenir une vision globale de la force du signal commun entre tous les arbres du peuplement ainsi que du bruit $(1-Rbar.bt)^{63}$.

$$rbar.bt = \frac{1}{2t(t-1)} \left(\sum_{j=1}^{t-1} \sum_{\substack{j'=1 \\ j'>j}}^t r_{jj'} \right) \quad (1)$$

avec t , le nombre d'arbres du site i , j représentant l'arbre considéré. $rbar.bt$ est donc également considéré comme la moyenne arithmétique des coefficients de corrélation des paires de séries⁶³. La variable $rbar.bt$ varie de 0 à 1. Elle est égale à 0 lorsque les séries individuelles sont totalement indépendantes les unes des autres, et elle atteint la valeur de 1 lorsque les arbres ont de fortes similitudes dans leur réponse⁶³.

- **EPS** : Il s'agit de l'*Expressed Population Signal* qui exprime la manière dont une chronologie basée sur un sous-échantillon reflète une population considérée théoriquement infinie. Le seuil d'acceptabilité, fixé à 0,85, permet d'accepter la représentativité du sous-échantillon pour une valeur d'EPS supérieure^{100 101}. Il a été démontré qu'une diminution du nombre d'arbres échantillonnés par peuplement induit une diminution exponentielle de l'EPS⁶⁹. Pour autant, le nombre de sites échantillonnés étant le principal influenceur, il convient mieux de multiplier le nombre de sites échantillonnés que le nombre d'arbres carottés par site^{63 102}. L'EPS d'un peuplement se calcule comme suit :

$$EPS = \frac{t * Ceff * rbar.bt}{(t-1) * rbar.bt + Ceff} \quad (2)$$

avec t, le nombre d'arbres du site, rbar.bt, la corrélation moyenne entre les séries individuelles et Ceff, le nombre effectif de carottes. L'EPS varie de rbar.bt à 1, où la valeur de 1 indique une absence totale de bruit et une estimation parfaite du signal commun à l'ensemble des arbres de la population échantillonnée⁶³.

- **SNR** : le *Signal to Noise Ratio* représente l'intensité du signal commun entre les séries individuelles¹⁰⁰. Celui-ci est étroitement lié à l'EPS par la formule qui suit¹⁰⁰ :

$$EPS \approx \frac{SNR}{1+SNR} \quad (3)$$

Quand celui-ci est <1, on considère que le signal commun est difficilement distinguable du bruit. Les sources du bruit peuvent être diverses (e.g. des erreurs, des perturbations environnementales). À l'inverse, quand il est >1 c'est que le signal perçu est plus important que le bruit de fond. Plus il sera élevé et plus grande sera la qualité des données dendrochronologiques.

- **MS** : la sensibilité moyenne (*Mean Sensitivity*) représente la variation moyenne en pourcentage de la largeur entre deux cernes successifs^{64 10}. Autrement dit, elle indique si la série présente une réaction marquée ou non d'une année à l'autre. Le calcul de cette sensibilité moyenne sur des séries standardisées conduira à des valeurs moins élevées, mais cela permettra de mieux refléter les influences du climat⁶³. La sensibilité moyenne de l'arbre j appartenant à la placette i se calcule comme suit¹⁰⁴:

$$MS_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{y=1}^{k-1} \left| \frac{2 * (IC_{ij(k+1)} - IC_{ijk})}{(IC_{ij(k+1)} - IC_{ijk})} \right| \quad (4)$$

avec n, le nombre de cernes dans la carottes et IC, la largeur ou l'indice de cerne. Elle varie de 0, lorsque deux cernes successifs sont égaux indiquant une réponse faible, à 2, lorsque l'un des cernes est d'épaisseur nulle et indique donc une réaction marquée⁶³.

Pour obtenir la sensibilité moyenne du peuplement, les MS individuelles sont moyennées arithmétiquement⁶³.

Cependant, d'après une étude de Strackee & Jansma¹⁰⁵ il apparait que la sensibilité moyenne n'est pas un paramètre très robuste et qu'elle peut porter à confusion puisqu'elle ne sépare pas la variance de l'autocorrélation et qu'elle peut se voir influencée en cas de forte autocorrélation^{105 106}. Bunn et al.¹⁰⁶ ont depuis lors démontré qu'il était plus intéressant d'utiliser l'écart-type ainsi que le coefficient d'autocorrélation de premier ordre pour étudier la sensibilité d'une série. Dans la partie suivante concernant les statistiques sur les chronologies brutes et résiduelles ce sont donc ces deux indices qui sont utilisés. La sensibilité moyenne reste toutefois une statistique intéressante lorsqu'elle est couplée au coefficient d'interdatation, voir ci-dessous, d'où sa présence dans cette étude.

- **SR** : le coefficient d'interdatation permet d'évaluer la justesse de la synchronisation entre les différentes séries individuelles qui composent la chronologie maitresse et se calcule comme suit :

$$SR = \frac{MS_{mi}}{MS_i} \quad (5)$$

avec MS_{mi} , la sensibilité moyenne directement calculée sur la chronologie maitresse du peuplement i et MS_i , la moyenne arithmétique des sensibilités moyennes du peuplement calculées sur les séries individuelles⁶³. Le coefficient d'interdatation varie de $\frac{1}{\sqrt{n}}$, pour des largeurs de cernes qui varieraient de manière complètement aléatoire, à 1, pour une synchronisation parfaite^{63 107 108}. Concernant son interprétation couplée à la sensibilité moyenne, une MS faible avec un SR élevé met en évidence une réaction modérée et uniforme des individus face aux conditions climatiques⁶³.

- **SD** : l'écart-type, indique la manière dont se répartissent les valeurs autour de la moyenne. Il est également un bon indicateur, pouvant aisément remplacer la sensibilité moyenne puisqu'il tient à la fois compte de la variance et de l'autocorrélation¹⁰⁹.
- **AC1** : le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 qui permet d'étudier l'influence que peut avoir la croissance de l'année $t-1$ sur la croissance de l'année t ⁶⁴. AC1 est donc une estimation de la corrélation moyenne entre la croissance de deux cernes qui se suivent⁶³. Considérons la formule suivante :

$$y_t = \phi y_{t-1} + \epsilon_t \quad (6)$$

avec y , la largeur de cerne, t , l'année en cours, ϕ , le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 et ϵ , un coefficient dépendant d'autres facteurs¹⁰⁶. Le calcul de l'AC1 pour un peuplement se fait ensuite en moyennant arithmétiquement les AC1 obtenus pour chaque paire d'années consécutives. Celui-ci varie de -1 à 1 et sera généralement d'autant plus faible que la sensibilité moyenne et l'écart-type sont élevés⁶³.

3.1.4. Analyse du lien croissance-climat

Les analyses suivantes ont toutes été effectuées avec le package 'Treeclim' (v2.0.6.0)¹¹⁰ se basant sur le programme DendroCLIM2002¹¹¹.

Pour l'analyse du lien croissance-climat, la chronologie résiduelle reprenant l'ensemble des sites et les huit chronologies résiduelles correspondant aux huit peuplements ont été utilisées ainsi que, comme variables climatiques, la moyenne mensuelle des températures (°C) et la somme mensuelle des précipitations (mm). La relation croissance-climat fut étudiée pour des périodes variables, dépendamment du site étudié, comprises entre 1935 et 2018 (Tableau 3). Deux types de fonctions de corrélation Bootstrap ont été analysées : une fonction simple (*static*) permettant l'évaluation de la relation croissance-climat et une fonction mobile (*moving*) afin d'étudier la stabilité temporelle de la relation croissance-climat¹¹². Concernant cette dernière fonction, la fenêtre d'intervalle appliquée est d'une longueur de 25 ans avec décalage d'un an. La fonction de corrélation nous donne comme résultats des coefficients de corrélation de Pearson.

Chaque estimation Bootstrap s'obtient en générant 1000 échantillons Bootstrap, sur base des distributions originales de cernes et des données climatiques. C'est le Bootstrap stationnaire qui fut sélectionné, puisqu'il reproduit les propriétés stationnaires de la série originale au sein de la série rééchantillonnée en effectuant un rééchantillonnage au sein d'un bloc¹¹³. La longueur optimale de ce bloc est choisie automatiquement lors de l'application de la fonction conformément à Politis & White¹¹⁴. Qu'il s'agisse des fonctions de réponse ou de corrélation, les coefficients obtenus sont testés pour leur significativité selon la méthode de Dixon¹¹⁵ à l'aide de l'intervalle de percentile à 95%. Les cernes sont mis en lien avec les variables climatiques, depuis avril de l'année précédente à septembre de cette année, afin de pouvoir également étudier l'influence des conditions climatiques de la saison de végétation précédente sur la croissance de l'année en cours.

Enfin, la fonction *seascorr* fut employée afin d'étudier le signal climatique saisonnier. La variable primaire, ici la température, est mise en corrélation avec la croissance en vue d'obtenir des coefficients de corrélation de Pearson tandis que l'influence de la variable secondaire, ici les précipitations, est évaluée par suppression de l'influence de la variable primaire sur la croissance. De la même manière qu'au sein du programme *seascorr*, la significativité des

corrélations est étudiée par application bootstrap de la CEM (*Circulant Embedding Method*)¹¹⁶. Lors de l'application de la fonction *seascorr*, la première saison considérée se déroule de juin à septembre, avec septembre considéré comme le dernier mois de la période de végétation.

3.2. Années caractéristiques

3.2.1. Détection des années caractéristiques

Les *pointer years*, ou années caractéristiques, sont des années pour lesquelles la largeur de cerne attribuée présente une croissance inhabituellement large ou étroite⁶³. Une année caractéristique indique généralement un évènement climatique extrême, comme une gelée tardive ou une sécheresse, et permet, par son analyse et sa mise en lien avec le climat, de révéler les impacts que ce dernier peut avoir sur la croissance de l'arbre¹¹⁷.

La détection des années caractéristiques fut réalisée pour chaque peuplement, sur séries standardisées à l'aide d'une spline de lissage cubique, avec la méthode BSGC, *Bias-adjusted Standardized Growth Change method* (package 'dendRolAB' v0.3)¹¹⁸. Auparavant dénommée SGC pour *Standardized Growth Change method*¹¹⁹, elle s'est vue améliorée, notamment afin de pouvoir détecter les années caractéristiques successives.

Cette méthode se base sur la combinaison de deux fonctions de densité de probabilités : une fonction de densité de probabilité pour le changement de croissance d'une année à l'autre et une pour le changement de la croissance global pour une valeur donnée de RWI^{118 119}. Pour le respect des conventions, Buras et al.^{118 119} ont défini l'intervalle de confiance à 95%¹²⁰. On considérera dès lors qu'une année est dite caractéristique, négative ou positive, pour une probabilité respectivement inférieure à 0,025 ou supérieure à 0,975¹¹⁸ (Buras et al., 2022). Lors d'une étude réalisée par Buras et al.¹¹⁹, comparant les différentes méthodes de détection des années caractéristiques, la méthode SGC (maintenant BSGC) surpasse les autres méthodes avec un taux de détection supérieur et plus précis. La méthode fut appliquée pour chaque série moyenne de peuplement, sur la période de chevauchement commune aux séries individuelles des arbres dudit peuplement. Après identification des années caractéristiques, celles-ci ont été mises en lien avec les données climatiques.

3.2.2. Evaluation de la résilience

La résilience est « la capacité d'un écosystème, d'une communauté ou d'un individu à se rétablir après une perturbation et à retrouver sa structure et sa fonction d'avant la perturbation »^{121 122 123}. Dans le cas présent, l'étude de la résilience et de ses composantes (Figure 18) pour les années caractéristiques identifiées, permet d'évaluer le comportement du peuplement et sa sensibilité face aux évènements climatiques extrêmes en considérant les indices de largeur de cerne.

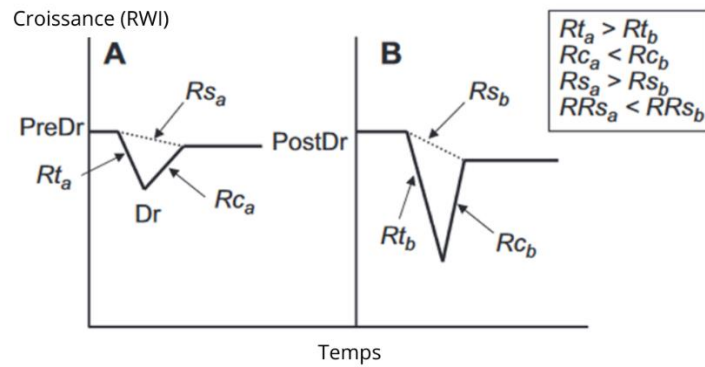


Figure 18. Illustration des liens entre les indices, composantes de la résilience. Deux cas sont présentés : (A) Arbre ayant une forte résistance (Rt_a), la croissance diminue moins, et une forte résilience (Rs_a), la croissance avant perturbation est similaire à la croissance après perturbation ; (B) Arbre avec une plus petite résistance (Rt_b), la croissance diminue de manière plus importante, et malgré une résilience plus faible (Rs_b) récupère plus vite après l'impact (Rc_b) - Figure adaptée de Lloret et al.¹²³.

Les analyses de résilience (package 'pointres' v2.0.2¹²⁴) ont été effectuées pour les différents peuplements sur les séries moyennes standardisées et incluent diverses composantes^{124 125 126} :

- **La résilience (Rs)** : mesure la reprise de la croissance après la perturbation. Elle est calculée comme le rapport entre la croissance après perturbation ($Croissance_{PostP}$) et la croissance avant perturbation ($Croissance_{PreP}$).

$$Rs = \frac{Croissance_{PostP}}{Croissance_{PreP}} \quad (7)$$

- **La résistance (Rt)** : mesure le degré de perte en croissance à la suite de la perturbation. Elle est le rapport entre la croissance durant la perturbation ($Croissance_p$) et la croissance avant la perturbation.

$$Rt = \frac{Croissance_p}{Croissance_{PreP}} \quad (8)$$

- **La récupération (Rc)** : mesure la capacité à se rétablir à la suite de la perturbation. C'est le rapport entre la croissance après et pendant la perturbation. Pour des valeurs < 1, on considère qu'il y a une baisse de la croissance par suite de la perturbation.

$$Rc = \frac{Croissance_{PostP}}{Croissance_p} \quad (9)$$

- **La résilience relative (RRs)** : mesure la résilience avec une pondération par les dommages dus à la perturbation. Il s'agit du rapport entre la différence de croissance après et pendant la perturbation sur la croissance avant perturbation. Pour des valeurs < 1 on considère qu'il y a une persistance des effets de la perturbation.

$$RRs = \frac{Croissance_{PostP} - Croissance_P}{Croissance_{PreP}} \quad (10)$$

- **La période de récupération** : temps nécessaire pour retrouver un niveau de croissance d'avant perturbation. Il s'agit du nombre d'années s'étalant entre le moment où survient la perturbation et le moment où la croissance d'avant perturbation est rétablie.

Pour les périodes pré- et post- perturbation, le nombre d'années pris en compte dans le calcul des composantes de résilience est fixé à quatre ans. $Croissance_{PreP}$ correspond donc à la moyenne des croissances pour les quatre années précédant la perturbation. Concernant l'évaluation de la période de récupération, elle se limite aux dix années qui suivent la perturbation. Il s'agit ici des valeurs fixées par défaut^{123 126}.

Ces indices sont également interconnectés de manière assez intuitive. La résilience est directement liée à la résistance et à la capacité de récupération, tandis que la résistance a un impact décroissant sur la résilience relative¹²³.

4. Résultats

4.1. Evaluation de la qualité des chronologies

Sont illustrés à la figure 19 les effets de la double standardisation réalisée sur une série individuelle de largeurs de cernes. La figure 20 montre, pour le site de Bonlez, les séries individuelles standardisées pour chaque arbre, la chronologie maîtresse résiduelle du peuplement ainsi que le *sample.depth*, représentant le nombre de répliques disponibles pour une année donnée. Cette illustration a été réalisée pour chaque site (Annexe 1).

On observe que la moyenne des largeurs de cernes (Tableau 4) la plus élevée pour les séries brutes concerne le site de Ronquières avec 3,81 mm (min = 1,11 et max = 6,29). Cette valeur est trois fois plus importante que le site de Stoumont, possédant la valeur moyenne minimum équivalent à 1,13 mm (min = 0,20 et max = 4,43).

L'EPS le plus élevé est obtenu pour le site de Bonlez, démontrant ainsi une meilleure représentation de la population que les autres sites. Les EPS des sites sont en dessous du seuil d'acceptabilité de 0,85 ce qui ne permet pas d'accepter la représentativité. Cependant, puisque l'EPS dépend du nombre d'arbres échantillonnés, il est normal d'avoir une faible valeur pour un site donné. En comparaison, si l'ensemble des arbres sont pris en considération pour le calcul de ce dernier, on obtient : EPS = 0,80 et SNR = 3,94. De cette manière, la limite du seuil d'acceptabilité permettant d'assurer la représentativité de la population du bouleau verruqueux en Wallonie est quasiment atteinte. Cette valeur de seuil reste discutable du fait de sa forte dépendance au nombre d'échantillon. L'EPS de la chronologie résiduelle construite avec les sites ayant la meilleure interdatation est de 0,91 bien qu'il n'y ait que 10 arbres considérés.

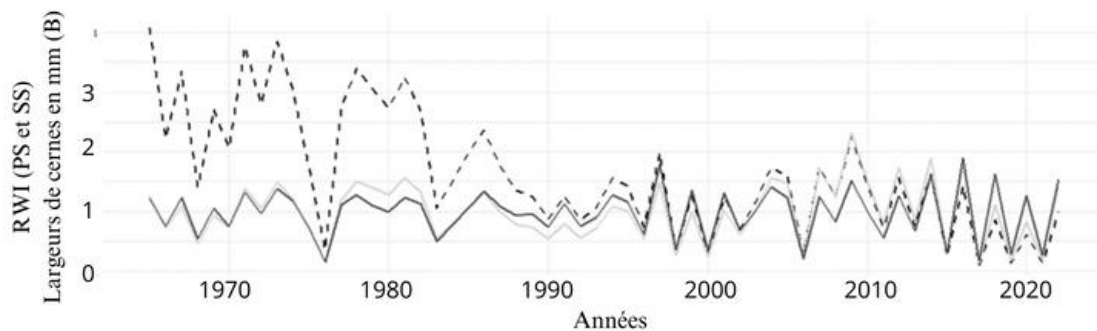


Figure 19. Illustration des effets de la double standardisation sur une série individuelle de largeurs de cernes pour la carotte BON05B. La série brute (ligne de pointillés noirs) est en mm tandis que la série simplement standardisée (PS, en gris clair) et la série doublement standardisée (SS, en foncé) n'ont pas d'unité puisqu'il s'agit d'indices de largeur de cerne.

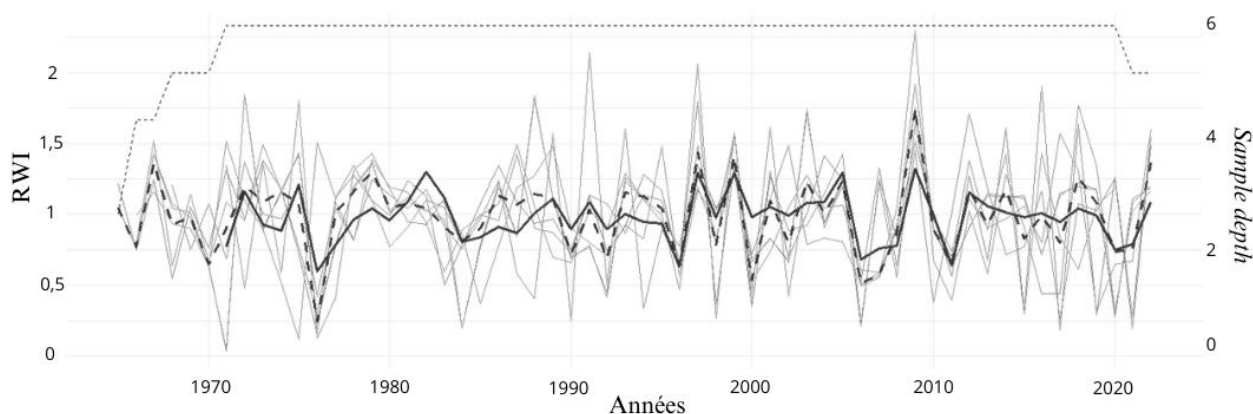


Figure 20. Graphe présentant les séries individuelles standardisées (en gris), la chronologie maitresse résiduelle (en trait plein noir), la chronologie maitresse standard (en trait à pointillés noir) ainsi que le nombre d'échantillons disponibles pour la construction de cette dernière à une année donnée (*Sample depth* - en pointillés gris) pour le site de Bonlez.

La similarité des séries au sein du site, indiquée par $R_{bar}.bt$ et SNR, est plus élevée pour Bonlez, Stoumont, Raeren et Vitrival, indiquant une meilleure synchronisation des séries entre elles au sein du peuplement. A contrario, Jurbise, Daverdisse, Ronquieres et Eupen présentent les valeurs les plus basses et possèdent donc une synchronicité de qualité moindre.

L'analyse couplée des valeurs assez faibles de MS aux valeurs peu élevées de SR pour la globalité des peuplements, démontre une réaction modérée aux signaux climatiques avec une certaine hétérogénéité au sein de chaque peuplement. La sensibilité est tout de même plus faible pour Ronquières, Raeren et Eupen.

Au regard de l'AC1 pour la chronologie maitresse résiduelle, il apparait comme prévu qu'elle ne contient que de minimes valeurs d'autocorrélation entre les largeurs de cernes successives. A ce sujet, Bunn et al.¹⁰⁶ explicitait le fait que pour un AC1 plus élevé, MS prenait de plus grandes valeurs pour une augmentation de SD.

Tableau 4. Statistiques dendrochronologiques pour les différents peuplements. Avec N = Nombre d'arbres échantillonnés, n = Nombre de carottes prélevées, SD = l'écart-type, AC1 = le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1, MS = la sensibilité moyenne, Rbar.bt = la corrélation moyenne entre les séries, EPS = *expressed population signal* et SNR = *signal-to-noise-ratio*.

Site	Lchron		Chronologie maitresse brute				Chronologie maitresse résiduelle				Chronologie maitresse standardisée					
	N	n	M (mm)	m (mm)	SD (mm)	AC1	M	m	SD	AC1	MS	SR	Rbar.bt	EPS	SNR	
JURBISE	5	5	1935-2023	2,02	1,91	1,13	0,78	0,98	0,97	0,16	0,19	0,48	0,29	0,06	0,23	0,30
BONLEZ	4	7	1965-2022	1,61	1,13	1,24	0,69	0,98	0,99	0,18	-0,09	0,54	0,35	0,27	0,63	1,70
RONQUIERES	10	16	1974-2022	3,81	3,88	1,34	0,79	1,00	1,01	0,10	-0,08	0,38	0,33	0,08	0,36	0,55
VITRIVAL	5	5	1937-2023	2,25	2,27	1,02	0,61	1,00	0,99	0,18	-0,05	0,54	0,37	0,20	0,56	1,29
STOUMONT	4	4	1948-2022	1,13	0,92	0,78	0,81	1,00	1,01	0,17	-0,06	0,44	0,43	0,25	0,57	1,30
RAEREN	2	3	1968-2022	1,79	1,58	1,02	0,75	0,97	0,98	0,20	-0,09	0,39	0,45	0,23	0,42	0,71
DAVERDISSE	5	7	1961-2023	1,93	1,74	1,23	0,64	0,99	0,98	0,19	-0,07	0,55	0,36	0,08	0,32	0,48
EUPEN	5	5	1953-2022	1,48	1,48	0,56	0,54	0,98	0,98	0,16	0,08	0,36	0,47	0,08	0,36	0,55

4.2. Analyse des années caractéristiques et de la résilience des peuplements

Les années caractéristiques identifiées par la méthode de Buras et al.¹¹⁸ sont présentées dans le tableau 5. Lorsqu'au moins deux peuplements partagent une même année caractéristique (positive ou négative), ces occurrences ont été mises en lien avec les données climatiques disponibles.

Tableau 5. Années caractéristiques observées pour les différents sites étudiés selon la méthode BSGC¹¹⁸. Un cercle plein indique une année caractéristique positive tandis qu'un cercle vide indique une année caractéristique négative.

Site	Années caractéristiques																								
	1976	1979	1989	1993	1994	1997	1999	2000	2001	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
BONLEZ	○	●				●	●	○				○			●										
JURBISE															●							○			
RONQUIERES													●												○
DAVERDISSE			○						●					●			●		○						
VITRIVAL	○						●		●	○															
STOUMONT			○		●						○		●		●	○		○		●					
EUPEN				●			●						●	○	●	○	●				○			○	
RAEREN								●	○				●		●	○				●					

ANNÉES CARACTÉRISTIQUES NÉGATIVES

Les années caractéristiques négatives discutées ici sont donc 1976, 1989, 2004 et 2010 et les années caractéristiques positives sont 1999, 2007, 2009 et 2011. Les températures et les précipitations moyennes mensuelles pour ces années sont reprises à la figure 21 et 22 pour les années caractéristiques négatives ainsi qu'à la figure 23 et 24 pour les années caractéristiques positives.

En 1976, les températures sont plus élevées que la moyenne de mai à août avec une forte hausse de celles-ci au mois de juillet. 1976 présente une grave sécheresse avec des précipitations très en-dessous de la moyenne tout au long de l'année, excepté en juillet et en novembre. 1989 est

une année plus contrastée avec des températures qui présentent une hausse en hiver (janvier, février, mars), en mai ainsi que durant tout l'été et début de l'automne. A cela s'ajoute quelques pics de plus faibles précipitations en janvier, mai, juillet et novembre. Pour 2004 on observe des températures légèrement plus élevées que la moyenne en février, en avril ainsi que de juillet à octobre. Du côté des précipitations, elles sont en dessous de la moyenne de février à mai. Finalement, les températures en 2010 suivent assez bien la moyenne, excepté en juin et juillet, avec un pic de hausse des températures. Celles-ci s'accompagnent de faibles précipitations en avril et en juin.

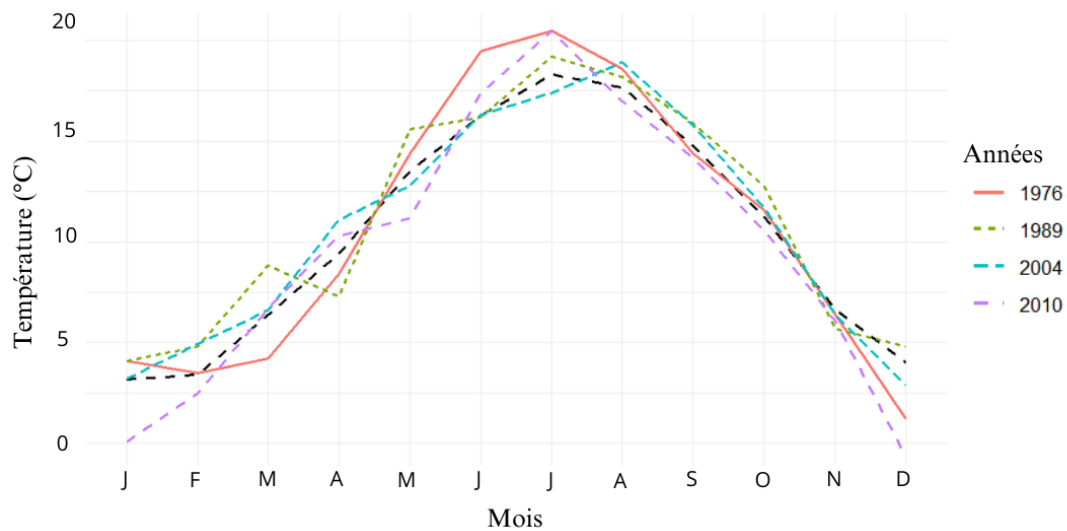


Figure 21. Diagramme présentant les températures moyennes mensuelles (en °C) pour chaque année caractéristique négative. La ligne de pointillés en noir représente la moyenne des températures moyennes mensuelles calculée de 1970 à 2018.

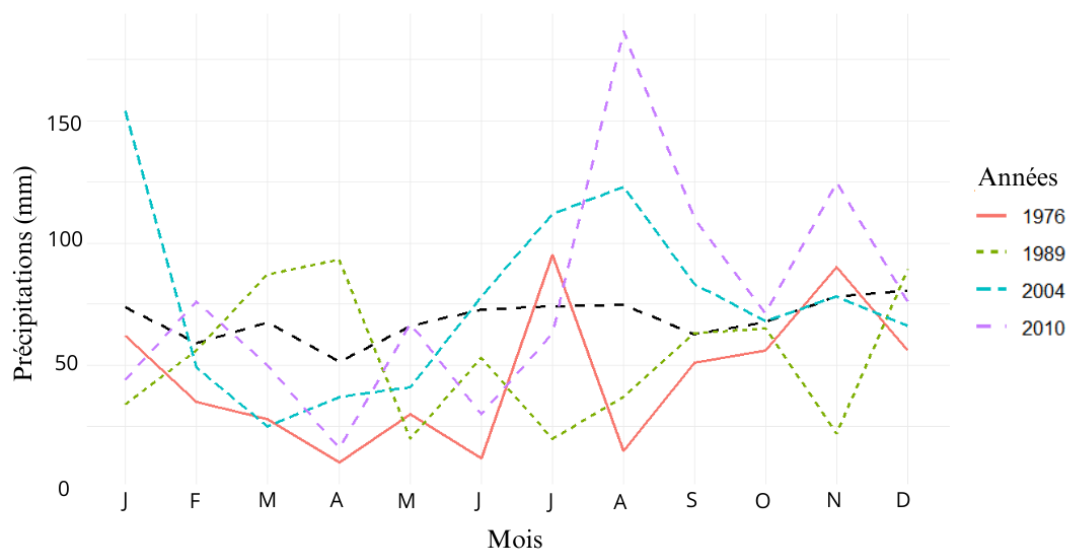


Figure 21. Diagramme présentant les précipitations totales mensuelles (en mm) pour chaque année caractéristique négative. La ligne de pointillés en noir représente la moyenne des précipitations totales mensuelles calculée de 1970 à 2018.

Ont été analysées les températures et les précipitations moyennes mensuelles pour les années précédant les années identifiées comme caractéristiques négatives à savoir : 1975, 1988, 2003 et 2009 (Annexe 6). Bien que 1976 ait connu une sécheresse très importante, les faibles précipitations en début de période végétative et en octobre de l'année antérieure ont sûrement davantage accentué cet impact. De manière similaire, les précipitations en 2003 sont assez faibles en fin d'hiver, avec des pics en juin et en septembre. Pour 2009, les précipitations suivent assez bien la moyenne, à l'exception de la fin de l'été (août et septembre). En 1988, les précipitations sont largement au-dessus de la moyenne, à l'exception des mois d'avril, juin et novembre. Dans l'ensemble, les températures suivent assez bien la moyenne, avec quelques pics notables : fin de l'hiver et en été pour 2003, début du printemps et fin de l'été pour 2009, et fin de l'été pour 1975.

ANNÉES CARACTÉRISTIQUES POSITIVES

En ce qui concerne les années caractéristiques positives on peut constater que les températures demeurent généralement au-dessus de la moyenne. Ces dernières présentent même une moyenne mensuelle plus élevée tout au long de l'année en comparaison des années caractéristiques négatives, exception faite de juin 1976. Les précipitations quant à elles présentent de moins fortes baisses. Ainsi en 1999 elles sont légèrement plus faibles en mai, juillet et de septembre à novembre. En 2007, on observe un pic marqué de faibles précipitations en avril, suivi d'une légère baisse en août. En 2009, il y a une légère diminution pour mai, suivie d'une baisse plus prononcée en août et en septembre. Quant à l'année 2011, elle se caractérise par une période de faibles précipitations de mars à mai, ainsi qu'un pic notable en novembre.

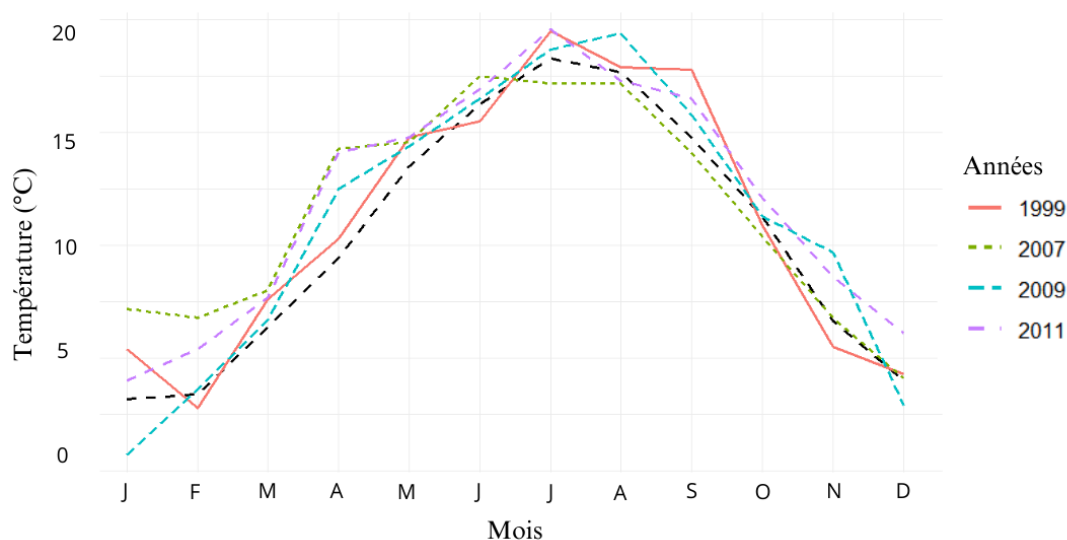


Figure 22. Diagramme présentant les températures moyennes mensuelles (en °C) pour chaque année caractéristique positive. La ligne de pointillés en noir représente la moyenne des températures moyennes mensuelles calculée de 1970 à 2018.

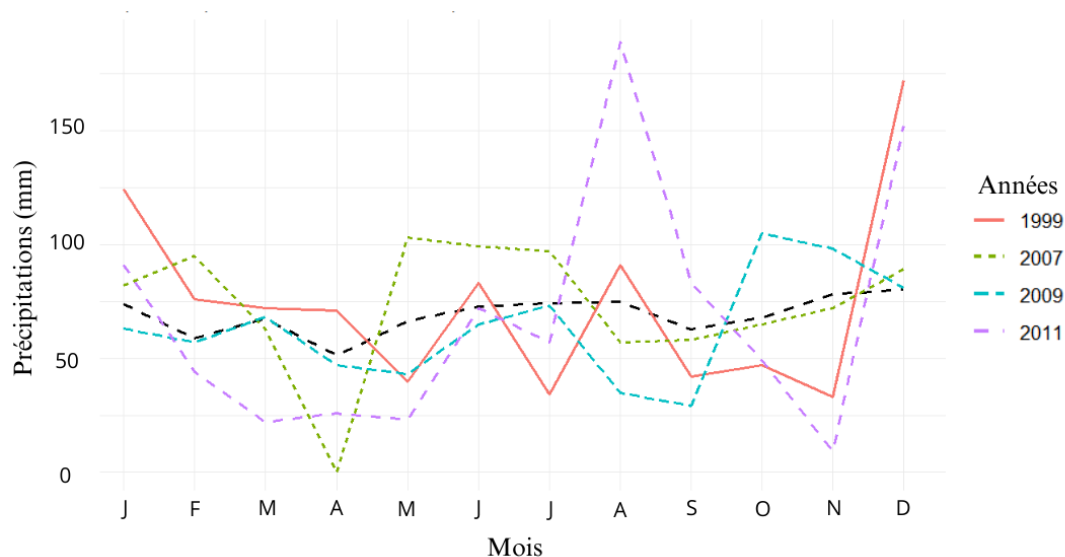


Figure 23. Diagramme présentant les précipitations totales mensuelles (en mm) pour chaque année caractéristique positive. La ligne de pointillés en noir représente la moyenne des précipitations totales mensuelles calculée de 1970 à 2018.

L'analyse du climat des années précédant les années caractéristiques positives a également été effectuée (Annexe 5). Bien qu'il y ait tout de même présence de faibles précipitations à certains moments, diverses hausses remarquables sont relevées. Notamment un pic atteignant environ 200 mm pour août 2006 et 2010 ou encore plus de 100 mm atteint au début de la période de végétation en 1998, 2006 et 2008.

Un élément commun semble donc émerger ici, caractérisé par de faibles ou d'importantes précipitations en début et fin de la saison végétative. Les résultats obtenus lors de la corrélation entre les largeurs des cernes et le climat permettront de vérifier si les facteurs climatiques de la saison de végétation précédente sont liés à la croissance de l'année en cours.

ANALYSE DE LA RÉSILIENCE

À l'échelle des peuplements (Tableau 6), on constate une résilience positive égale ou supérieure à 1 pour la plupart des peuplements, exceptés Ronquières, Raeren et Vitrival, témoignant d'un rétablissement de la croissance après perturbation et même d'une augmentation de celle-ci. Pour les trois sites dont la résilience montre une valeur légèrement inférieure à 1, cela démontre une certaine persistance dans le ralentissement de la croissance après les événements. Au regard des résistances, tous les sites présentent une valeur inférieure à 1, signifiant que la perturbation a des effets sur la croissance, traduits par une diminution de cette dernière. Une résistance supérieure est toutefois observée à Ronquières, indiquant une moins grande perte de croissance par rapport aux autres peuplements. En ce qui concerne la récupération, aucun peuplement ne présente de valeur inférieure à 1, excluant donc une perte de croissance supplémentaire après la perturbation, ce qui indique que la croissance reprend une fois la période de stress terminée.

Les taux de récupération les plus élevés sont observés pour Daverdisse et Vitrival, soulignant ainsi une capacité plus prononcée à se rétablir. Le rétablissement des sites de Raeren, Daverdisse et Bonlez nécessiterait davantage de temps, affichant des périodes de récupération plus longues par rapport aux autres sites. En revanche, Stoumont et Eupen se remettent après seulement une année. La résilience relative est inférieure à 1 pour l'ensemble des peuplements, signalant que les effets de la perturbation persistent, se manifestant par une diminution de la résilience après l'évènement, indiquant la persistance des effets de la perturbation signalée par une diminution de la résilience. Ronquières possède une résilience relative de moins de la moitié en comparaison des autres sites, indiquant que sa résilience dans les années post-perturbation est plus fortement affectée.

Tableau 6. Indices des composantes de la résilience pour chaque site. La valeur indiquée correspond à une moyenne des valeurs obtenues de l'indice pour les années caractéristiques négatives du site correspondant. Par exemple, la valeur de résilience de 1,001 pour Bonlez est la moyenne des valeurs de résilience pour 1976, 2000 et 2006, soit, ses années caractéristiques négatives.

	<u>Site</u>							
	<u>BONLEZ</u>	<u>DAVERDISSE</u>	<u>JURBISE</u>	<u>STOUMONT</u>	<u>RONQUIERES</u>	<u>RAEREN</u>	<u>EUPEN</u>	<u>VITRIVAL</u>
Résilience	1,001	1,11	1,18	1	0,96	0,94	1,06	0,97
Résistance	0,47	0,48	0,52	0,54	0,76	0,52	0,58	0,49
Récupération	3,22	4,21	2,97	2,38	2,62	2,02	2,69	4,1
Période de récupération	1,63	1,87	1,5	1,05	1,44	2,27	1,11	1,22
Résilience relative	0,54	0,64	0,66	0,46	0,21	0,42	0,47	0,48

4.3. Etude du lien croissance-climat

4.3.1. Chronologie résiduelle construite avec l'ensemble des sites

PRÉCIPITATIONS

La chronologie résiduelle reprenant l'ensemble des sites montre une corrélation significative positive avec les précipitations du mois d'octobre de l'année précédente (Figure 25a). De manière générale, les précipitations exercent principalement une influence positive sur la croissance tout au long de l'année, qu'il s'agisse de l'année en cours ou de la précédente. Même si de faibles influences négatives sont observées en décembre et février, janvier démontre un lien positif avec la croissance. La fonction *moving* (Figure 26a), présente également une influence négative des précipitations présentes en fin de saison estivale (août et septembre) de l'année en cours, tandis que pour le reste de l'année, les influences sont surtout positives.

En ce qui concerne les températures, la fonction *static* révèle une incidence significativement négative entre les températures estivales de l'année précédente (juin-juillet) ainsi que pour octobre (Figure 25b). De manière générale, les températures estivales et automnales de l'année précédente influencent négativement la croissance. Les corrélations négatives significatives observées pendant la saison estivale (juin-juillet-août) de l'année précédente sont également présentes avec la fonction *moving*, de même que le mois d'octobre (Figure 26b). Des incidences positives se marquent pour les mois de mars, avril, mai et août de l'année en cours, ainsi que pour le mois de décembre de l'année précédente.

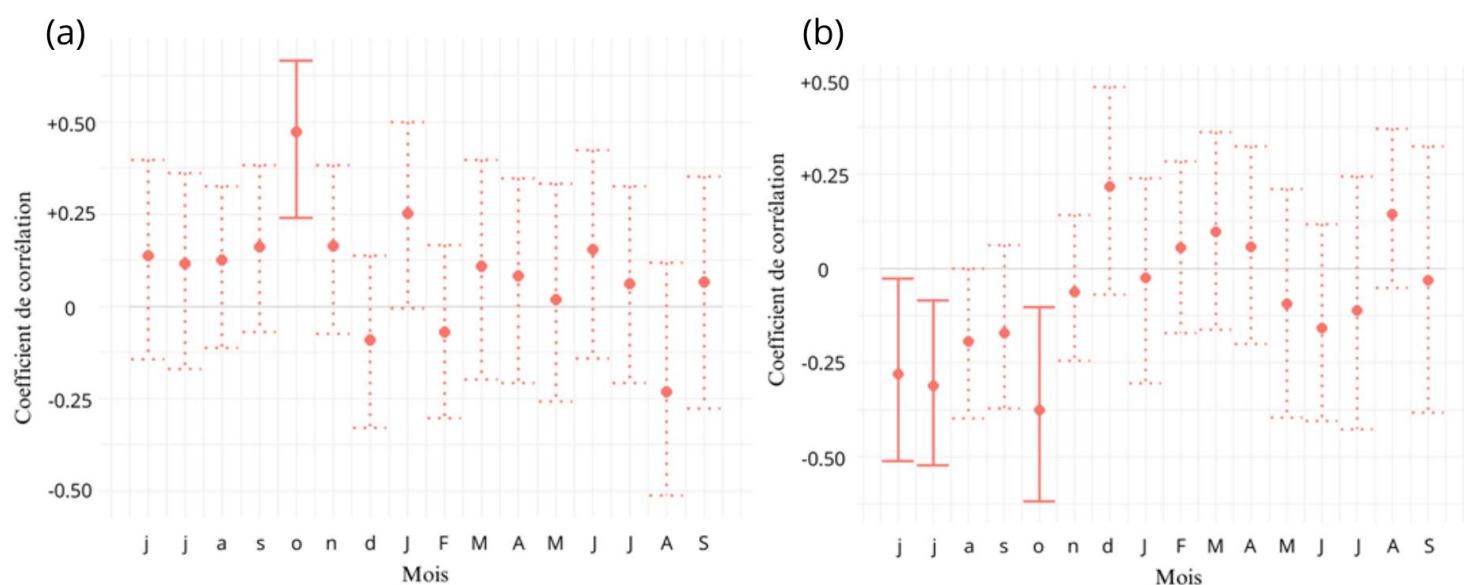


Figure 25. Coefficients de corrélation de Pearson obtenus par application de la fonction *static* pour (a) les précipitations et (b) pour les températures, étudiés de juin de l'année précédente à septembre de l'année courante (1970-2018) avec la chronologie résiduelle construite sur l'ensemble des sites. La significativité ($p < 0,05$) est représentée par les barres rouges en trait plein. Les mois de l'année précédente sont indiqués en minuscules tandis que les mois de l'année courante sont en majuscules.

Au regard des corrélations saisonnières (Figure 27), les températures plus élevées en fin de saison estivale ainsi que le début de l'automne (d'août à octobre) pour l'année précédente impactent négativement la croissance. Les corrélations partielles relatives aux précipitations révèlent principalement des impacts positifs sur la croissance, à l'exception de la fin de l'été au cours de l'année en cours. Une relation significative est notée pour le mois de mai.

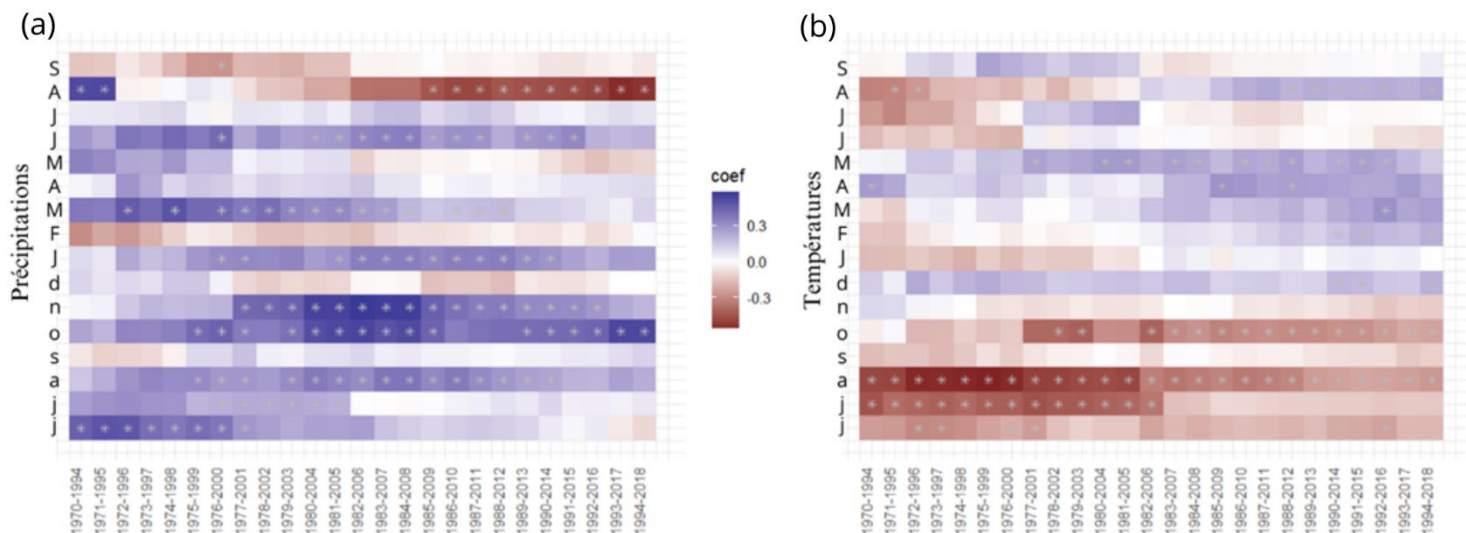


Figure 26. Coefficients de corrélation de Pearson obtenus par application de la fonction *moving* pour (a) les précipitations et pour (b) les températures, étudiés de juin de l'année précédente à septembre de l'année courante (1944-2018) avec la chronologie résiduelle construite sur l'ensemble des sites. La fenêtre d'intervalle est de 25 ans avec décalage d'un an. La significativité ($p < 0,05$) est représentée par les étoiles blanches. Les mois de l'année précédente sont indiqués en minuscules tandis que les mois de l'année courante sont en majuscules.

CORRÉLATIONS SAISONNIÈRES

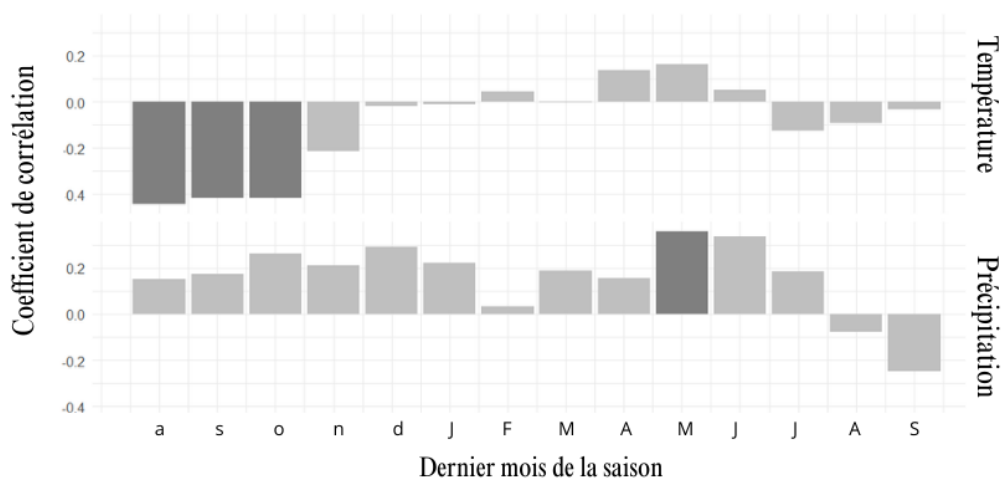


Figure 27. Coefficients de corrélations des indices de cernes avec les variables climatiques saisonnières pour une longueur de saison de 3 mois, calculés avec la chronologie résiduelle construite sur l'ensemble des sites. Coefficients de corrélation simples pour les températures et de corrélations partielles pour les précipitations. La significativité ($p < 0,05$) est représentée par les barres en gris foncé. Les mois de l'année précédente sont indiqués en minuscules tandis que les mois de l'année courante sont en majuscules.

4.3.2. Chronologie résiduelle construite avec les carottes démontrant une meilleure interdatation

Après évaluation de la qualité de l'interdatation réalisée, il en ressort que certaines carottes ou segments de carotte présentent une meilleure interdatation. C'est-à-dire, qu'ils présentent une meilleure corrélation entre les signaux et aucune alerte qui indiquerait une possible amélioration si le signal était modifié. Les résultats de cette évaluation sont disponibles et illustrés par la partie 5 de la sortie obtenue avec le programme COFECHA (Annexe 4).

PRECIPITATIONS

Des influences positives significatives sont observées avec la fonction *static* pour les précipitations d'octobre de l'année précédente et janvier de l'année en cours (Figure 28a). Il est à noter que toutes les corrélations sont positives à l'exception de décembre de l'année précédente et d'août de l'année en cours. La fonction *moving* présente des corrélations significativement négatives pour août de l'année en cours ainsi que pour juin de l'année précédente, bien que pour ce dernier ça ne concerne que des années plus récentes (Figure 29a). A l'instar de la fonction *static*, les influences positives sont bien plus nombreuses notamment pour l'été et l'automne de l'année précédente, ainsi que pour janvier et début de l'été de l'année en cours.

TEMPERATURES

En revanche, les influences que peut avoir la température sur la croissance sont mitigées. Les températures estivales et automnales de l'année précédente entraînent une diminution de la croissance (Figure 28b et Figure 29b). Cependant, les températures de toute la saison hivernale ainsi que le début du printemps influencent positivement la croissance. Sur l'année courante du cerne concerné, on observe une influence négative des températures pour juin, juillet et septembre.

CORRELATIONS SAISONNIERES

Les corrélations saisonnières (Figure 30) confirment l'influence positive qu'ont les précipitations estivales et automnales de l'année précédente. Les températures plus élevées fin de l'été et début d'automne de l'année précédente maintiennent cette influence négative sur la croissance. Les températures pour l'été de l'année courante font de même.

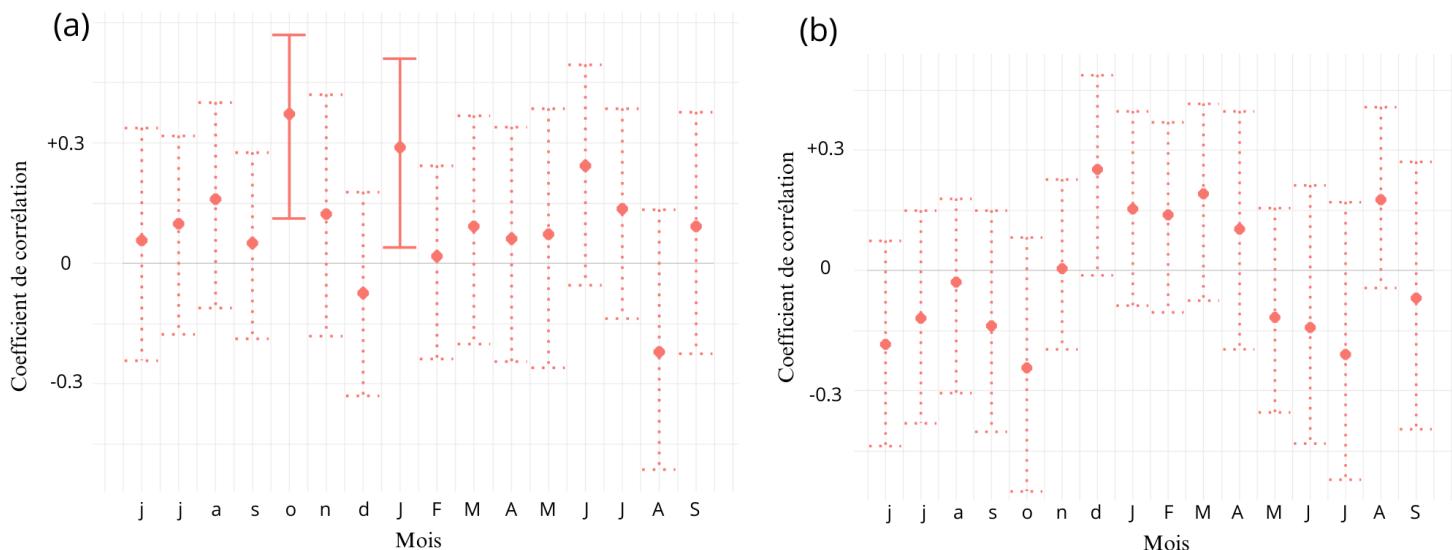


Figure 28. Coefficients de corrélation de Pearson obtenus par application de la fonction *static* pour (a) les précipitations et (b) pour les températures, étudiés de juin de l'année précédente à septembre de l'année courante (1961-2018) avec la chronologie résiduelle des sites les mieux interdatés. La significativité ($p < 0,05$) est représentée par les barres rouges complètes. Les mois de l'année précédente sont indiqués en minuscules tandis que les mois de l'année courante sont en majuscules.

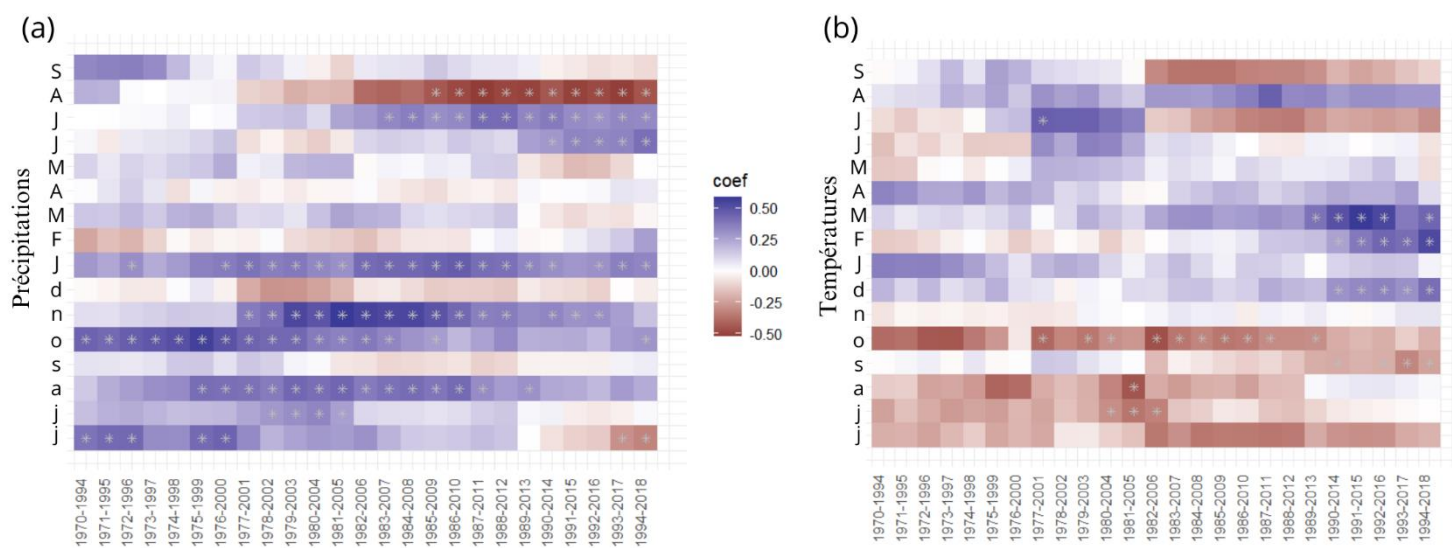


Figure 29. Coefficients de corrélation de Pearson obtenus par application de la fonction *moving* pour (a) les précipitations et pour (b) les températures, étudiés de juin de l'année précédente à septembre de l'année courante (1961-2018) avec la chronologie résiduelle des sites les mieux interdatés. La fenêtre d'intervalle est de 25 ans avec décalage d'un an. La significativité ($p < 0,05$) est représentée par les étoiles blanches. Les mois de l'année précédente sont indiqués en minuscules tandis que les mois de l'année courante sont en majuscules.

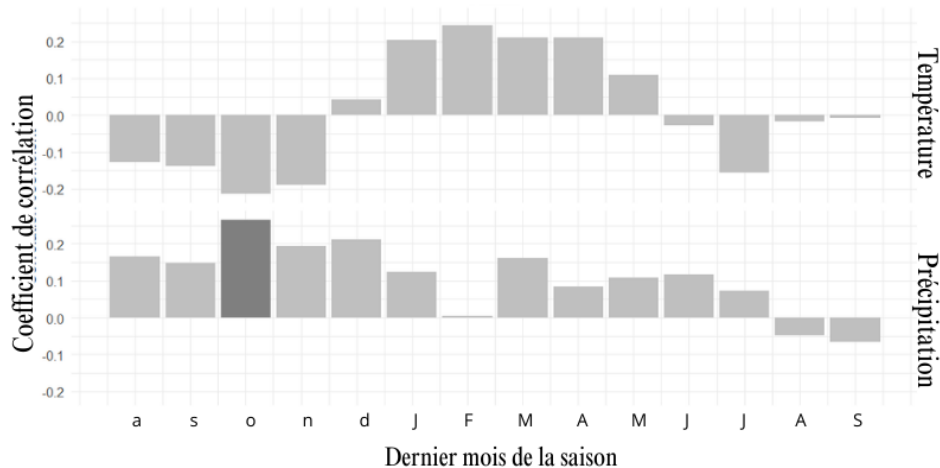


Figure 30. Coefficients de corrélations des indices de cernes avec les variables climatiques saisonnières pour une longueur de saison de 3 mois, calculés pour la chronologie résiduelle des sites les mieux interdatés. Coefficients de corrélation simples pour les températures et de corrélations partielles pour les précipitations. La significativité ($p < 0,05$) est représentée par les barres en gris foncé. Les mois de l'année précédente sont indiqués en minuscules tandis que les mois de l'année courante sont en majuscules.

4.3.3. Chronologie résiduelle de chaque site à l'échelle individuelle

Les analyses ci-dessus ont également été effectuées individuellement pour chaque peuplement (Annexe 2).

PRECIPITATIONS

Dans la globalité, on observe beaucoup d'influence négative en hiver ainsi que pour le mois d'août de l'année précédant la croissance. On retrouve tout de même plus d'incidences positives que négatives quand il s'agit des précipitations, surtout pour la fin de l'été et l'automne de l'année précédente.

TEMPERATURES

En ce qui concerne les températures, quelques corrélations positives se démarquent au printemps, bien que celles-ci soient principalement éclipsées par des corrélations négatives. Ces dernières peuvent se manifester à n'importe quel moment de l'année en cours, mais elles se situent en majorité durant l'année précédente. Parmi les 8 peuplements étudiés, au moins 5 présentaient des baisses de croissance face à l'élévation des températures durant la saison estivale et automnale de l'année précédente. Une influence notable de la période hivernale a également été remarquée, avec des corrélations négatives de janvier à mars.

CORRÉLATIONS SAISONNIÈRES

Les corrélations saisonnières fluctuent d'un site à l'autre mais une tendance générale se crée avec une incidence négative des températures d'août à novembre de l'année précédente.

4.4. Approche qualitative du lien entre les absences de vaisseaux et le climat

ABSENCE DE VAISSEAUX SUR UN CERNE COMPLET

Le cerne de 1996 pour la carotte BV_VIT_07_B présentait une absence totale de vaisseaux. Au regard des températures et précipitations (Annexe 6) pour 1995 et 1996, il en ressort qu'août et octobre 1995 sont caractérisés par de faibles précipitations et l'on sait, du fait des résultats présentés précédemment qu'il s'agit d'un paramètre influent à cette période. En outre, le commencement de la saison de végétation en 1996 est également caractérisé par des précipitations limitées. Les températures apparaissent plus élevées en janvier, août et octobre 1995.

ABSENCE DE VAISSEAUX « EN BANDE » AU SEIN D'UN CERNE

Sur la carotte BV_RON_01_A, plusieurs cernes présentaient une absence de vaisseaux marquée au sein du cerne sous forme de « bandes ». Ces zones désignées se marquent toujours en début de période de végétation. Quelques exemples de cernes qui montrent cette anomalie : 2003, 2004, 2005 et 2009. Les températures moyennes et les précipitations totales mensuelles pour ces années-là ainsi que pour 2008, année précédant 2009 pouvant peut-être exercer une influence, ont été reprises (Annexe 6).

En 2003 et 2004, on peut constater des précipitations très faibles à la fin de la saison hivernale, avec d'autres baisses notables en juin et septembre 2003. En 2005 et 2008, il n'y a pas de fortes diminutions des précipitations au cours de l'année, à l'exception de février 2008. Enfin, pour l'année 2009, une baisse n'est observée qu'à la fin de l'été (août et septembre).

En ce qui concerne les températures, elles demeurent généralement toutes au-dessus de la moyenne pour toutes les années considérées. Une augmentation prolongée des températures est remarquée pendant l'été 2003, de juin à août.

5. Discussion

Les statistiques descriptives obtenues pour l'EPS suggèrent qu'avec une chronologie construite à partir de l'ensemble des sites, il peut être confirmé que cet échantillon offre une représentation assez fidèle de la population de bouleaux verruqueux en Wallonie ($EPS = 0,84 < 0,85$ le seuil d'acceptabilité). Il faut toutefois rester alerte quant à la dépendance de l'EPS vis-à-vis de la taille de l'échantillon. Toutefois, l'EPS de la chronologie résiduelle construite avec les carottes ayant la meilleure interdatation valant 0,91, malgré le faible nombre d'échantillons, assurerait une bonne représentativité.

La moyenne des largeurs de cernes supérieure à Ronquières, en comparaison des autres peuplements, pourrait s'expliquer par le fait que ce peuplement est encore très jeune (Tableau

2), rappelons que le bouleau possède une croissance juvénile très rapide qui est d'autant plus améliorée lorsqu'il est favorisé^{41 4}. A ce sujet, le site de prélèvement de Ronquières se trouve dans le bois de la Houssière, site Natura2000 considéré comme SGIB (Site de Grand Intérêt Biologique) et est l'un des plus grands massifs forestiers au sein du Brabant sablo-limoneux¹²⁷. Ce bois est dominé par une hêtraie neutrophile atlantique à Jacinthe des bois (*Hyacinthoides non-scripta* (L.) Chouard ex Rothm., 1944), c'est-à-dire un sol assez riche avec de bonnes réserves en eau¹²⁸. Effectivement, le bois de la Houssière se voit pourvu de nombreuses sources et est traversé par de nombreux cours d'eau, ici pour le site de prélèvement, le ruisseau du point du jour¹²⁷.

5.1. Les facteurs climatiques influençant la croissance radiale

PRÉCIPITATIONS

Dans cette étude et pour la chronologie considérant l'ensemble des sites, les précipitations ont montré des influences majoritairement positives tout au long de l'année, à l'instar des résultats obtenus par Gradel et al.¹²⁹. Plus particulièrement, une augmentation des précipitations au cours de l'été et de l'automne précédent l'année de formation du cerne ont tendance à augmenter la croissance, les réserves en eau étant surtout constituées durant l'automne précédant l'année de formation du cerne. De la même manière, les précipitations en janvier favoriseraient la croissance, augmentant la réserve en eau utile du sol juste avant le début de la période de végétation. La présence d'eau constitue l'une des conditions essentielles pour assurer le bon fonctionnement des processus vitaux des plantes et des éléments, tels que l'absorption des nutriments du sol, la répartition des composés carbonés, les réactions métaboliques ou même les capacités structurelles et fonctionnelles des tissus qui dépendent directement du régime hydrique de la plante¹³¹.

TEMPÉRATURES

A contrario, les températures présentent majoritairement des corrélations négatives avec la croissance. Les relations significativement négatives mises en évidence concernent les températures estivales / automnales de l'année précédente. Ces résultats sont en contradiction avec ceux obtenus auparavant par Levanic & Eggertsson² démontrant une corrélation positive de la croissance avec l'augmentation des températures estivales en Islande. Ceci pouvant s'expliquer par la position continentale de cette étude, ayant des températures plus élevées et un climat plus sec que l'Islande. Toutefois se démarquent des incidences positives obtenues pour les températures concernant le début de la période de végétation (de février à mai) de l'année en cours. Pour la plupart des essences forestières, des températures plus élevées en début de saison de végétation sont favorables, accélérant les processus vitaux de l'arbre, si tant est que de l'eau soit bien disponible^{130 131}.

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus pour la chronologie résiduelle construite avec les sites ayant la meilleure interdatation ne montre pas de résultats foncièrement différents, excepté pour les corrélations saisonnières des températures de janvier à mai.

Ces observations suggèrent également la possibilité d'un compromis entre la reproduction et la croissance, processus déjà connu chez d'autres essences comme le hêtre¹³². L'année précédente se voyant soumise à un stress climatique plus prononcé, l'individu investirait son énergie dans la reproduction l'année suivante, au détriment de la croissance radiale, agissant ainsi comme un second effet de l'augmentation des températures

EFFET DES CARACTÉRISTIQUES STATIONNELLES

La question se pose alors, peut-on observer des tendances générales considérant les caractéristiques stationnelles communes à certains peuplements ? Les sites qui présentent un sol plutôt sec accompagné d'un drainage favorable voir excessif seraient attendus à voir leur croissance impactée plus sévèrement. Jurbise est effectivement assez impacté par la hausse des températures, et ce, tout au long de l'année précédente et en cours (Annexe 2 – c). Des précipitations plus importantes en automne favorisent la croissance radiale tandis qu'une baisse de ces dernières en février semble fortement impacter les largeurs de cernes. Daverdisse (Annexe 2 – b) qui possède également un sol plutôt sec, montre surtout des corrélations négatives avec les températures de l'année précédente. L'importance de la constitution de la réserve en eau en début de saison de végétation se confirme dans ce cas. Tandis que les hausses des températures peuvent accentuer la sécheresse déjà présente du site.

En dépit des caractéristiques stationnelles suggérant une faible propension à la sécheresse, Ronquières, Raeren et Bonlez (Annexe 2 – e, f, a) maintiennent des corrélations négatives avec les températures, surtout estivales, et ne possèdent pas de corrélations communes concernant les précipitations. Eupen, Vitrival et Stoumont (Annexe 2 - g, h, d), ayant des sols hydromorphes à régime hydrique alternatif, affichent une corrélation principalement positive entre les précipitations et la croissance, tandis que les corrélations avec les températures conservent généralement leur tendance négative pour l'été de l'année précédente.

ABSENCE DE VAISSEAUX

Les variations des caractéristiques de vaisseaux permettent de réguler la résistance hydraulique et donc de protéger les plantes contre d'éventuelles défaillances^{133 134}. Ainsi, la variation des caractéristiques anatomiques des vaisseaux, tels que leur taille, leur nombre ou leur disposition, est généralement le résultat d'événements marquants comme des inondations, des canicules et des sécheresses¹³⁵. Si l'on prend l'exemple des sécheresses, vient un moment où l'arbre n'est plus en capacité d'assurer le maintien d'un flux hydraulique continu et il y a rupture de la

colonne d'eau¹³⁰. Un phénomène qu'on appelle cavitation peut alors survenir, se traduisant par un blocage complet de la circulation dû à la présence de bulles d'air¹³⁶.

Ces anomalies, aussi appelées IADF (*Intra-Annual Density Fluctuations in tree rings*), ont déjà été rapportées de nombreuses fois pour le bouleau^{129 137 2 3}. Micco et al.¹³⁷ présentait d'ailleurs un cas d'IADF sur du bouleau pubescent provenant du permafrost Russe ayant été impacté par un déficit hydrique.

Les résultats présentés plus tôt pour la carotte de Ronquières concorde assez bien avec ces affirmations. L'année 2003 est connue pour sa sécheresse estivale, causant d'important taux de mortalité¹³⁸ et avait déjà eu une fin de saison hivernale avec de faibles précipitations, de même que 2004 et 2008. De plus, Ronquières étant un site riche et bien approvisionné en eau, les arbres ont pu être d'autant plus marqués qu'ils ne sont pas habitués à un déficit hydrique.

La carotte de Vitriaval présentant un cerne avec absence totale de vaisseaux est plus compliquée à mettre en lien avec les facteurs climatiques connus. De 1995 à 1996 le climat montrait des températures plus élevées accompagnées de précipitations limitées d'août 1995 à septembre 1996. Cependant cela n'explique pas l'absence totale de vaisseaux pour une année entière. Il s'agirait donc sûrement d'un faux cerne, bien que l'interdatation suggère le contraire. L'hypothèse serait que l'arbre s'étant vu très fortement impacté par la succession d'évènements peu favorables produisit précocement un faux cerne avant de reprendre sa croissance dès la présence de conditions plus favorables.

5.2. B. pendula, une essence résiliente

L'examen des années caractéristiques négatives a révélé certains signaux générateurs de plus grandes perturbations. Les températures élevées persistant sur une plus longue période durant l'année de croissance ne semblent pas constituer le signal prédominant. En effet, les années caractéristiques positives indiquent des températures tout aussi élevées, et ce, sur des périodes prolongées. Les précipitations démontrent en revanche une différence nette avec des mensualités extrêmement faibles pour les années caractéristiques négatives.

L'étude des années antérieures permet de mettre en évidence un trait climatique commun : de faibles précipitations fin de l'été / en automne et durant le printemps qui affectent d'autant plus les années caractéristiques négatives de par la faible réserve en eau utile en début de période de végétation. Néanmoins, le bouleau est connu pour s'ajuster efficacement aux modifications de son milieu de croissance¹³⁹ et cela se vérifie avec l'étude de sa résilience.

La résilience positive des peuplements indique que ceux-ci récupèrent, entièrement pour la plupart, à la suite des perturbations. De plus, aucun peuplement ne présente de perte de croissance supplémentaire à la suite de la perturbation. La période de stress passée, la croissance

reprend son cours, appuyant le propos de sa haute capacité d'adaptation. La résilience de l'arbre n'est pas uniquement à concevoir comme sa capacité à endurer la sécheresse, mais aussi comme sa capacité à se rétablir des dommages causés par le stress hydrique¹³⁰.

Les effets de stress se marquent surtout dans la résilience relative, résilience réévaluée en fonction de l'impact des perturbations. En raison de ces contraintes, tous les sites affichent une RR inférieure à 1, indiquant que même si la croissance se rétablit, les individus pourraient finalement avoir une capacité réduite à supporter les événements critiques dans le futur. Citons notamment la résilience relative très faible pour Ronquières, qui pourrait s'expliquer par le fait qu'il s'agisse d'individus assez jeunes en comparaison des autres. Effectivement, des recherches ont déjà pu démontrer que des individus plus jeunes se verraient plus fortement impactés par des températures au-dessus de la moyenne et de faibles précipitations au printemps^{129 140}. Pour autant, la résistance plus faible des autres sites pourrait indiquer un affaiblissement, sachant que le déclin de la croissance est associé au vieillissement¹⁴¹.

Une étude similaire fut conduite par Latte et al.⁷¹ en région wallonne sur le hêtre et le tilleul à petites feuilles (*Tilia cordata* Mill., 1768). Également connu pour être sensible à la sécheresse, le hêtre montre de grandes difficultés à se remettre des perturbations subies ($R_s = -1,05$) tandis que le tilleul fait preuve d'une grande capacité d'adaptation et de résilience ($R_s = 4,34$)⁷¹.

6. Conclusion

Sur base de deux lots d'échantillons, l'ensemble des sites et les échantillons ayant la meilleure interdatation, deux chronologies ont été étudiées. Ces dernières présentaient un EPS de respectivement 0,84 et 0,91 permettant d'assurer une assez bonne représentativité pour une population de bouleau considérée comme infinie.

Considérant les relations entre les largeurs de cerne et le climat, l'étude des années caractéristiques, l'approche succincte réalisée sur les éléments de vaisseaux et l'hétérogénéité des caractéristiques entre les sites, les précipitations sont le facteur climatique apparaissant comme le plus impactant sur la croissance radiale du bouleau verruqueux. Plus précisément, les résultats démontrent que la disponibilité en eau à la fin de l'été et au début de l'automne de l'année précédente est l'un des facteurs principaux expliquant la variabilité entre les largeurs de cerne. L'élévation des températures pendant la saison estivale et en automne affectent également la croissance radiale par accentuation d'une sécheresse souvent déjà marquée.

En outre, l'analyse des années caractéristiques négatives a révélé un schéma récurrent de perturbation: des précipitations faibles au début du printemps, en été et en automne de l'année précédente associées à des températures élevées, suivies de nouvelles périodes de précipitations réduites au cours de l'année de formation du cerne.

L'étude de la résilience et de ses composantes est assez nuancée. D'un côté, les arbres démontrent une capacité certaine à se remettre d'évènements extrêmes au niveau de leur croissance radiale. Néanmoins, leur résilience relative, tenant compte des impacts de la perturbation, est affectée. Dès lors, cela ne permet pas d'assurer une tolérance sur le long terme.

Le bouleau une essence d'avenir ? Bien qu'il présente des sensibilités vis-à-vis de certains facteurs climatiques, ses potentialités de résilience sont engageantes. D'autant plus avec la promesse d'une gestion adéquate, tenant compte de ses exigences et faiblesses.

7. Références

1. IPCC, Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6). AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC (2023), (consulté le 13/09/2023).
2. Levanič, T. & Eggertsson, O. Climatic effects on birch (*Betula pubescens* Ehrh.) growth in Fnjoskadalur valley, northern Iceland. *Dendrochronologia* **25**, 135–143 (2008).
3. Matisons, R. et al. Silver birch shows nonlinear responses to moisture availability and temperature in the eastern Baltic Sea region. *Dendrochronologia* **76**, 126003 (2022).
4. Dubois Héloïse, Le bouleau (*Betula pendula* Roth et *B. pubescens* Ehrh.), essence d’avenir en Europe occidentale ? Thèse de doctorat, Gembloux Agro-Bio Tech – Université de Liège, Gembloux, 178 p (2022).
5. FAO. La Situation des forêts du monde 2022. *Des solutions forestières pour une relance verte et des économies inclusives, résilientes et durables*. Rome, FAO. 180p. (2022)
6. Teshome, D., Zharare, G. & Naidoo, S. The Threat of the Combined Effect of Biotic and Abiotic Stress Factors in Forestry Under a Changing Climate. *Front. Plant Sci* **11**, 601009 (2020).
7. IRM, Rapport climatique 2020 de l’information aux services climatiques. RapportClimatiqueBref-2020.pdf (meteo.be) (2020), (consulté le 13/09/2023).
8. Spinoni, J., Vogt, J. V., Naumann, G., Barbosa, P. & Dosio, A. Will drought events become more frequent and severe in Europe? *Int J Climatol* **38**, 1718–1736 (2018).
9. Wang, B. et al. An Earlier Spring Phenology Reduces Vegetation Growth Rate during the Green-Up Period in Temperate Forests. *Forests* **14**, 1984 (2023).
10. Manion, P. D. *Tree disease concepts*. (Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1981).
11. Bossel, H. Dynamics of forest dieback: Systems analysis and simulation. *Ecol. Model.* **34**, 259–288 (1986).
12. Mueller-Dombois, D. Natural Dieback in Forests. *Bioscience* **37**, (1987).
13. McDowell, N. et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytol.* **178**, 719–739 (2008).
14. Allen, C. et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manag.* **259**, 660–684 (2010).
15. Anderegg, W. R. L. et al. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science* **368**, eaaz7005 (2020).
16. van der Woude, A. M. et al. Temperature extremes of 2022 reduced carbon uptake by forests in Europe. *Nat Commun* **14**, 6218 (2023).
17. Landmann, G. Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. *Revue Forestière Française* **46**, 405–415 (1994).
18. Bussotti, F. Functional leaf traits, plant communities and acclimation processes in relation to oxidative stress in trees: a critical overview. *Global Change Biology* **14**, 2727–2739 (2008).
19. Lauteri, M. et al. Genetic variation in carbon isotope discrimination in six European populations of *Castanea sativa* Mill. originating from contrasting localities. *J. Evol. Biol* **17**, 1286–1296 (2004).

20. Bresson, C. C., Vitasse, Y., Kremer, A. & Delzon, S. To what extent is altitudinal variation of functional traits driven by genetic adaptation in European oak and beech? *Tree Physiol* **31**, 1164–1174 (2011).
21. Bräutigam, K. *et al.* Epigenetic regulation of adaptive responses of forest tree species to the environment. *Ecol Evol* **3**, 399–415 (2013).
22. Bussotti, F., Pollastrini, M., Holland, V. & Brüggemann, W. Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environ Exp Bot* **111**, 91–113 (2015).
23. Ghannoum, O. & Way, D. A. On the role of ecological adaptation and geographic distribution in the response of trees to climate change. *Tree Physiol* **31**, 1273–1276 (2011).
24. Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T. & Curtis-McLane, S. Adaptation, migration or extirpation : climate change outcomes for tree populations. *Evol Appl* **1**, 95–111 (2008).
25. Wolf, S. & Paul-Limoges, E. Drought and heat reduce forest carbon uptake. *Nat Commun* **14**, 6217 (2023).
26. Messier, C. *et al.* The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *For. Ecosyst* **6**, 21 (2019).
27. OEWB, Panorabois Wallonie edition 2021. filiereboiswallonie.be/sites/default/files/media-documents/OEWB-PanoraBois_2021_0.pdf (2021), (consulté le 04/09/2023).
28. Claessens, H., Claessens, L., Longrée, C., Nivelles, L., Tahir, B., Lisein, J., Lecomte, H. Près de 20 ans après sa grave crise sanitaire, où en est la hêtraie ardennaise. *For. Nat.* **142**, 30-36 (2017).
29. Saintonge, F.-X., Gillette, M., Blaser, S., Queloz, V. & Leroy, Q. Situation et gestion de la crise liée aux scolytes de l'Épicéa commun fin 2021 dans l'est de la France, en Suisse et en Wallonie. *Revue forestière française* **73**, 619–641 (2022).
30. Sénécal, S. *et al.* La crise des scolytes (*Ips typographus*) ravageurs de l'Épicéa commun (*Picea abies*) vue de l'intérieur. Retours sur une enquête qualitative auprès d'acteurs du nord-est de la France et sa zone transfrontalière (Allemagne, Belgique) réalisée fin 2019 – début 2020. *Revue forestière française* **72**, 425–441 (2020).
31. Denman, S., Brown, N., Kirk, S., Jeger, M. & Webber, J. A description of the symptoms of Acute Oak Decline in Britain and a comparative review on causes of similar disorders on oak in Europe. *Forestry* **87**, 535–551 (2014).
32. Schumacher, J. The general situation regarding ash dieback in Germany and investigations concerning the invasion and distribution strategies of *Chalara fraxinea* in woody tissue1. *EPPO Bulletin* **41**, 7–10 (2011).
33. Vejpkustková, M. & Cihak, T. Climate Response of Douglas Fir Reveals Recently Increased Sensitivity to Drought Stress in Central Europe. *Forests* **10**, 97 (2019).
34. Schmitz, S., Charlier, A., Delahaye, L. & Chandelier, A. La santé des jeunes plantations de douglas en Wallonie : un état des lieux. *Forêt.Nature* **138**, (2016).

35. Wilson, E., San Martin, G. & Ligot, G. The Douglas fir needle midge (*Contarinia pseudotsugae*) A potential threat to Douglas fir in the United Kingdom and Ireland? *QJF* **114**, (2020).
36. Gilles, A., Lisein, J., Latte, N., Lejeune, P., Claessens, H. Est-ce la fin de la crise des scolytes ? Suivi du phénomène par télédétection. *Silva Belgica* **3**, 24-33 (2023).
37. Lebourgeois, F., Lorentz, S., Cousseau, G. & Fenaux, L. Effet de la chalarose (*Hymenoscyphus fraxineus*) sur la croissance radiale du frêne et sur son déterminisme climatique dans le nord de la France. *Revue forestière française* **71**, 225–248 (2019).
38. FAO, Rapport d'évaluation des ressources forestières mondiales - Belgique - 2021. Évaluation des ressources forestières mondiales (FRA) 2020 Belgique - Rapport (fao.org) (2020), (consulté le 04/09/2023).
39. Petit, S. *et al.* Fichier écologique des essences. *Forêt.Nature*, UCLouvain-ELIe, ULiège-GxABT, SPWARNE-DNF (2017).
40. Prévosto, B., Coquillard, P. & Gueugnot, J. Growth models of silver birch (*Betula pendula* Roth.) on two volcanic mountains in the French Massif Central. *Plant Ecol.* **144**, 231–242 (1999).
41. Hynynen, J. *et al.* Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in northern Europe. *Forestry* **83**, 103–119 (2010).
42. Dumé, G., Gauberville, C., Mansion, D. & Rameau, J.-C. *Flore forestière française Guide écologique illustré - I. Plaines et collines (Nouvelle édition)*. (CNPFF-IDF, 2018).
43. Beck, P., Caudullo, G., de Rigo, D., Tinner, W. *Betula pendula*, *Betula pubescens* and other birches in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, 70-73 (2016).
44. Dubois, H., Latte, N., Lecomte, H. & Claessens, H. Le bouleau, une essence qui s'impose : Description de la ressource dans son aire de distribution. *Forêt.Nature* **140**, 44–58 (2016).
45. Augustaitis, A. *et al.* Tree-ring formation as an indicator of forest capacity to adapt to the main threats of environmental changes in Lithuania. *Sci. Total Environ.* **615**, 1247–1261 (2018).
46. Possen, B. J. H. M. *et al.* Adaptability of birch (*Betula pendula* Roth) and aspen (*Populus tremula* L.) genotypes to different soil moisture conditions. *For. Ecol. Manag* **262**, 1387–1399 (2011).
47. Schmitt, U., Jalkanen, R. & Eckstein, D. Cambium dynamics of *Pinus sylvestris* and *Betula* spp. in the northern boreal forest in Finland. *Silva Fenn.* **38**, (2004).
48. Hytönen, J., Saramäki, J. & Niemistö, P. Growth, stem quality and nutritional status of *Betula pendula* and *Betula pubescens* in pure stands and mixtures. *Scand. J. For. Res* **29**, 1–11 (2014).
49. Heräjärvi, H. Technical properties of mature birch (*Betula pendula* and *B. pubescens*) for saw milling in Finland. *Silva Fenn.* **35**, (2001).

50. Hasegawa, M., Stevanovic, T. & Achim, A. Relationship between ethanolic extracts of yellow birch and tree characteristics. *Industrial Crops and Products* **94**, 1–8 (2016).
51. Cameron, A. D., Dunham, R. A. & Petty, J. A. The effects of heavy thinning on stem quality and timber properties of silver birch (*Betula pendula* Roth). *Forestry* **68**, 275–286 (1995).
52. Luostarinen, K. & Verkasalo, E. Birch As Sawn Timber and in Mechanical Further Processing in Finland. A Literature Study. *Silva Fenn. Monographs* 40 p. (2000).
53. Brzeziecki, B. & Kienast, F. Classifying the life-history strategies of trees on the basis of the Grimian model. *For. Ecol. Manag* **69**, 167–187 (1994).
54. Wagenführ, R. and Scheiber, C.: *Holzatlas. The wood atlas - 2nd revised edition*, 720 p. (VEB Fachbuchverlag. Cloth DM – 1985).
55. Boedts, M. Effet du Traitement Thermique sur les Propriétés PhysicoMécaniques et la Durabilité du Bois de Bouleau. Master's Thesis, Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, Gembloux, Belgium, 74p. (2016).
56. Greenwood, S., Ruiz-Benito, P., Martinez-Vilalta, J., Lloret, F., Kitzberger, T., Allen, C.D., Fensham, R., Laughlin, D.C., Kattge, J., Bönisch, G., Kraft, N.J.B., Jump, A.S. Tree mortality across biomes is promoted by drought intensity, lower wood density and higher specific leaf area. *Ecol. Lett* **20**, 539–553 (2017).
57. Possen, B. J. H. M. *et al.* Within-stand variation in silver birch (*Betula pendula* Roth) phenology. *Trees* **28**, 1801–1812 (2014).
58. Verger, A., Frederic, B., Weiss, M., Filella, I. & Penuelas, J. Global trends in vegetation phenology from 32-year GEOV1 leaf area index time series. *Geophys* **15**, 11082 (2013).
59. Viherä-Aarnio, A. Effects of seed origin latitude on the timing of height growth cessation and field performance of silver birch. *Diss. For.* **2009**, (2009).
60. Ranta, H. *et al.* Male flowering of birch: Spatial synchronization, year-to-year variation and relation of catkin numbers and airborne pollen counts. *For. Ecol. Manag* **255**, 643–650 (2008).
61. Sofiev, M., Siljamo, P., Ranta, H. & Rantio-Lehtimäki, A. Towards numerical forecasting of long-range air transport of birch pollen: theoretical considerations and a feasibility study. *Int J Biometeorol* **50**, 392–402 (2006).
62. Hjelmroos, M. Evidence of long-distance transport of *betula* pollen. *Grana* **30**, 215–228 (1991).
63. Lebourgeois, F. & Mérian, P.. *PRINCIPES ET MÉTHODES DE LA DENDROCHRONOLOGIE*. (AgroParisTech, 2012).
64. Fritts, H. C. *Tree Rings and Climate - 1st Edition*. (University of Arizona, 1976).
65. Filippo, A. D. *et al.* Bioclimatology of Beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: Spatial and Altitudinal Climatic Signals Identified through a Tree-Ring Network. *J. Biogeogr* **34**, 1873–1892 (2007).
66. Cook, E. R. A time series analysis approach to tree ring standardization (Dendrochronology, Forestry Dendroclimatology, Autoregressive process). Thèse de doctorat, Univeristy of Arizona, 190p (1985).

67. Becker, M., Landmann, G. & Lévy, G. Silver fir decline in the vosges mountains (France): Role of climate and silviculture. *Water Air Soil Pollut* **48**, 77–86 (1989).
68. SPW. Fiche descriptive – Carte bioclimatique Wallonie (BIOCLIM). Carte bioclimatique de Wallonie (BIOCLIM) | Géoportail de la Wallonie (2015), (consulté le 13/09/2023).
69. Mérian, P. & Lebourgeois, F. Consequences of decreasing the number of cored trees per plot on chronology statistics and climate-growth relationships: A multispecies analysis in a temperate climate. *Can. J. For. Res* **41**, 2413–2422 (2011).
70. Mérian, P., Pierrat, J.-C. & Lebourgeois, F. Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia* **31**, 58–67 (2013).
71. Latte, N., Taverniers, P., de Jaegere, T. & Claessens, H. Dendroecological assessment of climate resilience of the rare and scattered forest tree species *Tilia cordata* Mill. in northwestern Europe. *Forestry* **93**, 675–684 (2020).
72. Lundgren, L. N. Development of a new chemical method for distinguishing between *Betula pendula* and *Betula pubescens* in Sweden. *Can. J. For. Res* **25**, (1995).
73. Maurent Kelly, Synthèse de composés phénoliques de type diarylheptanoïde : évaluation de leurs propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 241p (2017).
74. Atkinson, M., Jervis, A. & Sangha, R. Discrimination between *Betula pendula*, *B. pubescens* and their hybrids using near infrared reflectance spectroscopy. *Can. J. For. Res* **27**, 1896–1900 (1997).
75. Gill, J. A. & Davy, A. J. Variation and Polyploidy Within Lowland Populations of the *Betula Pendula/B. Pubescens* Complex. *New Phytol* **94**, 433–451 (1983).
76. Nicholas J. Brazee. Target Canker of Hardwoods. *Center for Agriculture, Food, and the Environment* <https://ag.umass.edu/landscape/fact-sheets/target-canker-of-hardwoods> (2015) – (Consulté le 08/11/2023).
77. Gärtner, H. & Nievergelt, D. The core-microtome: A new tool for surface preparation on cores and time series analysis of varying cell parameters. *Dendrochronologia* **28**, 85–92 (2010).
78. Schneider, C. A., Rasband, W. S. & Eliceiri, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods* **9**, 671–675 (2012).
79. Schindelin, J. *et al.* Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* **9**, 676–682 (2012).
80. Van den Bulcke, J. *et al.* 3D tree-ring analysis using helical X-ray tomography. *Dendrochronologia* **32**, 39–46 (2014).
81. De Mil, T., Vannoppen, A., Beeckman, H., Van Acker, J. & Van den Bulcke, J. A field-to-desktop toolchain for X-ray CT densitometry enables tree ring analysis. *Annals of Botany* **117**, 1187–1196 (2016).
82. Van den Bulcke, J. *et al.* Advanced X-ray CT scanning can boost tree ring research for earth system sciences. *Annals of Botany* **124**, 837–847 (2019).

83. De Mil, T. & Van den Bulcke, J. Tree Core Analysis with X-ray Computed Tomography. *J. Vis. Exp* e65208 (2023).
84. Latte, N., Debruxelles, J., Sohier, C., Degré, A. & Claessens, H. La dendroécologie : un outil pour affiner nos connaissances sur l’autoécologie des essences forestières. *Forêt Wallone* **116**, 3–17 (2012).
85. Holmes, R. L. COMPUTER -ASSISTED QUALITY CONTROL IN TREE -RING DATING AND MEASUREMENT. *Tree Ring Bulletin* **43**, 69–78 (1983).
86. Martínez-Sancho, E. *et al.* The GenTree Dendroecological Collection, tree-ring and wood density data from seven tree species across Europe. *Sci Data* **7**, 1 (2020).
87. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing - version 4.3.2., Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. (2021).
88. Bunn, A. G. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* **26**, 115–124 (2008).
89. Bunn, A. G. Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia* **28**, 251–258 (2010).
90. Bunn, Andrew G., Mikko Korpela, Franco Biondi, Filipe Campelo, Pierre Mérian, Fares Qeadan and Christian Zang. “Dendrochronology Program Library in R [R package dplR version 1.7.1].” (2020).
91. Wickham, H., Vaughan, D., Girlich, M. tidy: Tidy Messy Data. R package version 1.3.0 (2023).
92. Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., Vaughan, D. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4 (2023).
93. Wickham, H., ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. R package 3.4.4. (2016).
94. Wickham, H., Bryan, J. readxl: Read Excel Files. R package 1.4.3. (2023).
95. Cook, E. R. & Kenneth, P. Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *Environmental Science* **7**,3, (1981).
96. Cook, E. R. & Kairiukstis, L. A. *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences. International Institute for Applied Systems Analysis.* (Scientific Research Publishing, 1990).
97. Mosteller, F. *Data analysis and regression : a second course in statistics.* (Reading, Mass. : Addison-Wesley Pub. Co., 1977).
98. Carrer, M., Castagneri, D., Prendin, A. L., Petit, G. & von Arx, G. Retrospective Analysis of Wood Anatomical Traits Reveals a Recent Extension in Tree Cambial Activity in Two High-Elevation Conifers. *Front. Plant Sci* **8**, (2017).
99. Cook, E. R. The Decomposition of Tree-Ring Series for Environmental Studies. **47**, 37–59 (1987).
100. Wigley, T. M. L., Briffa, K. R. & Jones, P. D. On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *JAMC* **23**, 201–213 (1984).

101. Buras, A., Zang, C. & Menzel, A. Testing the stability of transfer functions. *Dendrochronologia* **42**, 56–62 (2017).
102. Mérian, P., Pierrat, J.-C. & Lebourgeois, F. Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate–growth relationships estimation. *Dendrochronologia* **31**, 58–67 (2013).
103. Biondi, F. & Qeadan, F. Inequality in Paleorecords. *Ecology* **89**, 1056–1067 (2008).
104. Douglass, A. E. Evidence of Climatic Effects in the Annual Rings of Trees. *Ecology* **1**, 24–32 (1920).
105. Strackee, J. & Jansma, E. The statistical properties of mean sensitivity - a reappraisal. *Dendrochronologia* **10**, 121–135 (1992).
106. Bunn, A. G., Jansma, E., Korpela, M., Westfall, R. D. & Baldwin, J. Using simulations and data to evaluate mean sensitivity (ζ) as a useful statistic in dendrochronology. *Dendrochronologia* **31**, 250–254 (2013).
107. Munaut, A. V. La dendrochronologie. *Quaternaire* **1**, 2, 65-74 (1979).
108. Schulman E. Dendroclimatic Changes in Semiarid America. - University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 142p. (1956).
109. Ricker, M., Gutierrez-Garcia, G., Juárez-Guerrero, D. & Evans, M. Statistical age determination of tree rings. *PLoS ONE* **15**, (2020).
110. Zang, C. & Biondi, F. treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography* **38**, 431–436 (2015).
111. Biondi, F. & Waikul, K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* **30**, 303–311 (2004).
112. Biondi, F. Evolutionary and moving response functions in dendroclimatology. *Dendrochronologia* **15**, 139–150 (1997).
113. Politis, D. N. & Romano, J. P. The Stationary Bootstrap. *J Am Stat Assoc* **89**, 1303–1313 (1994).
114. Politis, D. N. & White, H. Automatic Block-Length Selection for the Dependent Bootstrap. *Econometric Reviews* **23**, 53–70 (2004).
115. Dixon, P. The Bootstrap and the Jackknife: Describing the Precision of Ecological Indices. in *Design and Analysis of Ecological Experiments* 267–288 (2001).
116. Percival, D. B. & Constantine, W. L. B. Exact simulation of Gaussian Time Series from Nonparametric Spectral Estimates with Application to Bootstrapping. *Stat Comput* **16**, 25–35 (2006).
117. Matisons, R., Elferts, D. & Brūmelis, G. Pointer years in tree-ring width and earlywood-vessel area time series of *Quercus robur*—Relation with climate factors near its northern distribution limit. *Dendrochronologia* **31**, 129–139 (2013).
118. Buras, A., Ovenden, T., Rammig, A. & Zang, C. S. Refining the standardized growth change method for pointer year detection: Accounting for statistical bias and estimating the deflection period. *Dendrochronologia* **74**, 125964 (2022).

119. Buras, A., Rammig, A. & Zang, C. S. A novel approach for the identification of pointer years. *Dendrochronologia* **63**, 125746 (2020).
120. Ligges, U. Crawley MJ (2007) The R Book. *Stat Papers* **50**, 445–446 (2009).
121. Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C. & Walker, B. Catastrophic shifts in ecosystems. *nat* **413**, 591 (2001).
122. Folke, C. *et al.* Regime Shifts, Resilience and Biodiversity in Ecosystem Management. *Annu Rev Ecol Evol Syst* **35**, 557–581 (2004).
123. Lloret, F., Keeling, E. G. & Sala, A. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* **120**, 1909–1920 (2011).
124. Van Der Maaten-Theunissen, M., Van Der Maaten, E. & Bouriaud, O. pointRes: An R package to analyze pointer years and components of resilience. *Dendrochronologia* **35**, 34–38 (2015).
125. Thurm, E. A., Uhl, E. & Pretzsch, H. Mixture reduces climate sensitivity of Douglas-fir stem growth. *For. Ecol. Manag* **376**, 205–220 (2016).
126. van der Maaten-Theunissen, M. *et al.* pointRes 2.0: New functions to describe tree resilience. *Dendrochronologia* **70**, 125899 (2021).
127. SPW, BE32007 – Bois de la Houssière. <http://biodiversite.wallonie.be/fr/be32007-bois-de-la-houssiere.html?IDD=402653875&IDC=2892> (2014), (consulté le 31/12/2023).
128. Bensettiti, F., Rameau, J.-C., Chevallier, H., *Cahiers d'habitats Natura 2000. Connaissances et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 1 – Habitats forestiers.* MATE/MAP/MNHN. Éd. La Documentation française, Paris, 339p (2001)
129. Gradel, A. *et al.* Response of white birch (*Betula platyphylla* Sukaczew) to temperature and precipitation in the mountain forest steppe and taiga of northern Mongolia. *Dendrochronologia* **41**, 24–33 (2017).
130. Arend, M. *et al.* Écophysiologie : les réactions des arbres forestiers aux changements climatiques. in 79–95 (Birmensdorf; Haupt, 2016).
131. Latte, N., Lebourgeois, F. & Claessens, H. Increased tree-growth synchronization of beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. *Dendrochronologia* **33**, 69–77 (2015).
132. Hacket-Pain, A. J. *et al.* Climatically controlled reproduction drives interannual growth variability in a temperate tree species. *Ecol. Lett* **21**, 1833–1844 (2018).
133. Fonti, P. & Jansen, S. Xylem plasticity in response to climate. *New Phytol* **195**, 734–736 (2012).
134. Beeckman, H. Wood anatomy and trait-based ecology. *IAWA J.* **37**, 127–151 (2016).
135. Bräuning, A. *et al.* TREE-RING FEATURES: INDICATORS OF EXTREME EVENT IMPACTS. *IAWA Journal* **37**, 206–231 (2016).
136. Cochard, H., Bréda, N., Granier, A. & Aussenac, G. Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q. pubescens* Willd, *Q. robur* L). *Ann. For. Sci.* **49**, 225–233 (1992).

137. De Micco, V. *et al.* INTRA-ANNUAL DENSITY FLUCTUATIONS IN TREE RINGS: HOW, WHEN, WHERE, AND WHY? *IAWA J* **37**, 232–259 (2016).
138. Braun, S., Remund, J. & Rihm, B. Indikatoren zur Schätzung des Trockenheitsrisikos in Buchen- und Fichtenwäldern. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **166**, 361–371 (2015).
139. Ostonen, I., Lohmus, K., Helmisaari, H.-S., Truu, J. & Meel, S. Fine root morphological adaptations in Scots pine, Norway spruce and silver birch along a latitudinal gradient in boreal forests. *Tree Physiol* **27**, 1627–1634 (2007).
140. Binod Dawadi, Liang, E., Tian, L., Devkota, L. P. & Yao, T. Pre-monsoon precipitation signal in tree rings of timberline *Betula utilis* in the central Himalayas - ScienceDirect. *Quaternary International* **283**, 72–77 (2013).
141. Ryan, M., Binkley, D., Fownes, J. & Fitter, M. B. a. A. H. Age-Related Decline in Forest Productivity: Pattern and Process. in *Advances in Ecological Research* vol. 27 214–252 (1997).
142. Dubois, H., Layon, J., Claessens, H., Sylviculture du bouleau, l'essence montante de l'Europe occidentale. Éd. Forêt.Nature, Belgique, 144p. (2023).

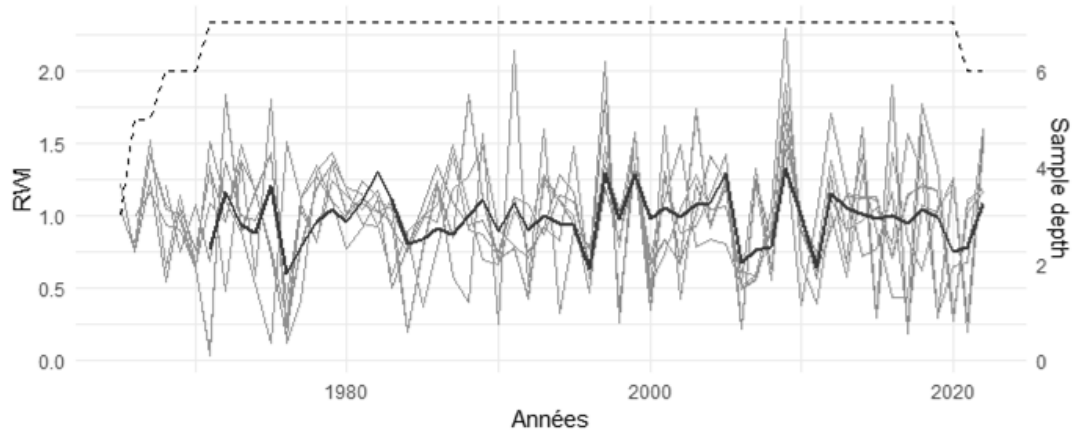
8. Annexes

Annexe 0 – Liste des abréviations

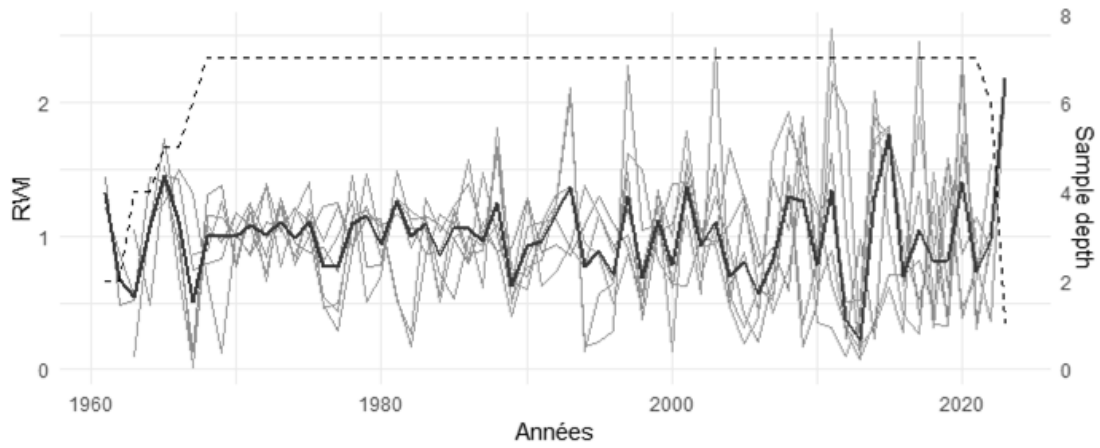
Abréviation	Signification
2,4-DNPH	2,4 dinitrophenylhydrazine
AC1	Coefficient d'autocorrélation d'ordre 1
BSGC	<i>Bias-adjusted Standardized Growth Change method</i>
CEM	<i>Circulant Embedding Method</i>
DBH	<i>Diameter Breast Height</i>
DNF	Département de la Nature et des Forêts
EPS	<i>Expressed Population Signal</i>
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPS RTK	<i>Real-Time Kinematic positioning GPS</i>
IADF	<i>Intra-Annual Density Fluctuation in tree rings</i>
IC	Indice de Cerne
IPPC	<i>International Plant Protection Convention</i>
IRM	Institut Royal Météorologique
Microtome WSL	Microtome à carottes provenant du <i>Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research</i>
MS	<i>Mean Sensitivity</i>
PS	Série simplement standardisée
Rc	Récupération
RRs	Résilience relative
Rs	Résilience
Rt	Résistance
RWI	<i>Ring Width Index</i>
SD	<i>Standart Deviation</i>
SGC	<i>Standardized Growth Change method</i>
SGIB	Site de Grand Intérêt Biologique
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i>
SPW	Service Public de Wallonie
SR	Coefficient d'interdatation
SS	Série doublement standardisée

Annexe 1 – Graphes des chronologies individuelles et maitresse des séries standardisées pour chaque peuplement.

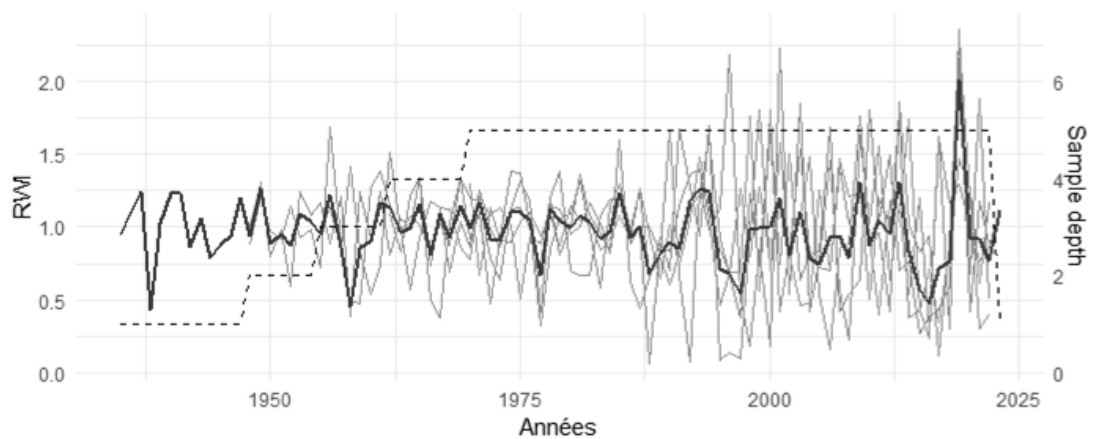
(a) Bonlez



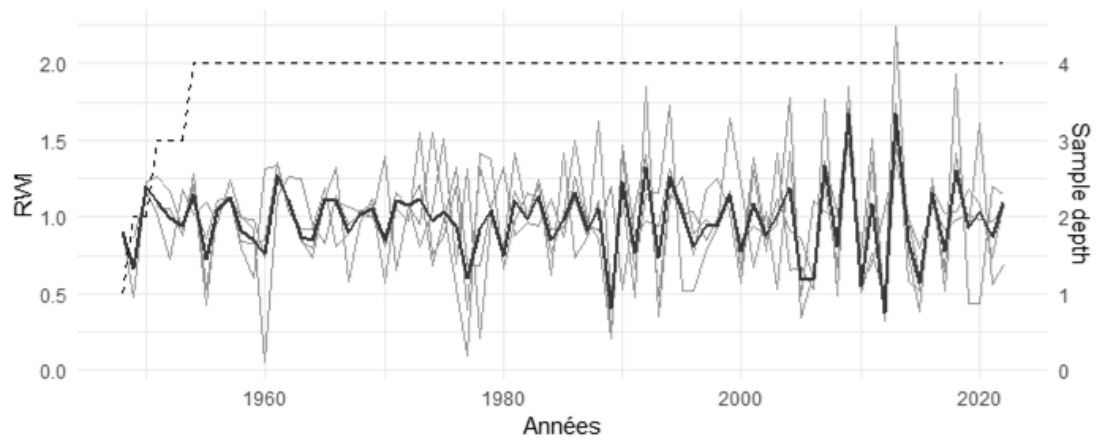
(b) Daverdisse



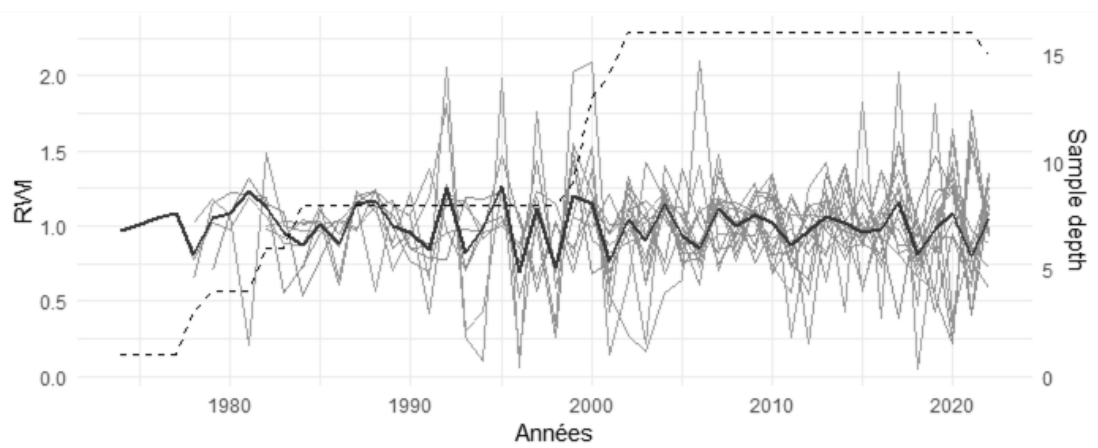
(c) Jurbise



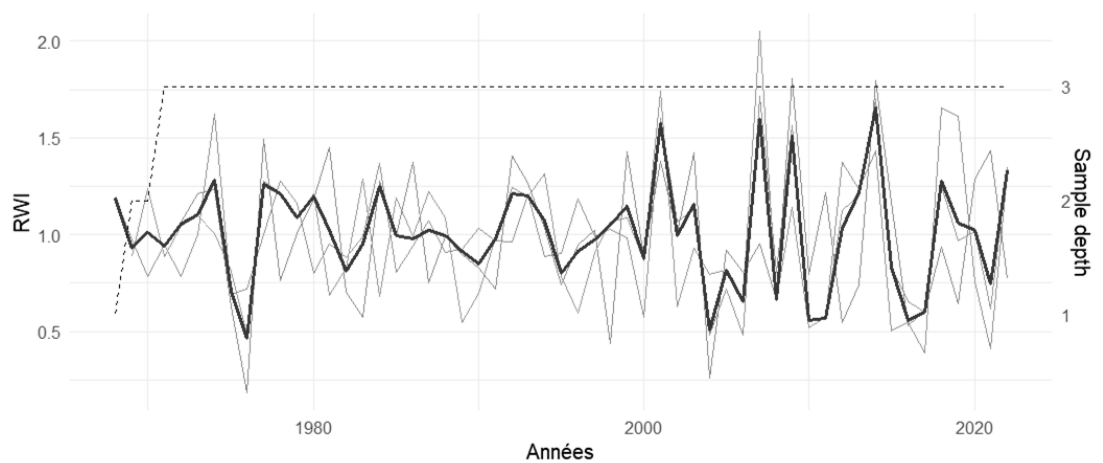
(d) Stoumont



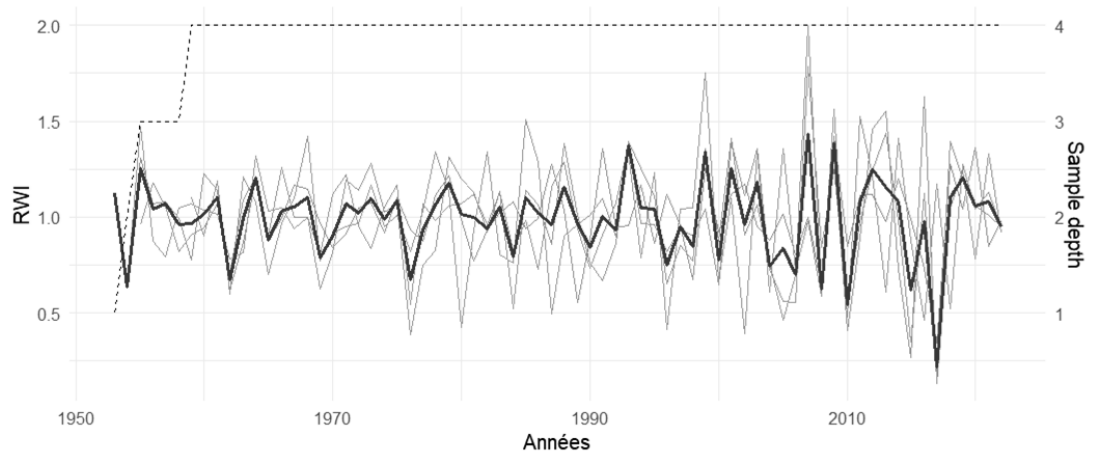
(e) Ronquières



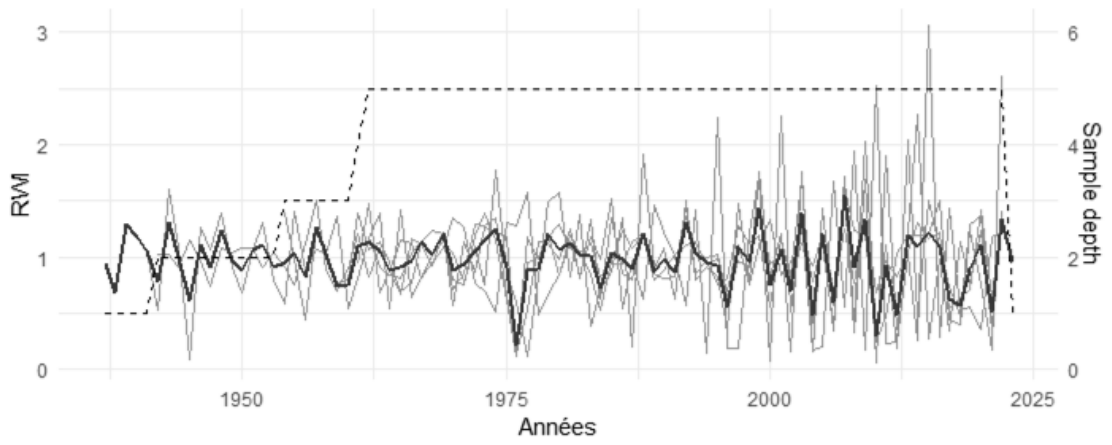
(f) Raeren



(g) Eupen

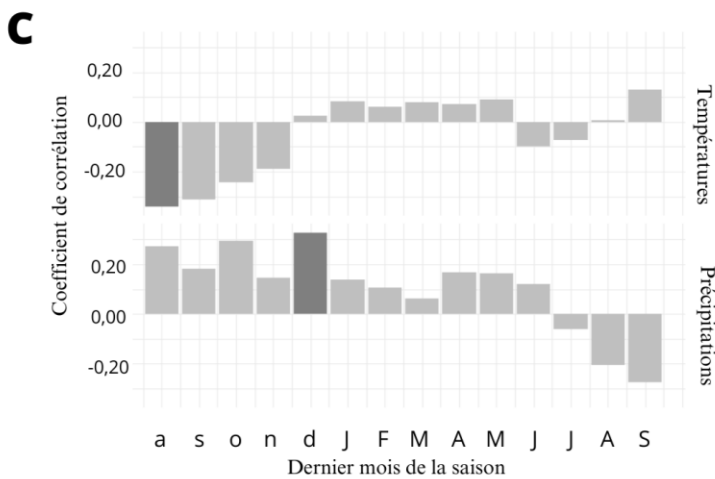
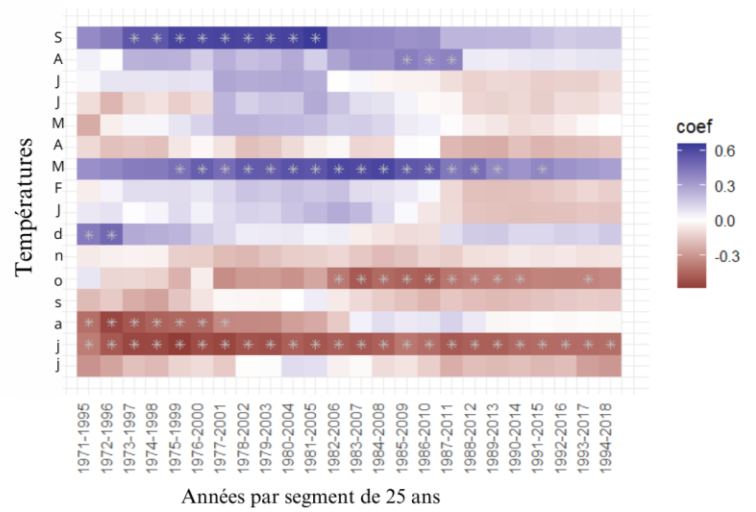
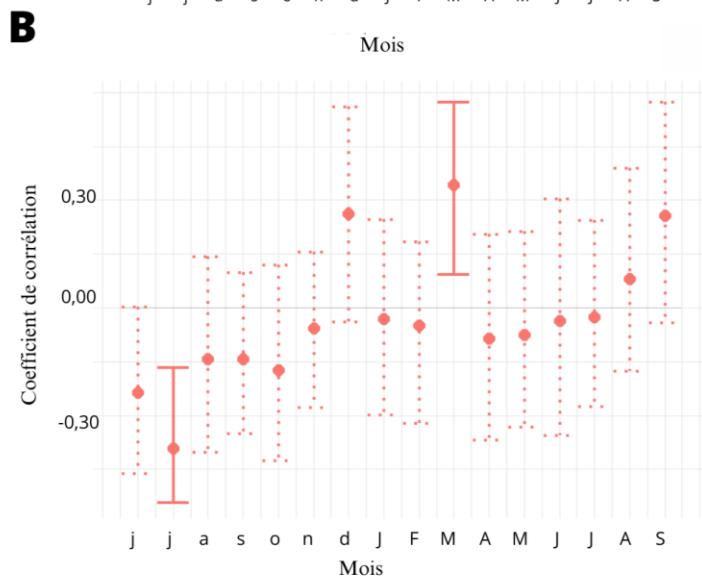
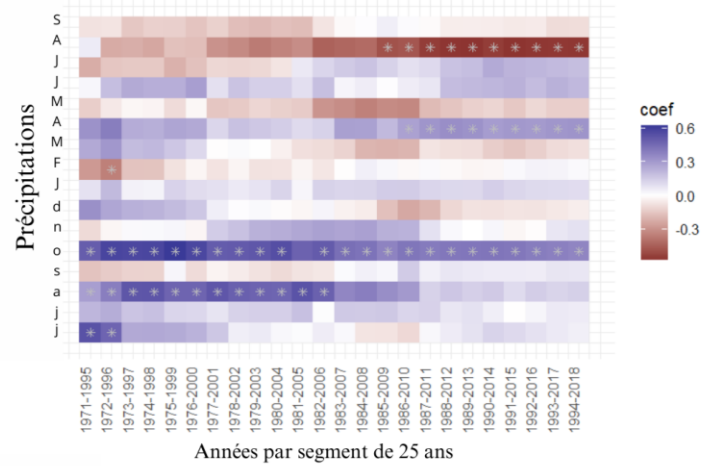
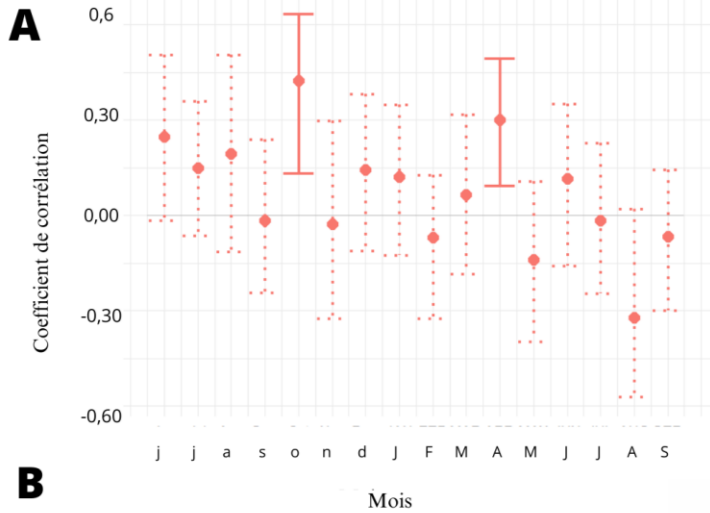


(h) Vitrival

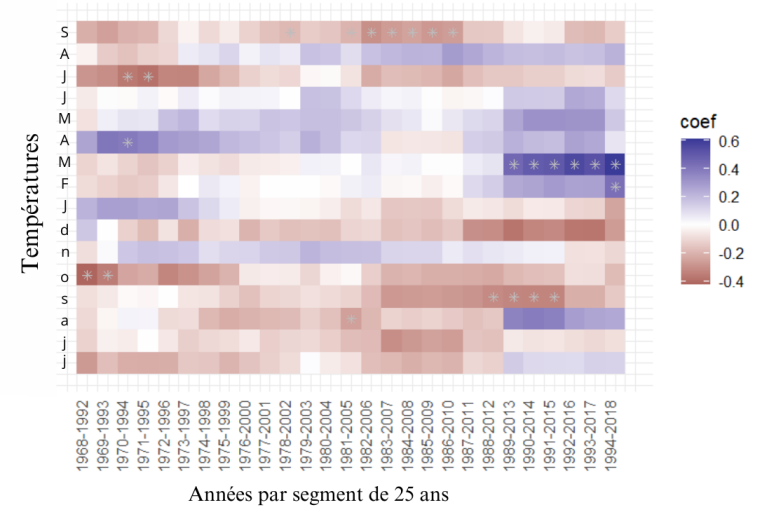
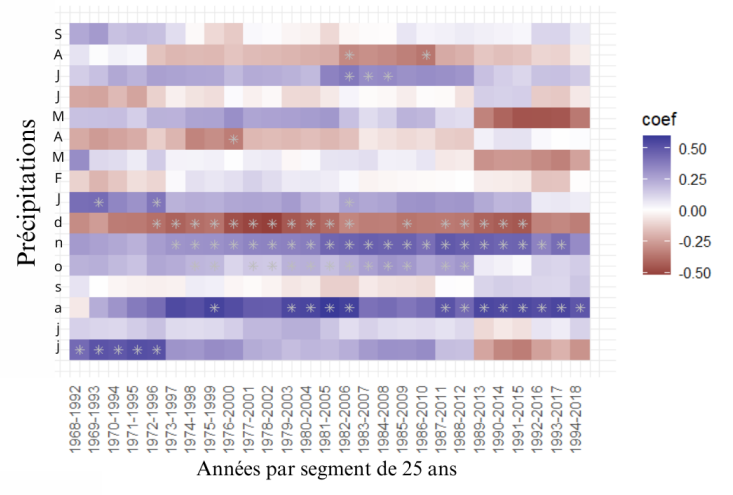
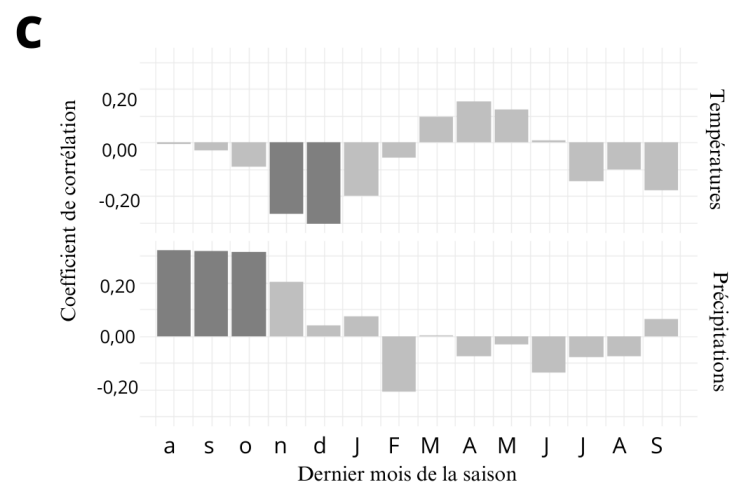
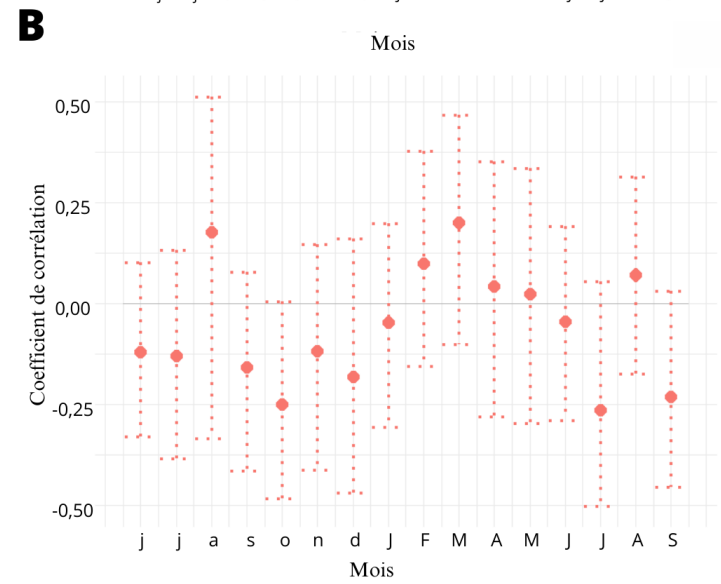
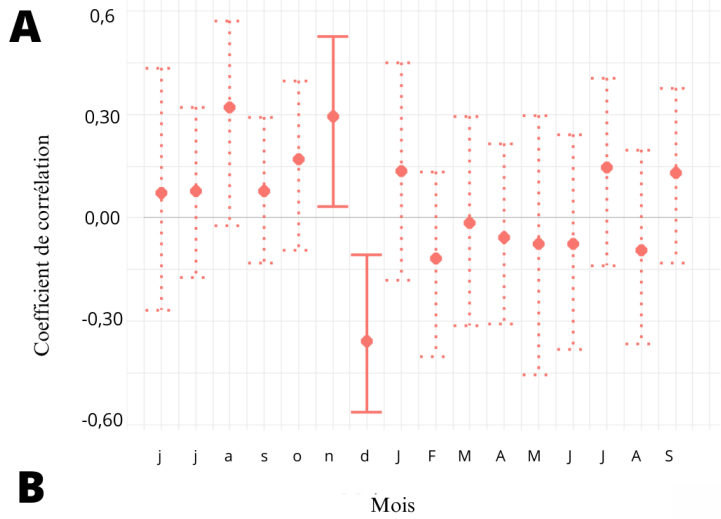


Annexe 2 – Graphes pour l’analyse croissance-climat à l’échelle individuelle pour chaque site étudié. Coefficients de corrélation obtenus avec les fonctions static et moving pour les précipitations (A) et les températures (B) ainsi que les corrélations saisonnières (C).

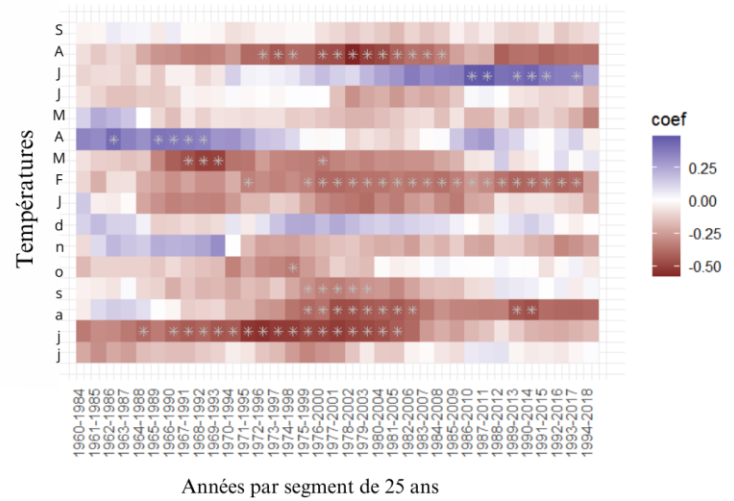
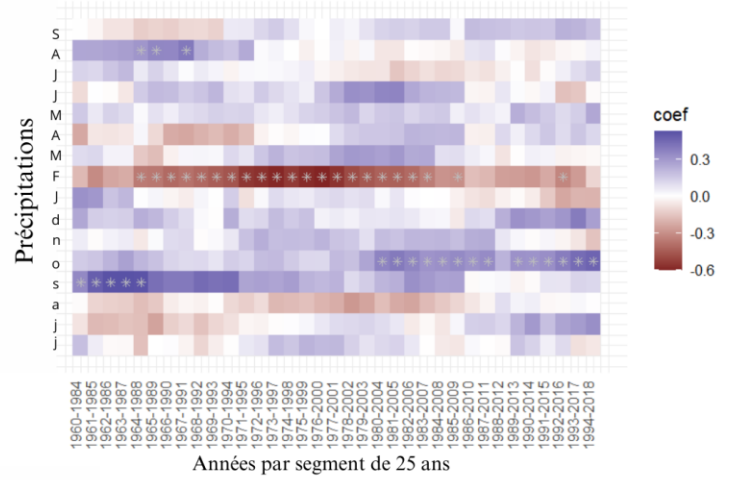
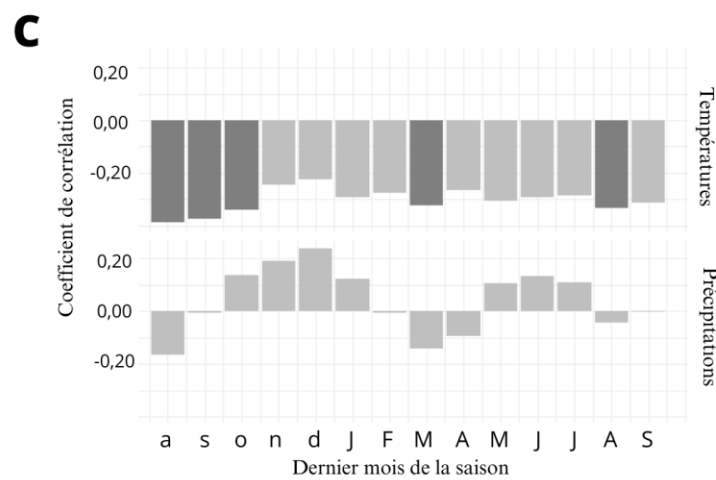
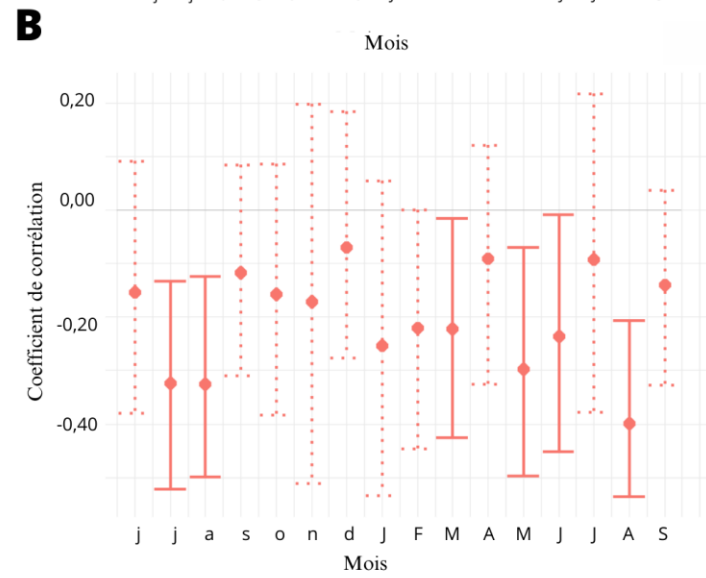
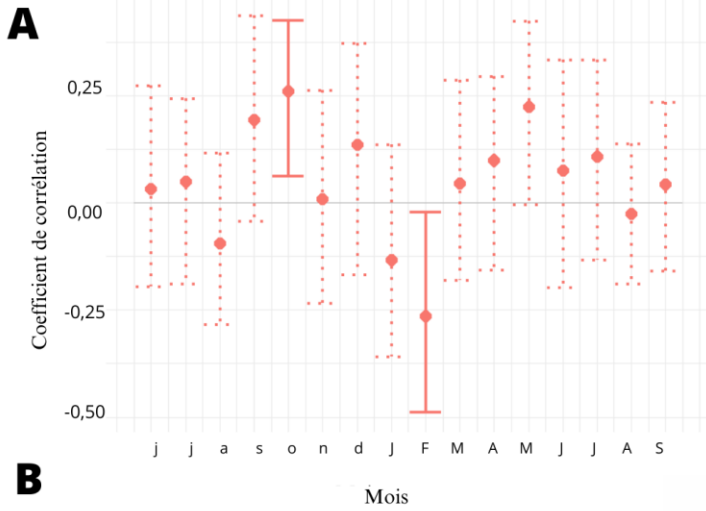
(a) Bonlez



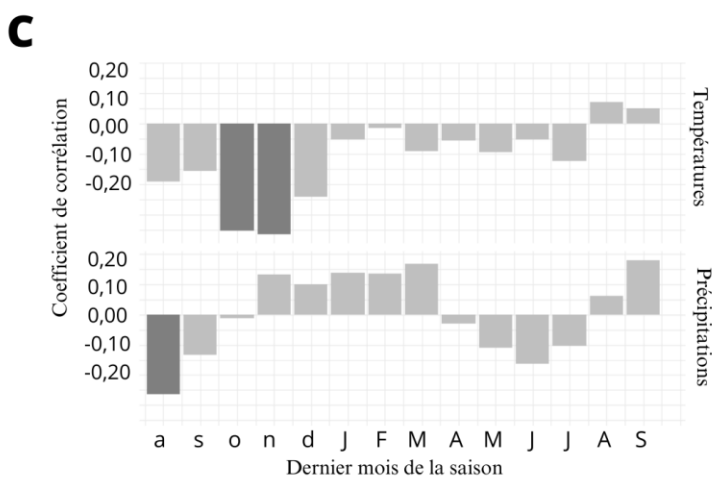
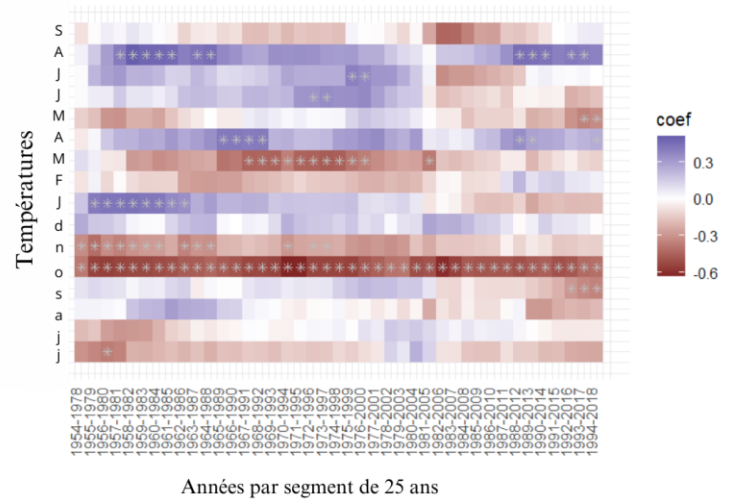
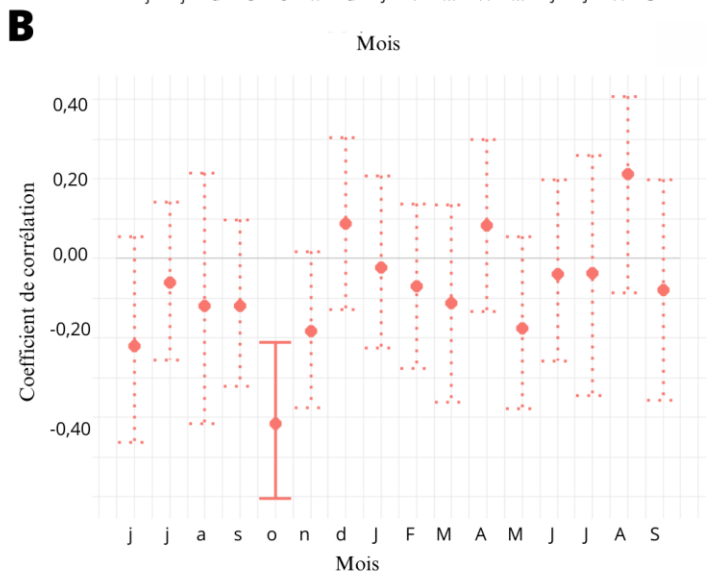
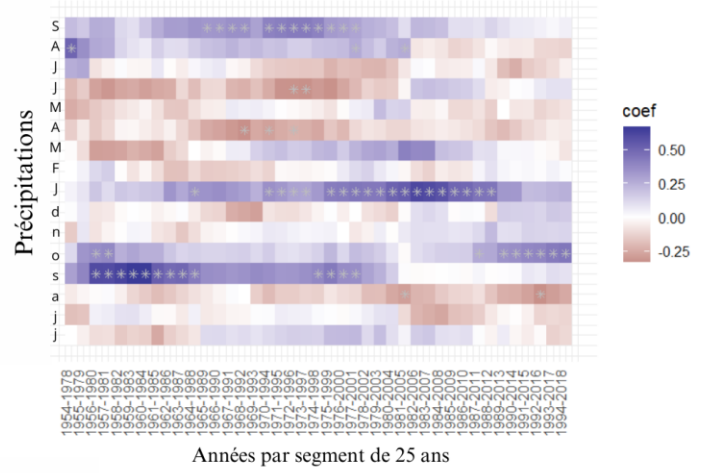
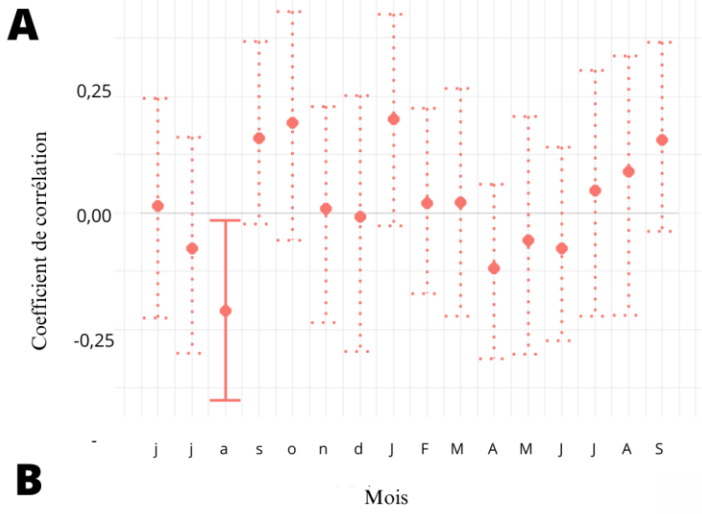
(b) Daverdisse



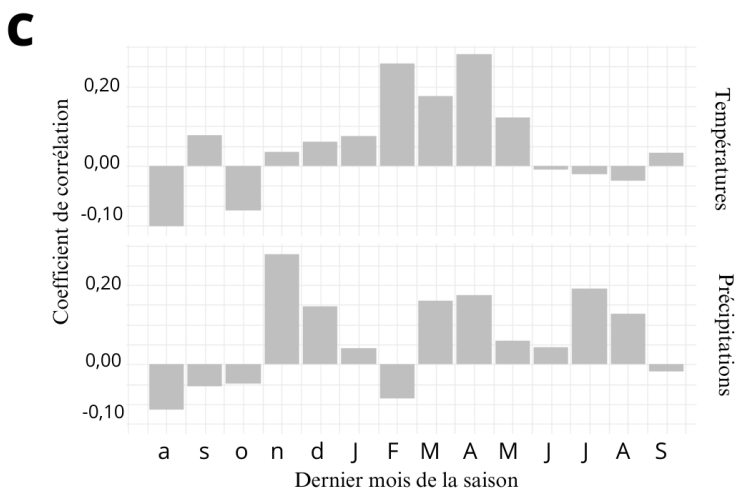
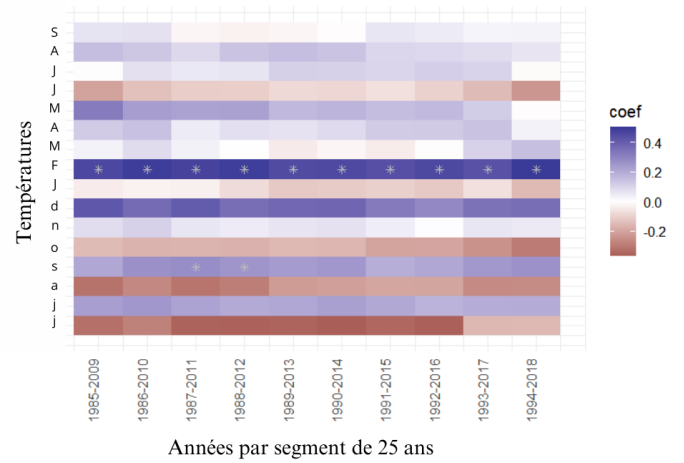
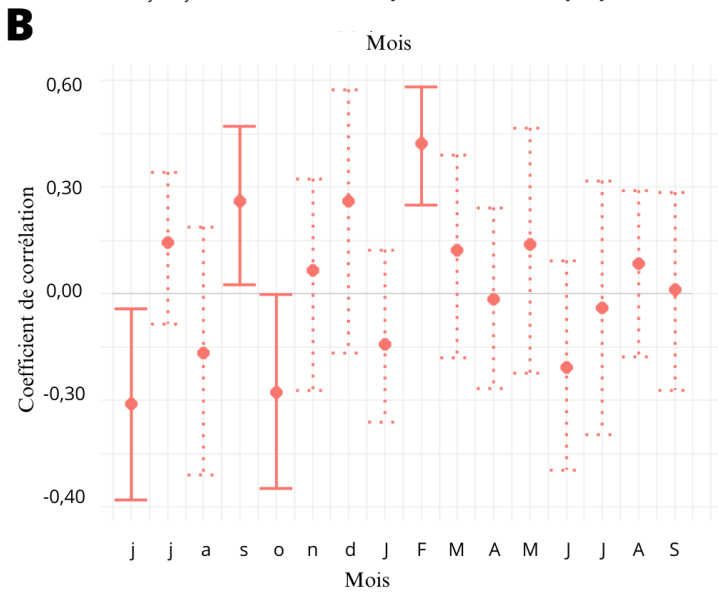
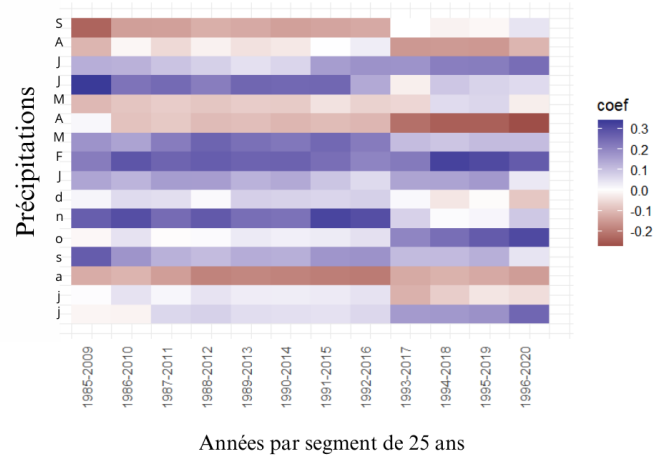
(c) Jurbise



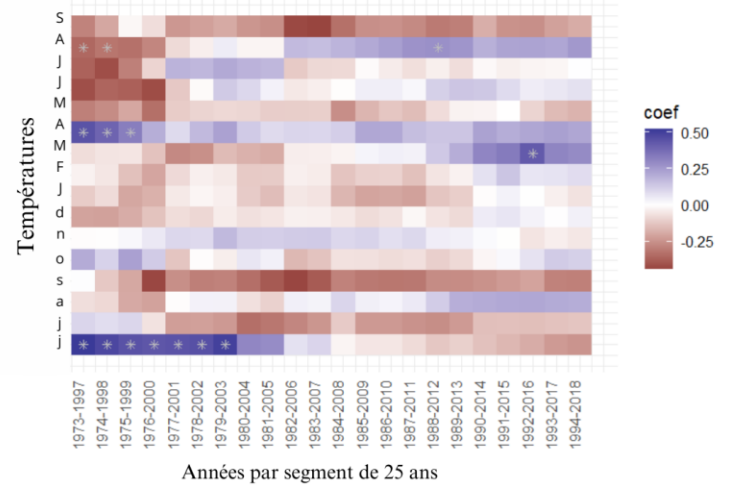
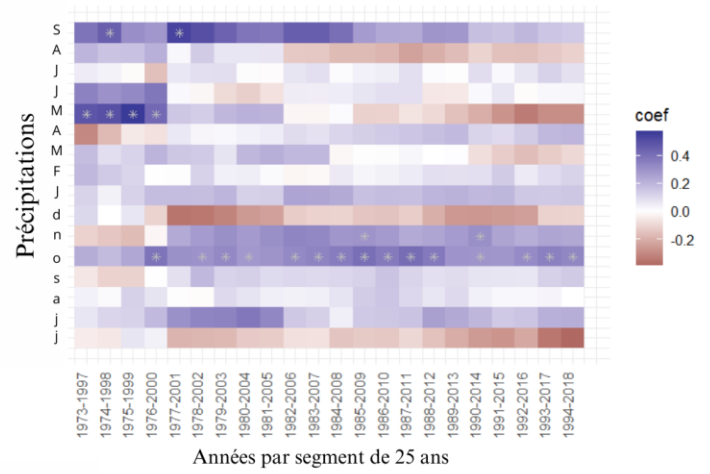
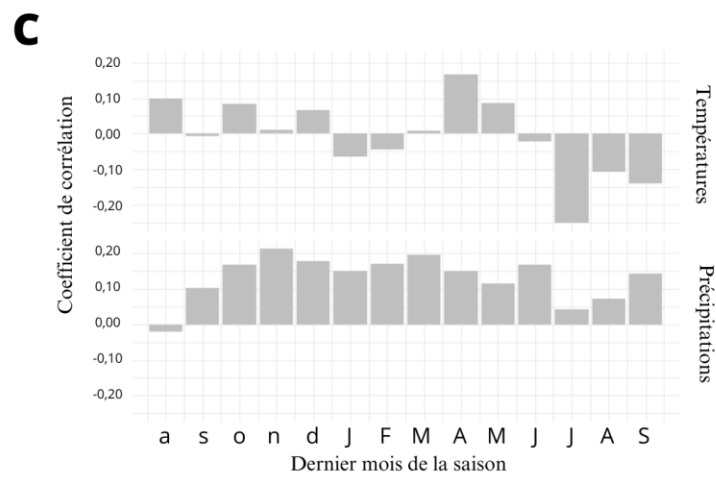
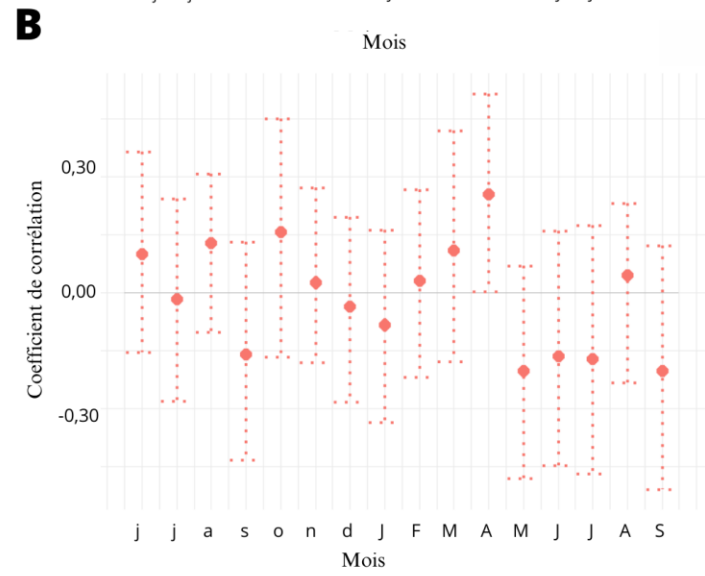
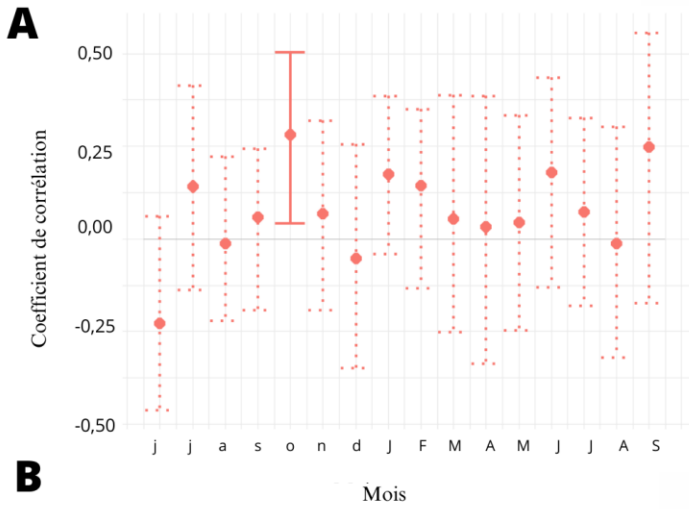
(d) Stoumont



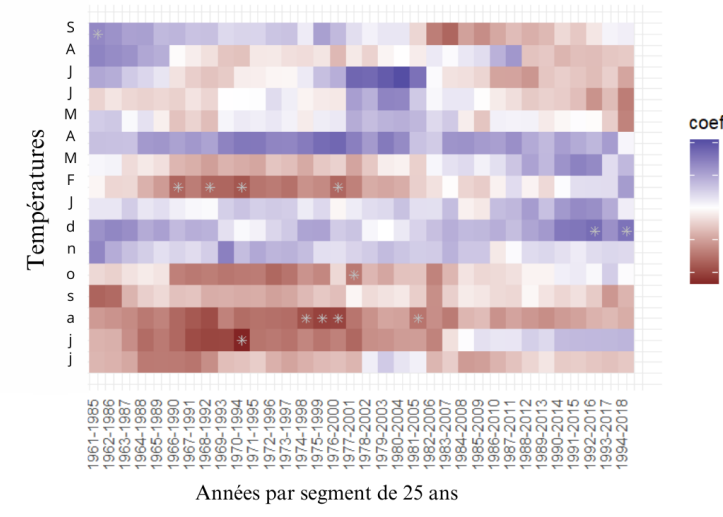
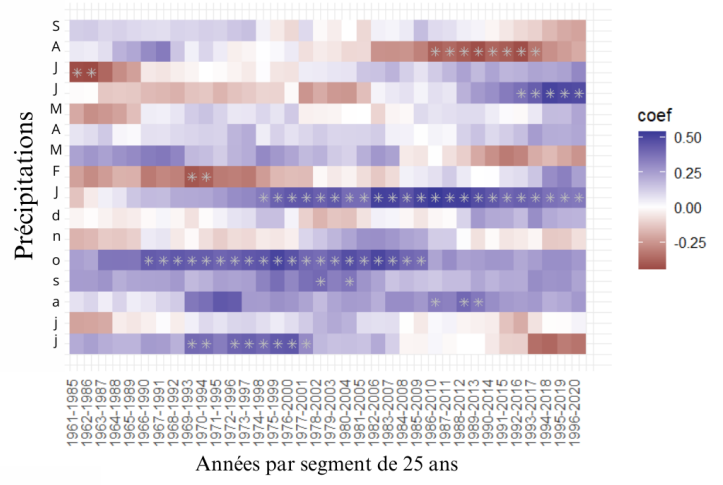
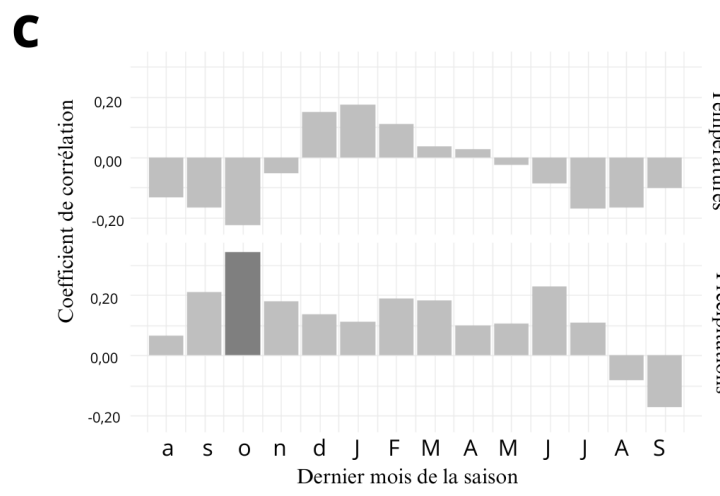
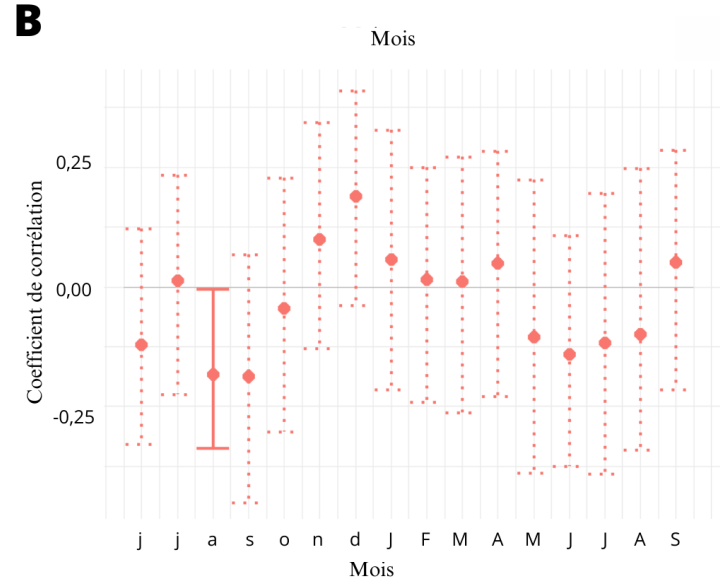
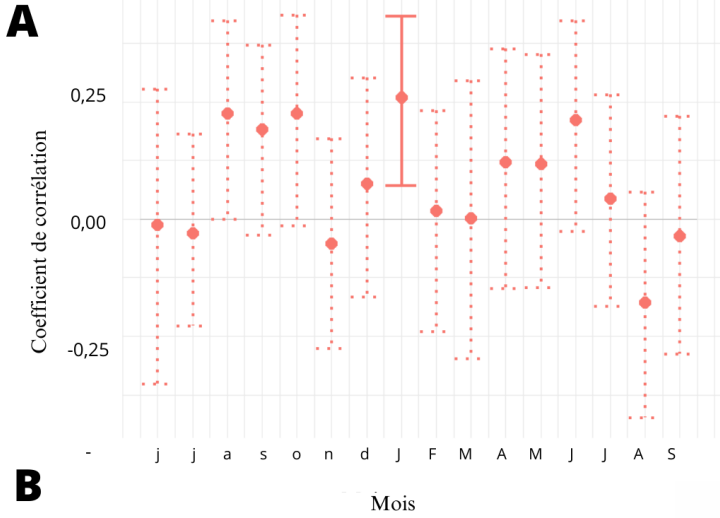
(e) Ronquières



(f) Raeren

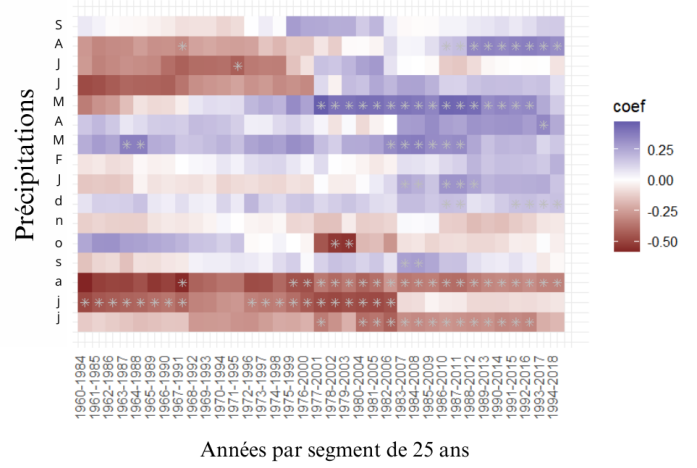
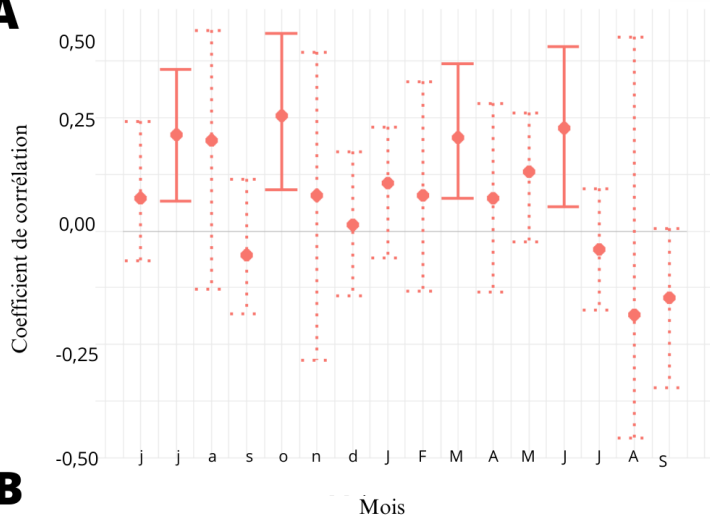


(g) Eupen

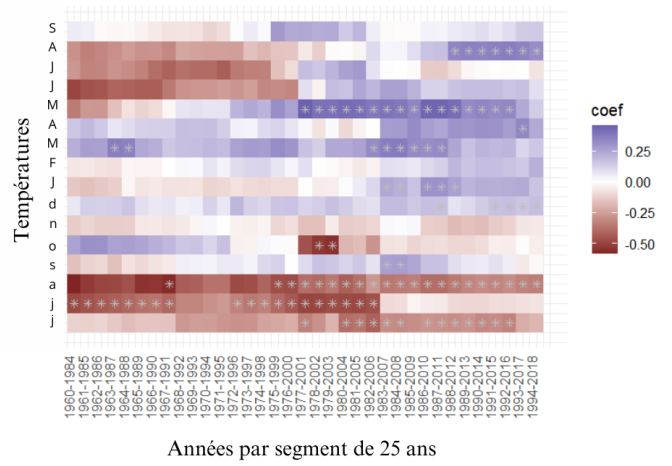
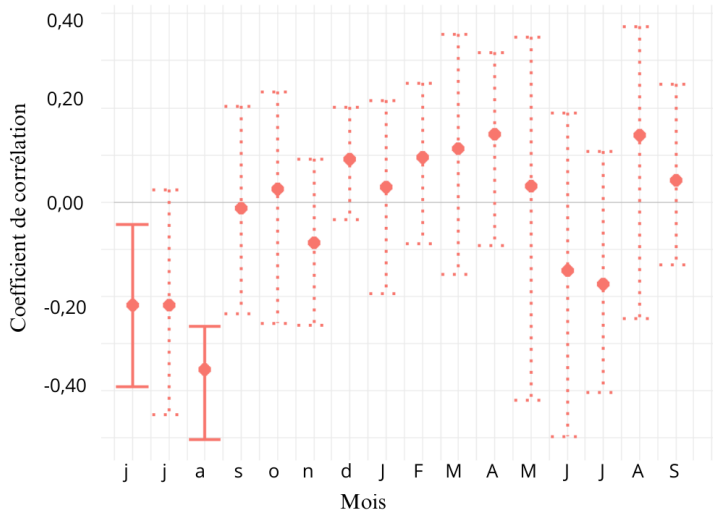


(h) Vitruval

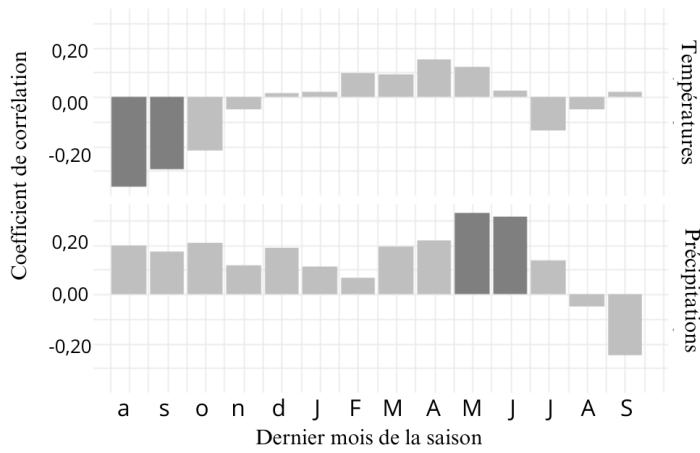
A



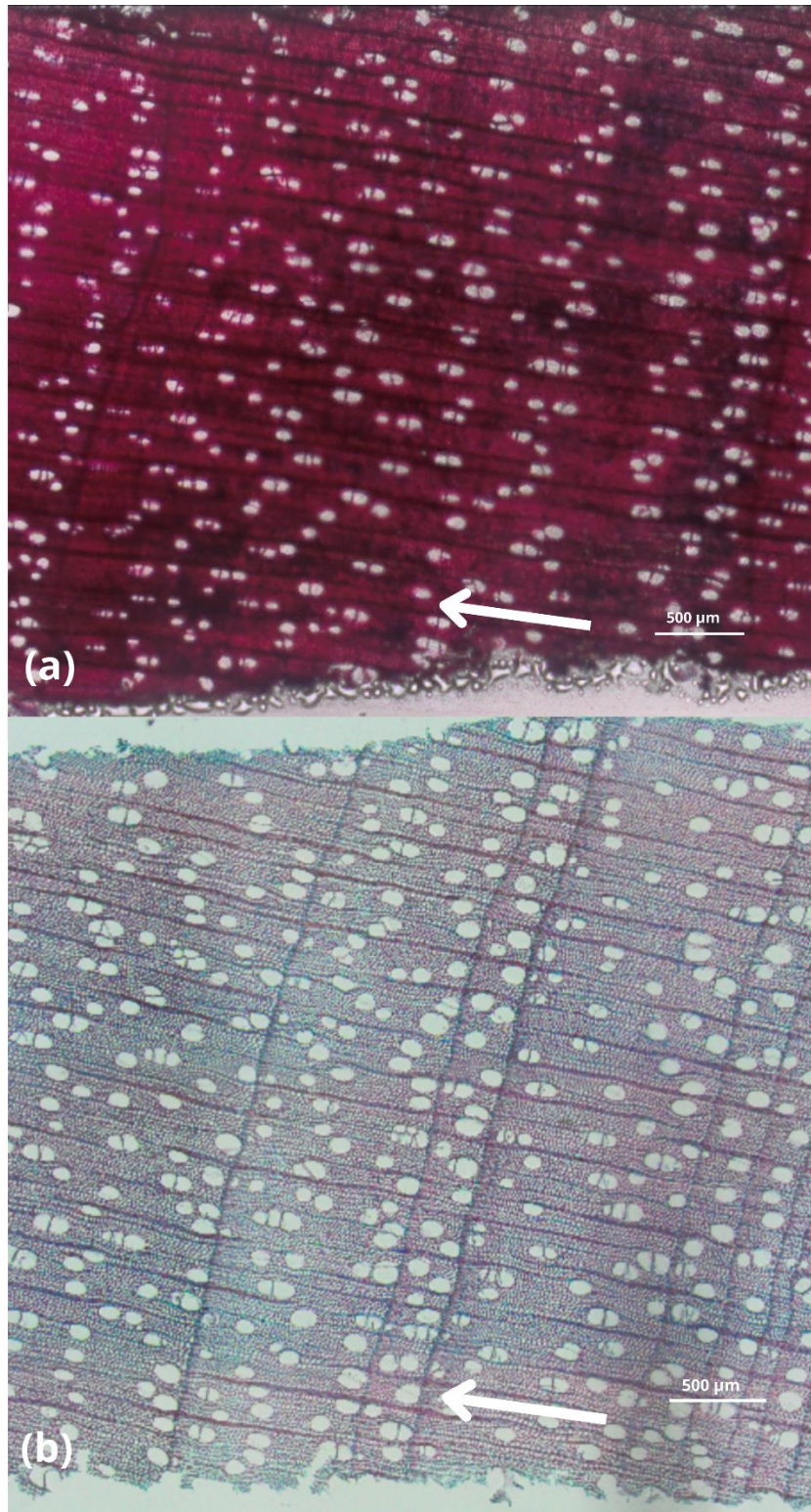
B



C



Annexe 3 – Illustration des qualités de coupe rencontrées : (a) Carotte BV_RON_03_B qui présente une qualité moindre due à la présence de bulles d'air, rendant la visualisation compliquée ; (b) Carotte BV_DAV_06_B qui présente une qualité supérieure. Le sens de la flèche indique le sens de croissance, de la moelle vers l'écorce.



Annexe 4 – Sortie du programme COFECHA, partie 5. Les carottes ou segments de carottes présentant la meilleure interdatation sont soulignés en jaune. Est considérée, une meilleure interdatation, lorsque qu’il n’y a ni présence de A ou de B dans les corrélations affichées.

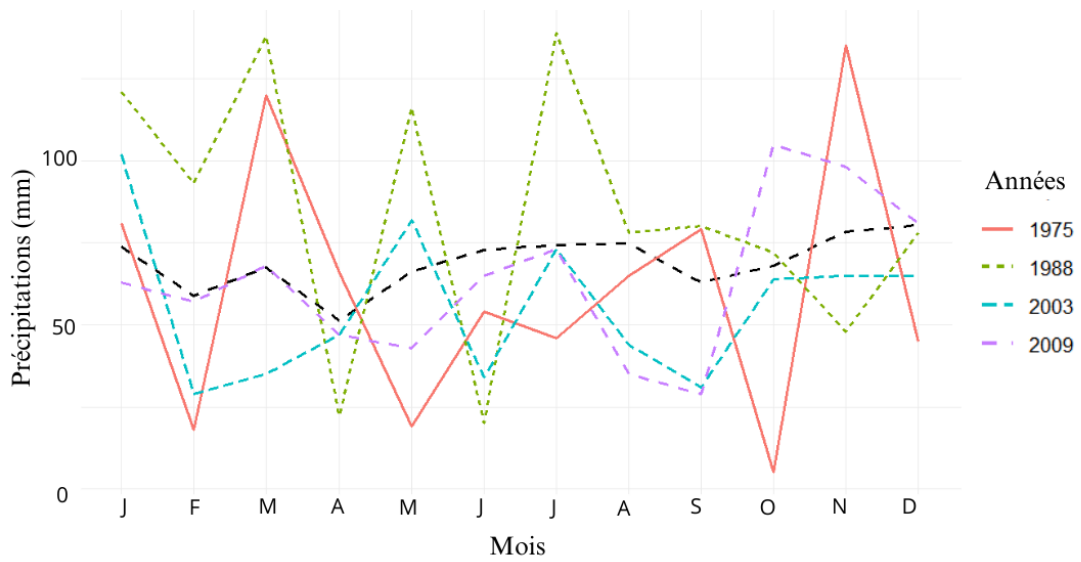
Correlations of 50-year dated segments, lagged 25 years
 Flags: A = correlation under .3281 but highest as dated; B = correlation higher at other than dated position

Seq	Series	Time_span	1925 1974	1950 1999	1975 2024	2000 2049
1	BON01B	1968 2022		.39	.44	
2	BON020	1965 2022		.38	.30A	
3	BON02C	1971 1971		.00A		
4	BON02C	1980 2022			.27B	
5	BON021	1965 1982		.46		
6	BON021	1990 2022			.03B	
7	BON03B	1966 2022		.09B	.06B	
8	BON05A	1966 2020		.69	.73	
9	BON05B	1965 2022		.63	.65	
10	DAV01A	1961 2022		.47	.52	
11	DAV01B	1965 2022		.67	.66	
12	DAV03A	1968 2023		.66	.63	
13	DAV06A	1963 2021	-.12B		-.10B	
14	DAV06B	1963 1963		.00A		
15	DAV06B	1970 2022		-.04B	.05B	
16	DAV07A	1967 2022		.13B	.12B	
17	DAV08B	1961 1961		.00A		
18	DAV08B	1970 2022		.22B	.20B	
19	EUP02B	1954 1962		-.23B		
20	EUP02B	1970 2022		.32A	.31A	
21	EUP03A	1959 1961		.23B		
22	EUP03A	1970 2022		.22B	.22B	
23	EUP10A	1953 1962		-.31B		
24	EUP10A	1970 2022		.63	.65	
25	EUP10B	1955 2022		.59	.69	
26	JUR04B	1940 1977	-.09B			
27	JUR04B	1980 1984			-.71B	
28	JUR04B	1990 2000			-.34B	
29	JUR04B	2010 2022				.19B
30	JUR05B	1970 1989		.01B		
31	JUR05B	2000 2022				.18B
32	JUR07B	1948 1956	.07B			
33	JUR07B	1960 1963		.81B		
34	JUR07B	1970 2012		.23B		
35	JUR07B	2020 2022				.75B
36	JUR08B	1962 2023		.11B	.17B	
37	JUR09B	1955 1982		.19B		
38	JUR09B	1990 2001			-.15B	
39	JUR09B	2010 2022				-.14B
40	RAE02A	1968 2022		.20B	.21B	
41	RAE2B	1969 2022		.46	.52	
42	RAE05B	1971 2022		.56	.53	
43	STO01B	1949 2022	.08B	.10B	.23B	
44	STO04B	1951 1977		.19B		
45	STO04B	1980 2022			.41	
46	STO05A	1948 1954	.06B			
47	STO05A	1960 1972		.38B		
48	STO05A	1980 1981			1.00B	
49	STO05A	1990 2022			.26B	
50	STO12B	1954 2022		.33	.29B	
51	VIT03A	1940 1941	-1.0B			
52	VIT03A	1950 1953		-.55B		
53	VIT03A	1960 2022		-.12B	-.08B	
54	VIT05A	1961 1979		.47		
55	VIT05A	1990 2011			.62	
56	VIT05A	2020 2022				.73B
57	VIT07B	1962 2022		.63	.64	
58	VIT08A	1942 2022	.17B	.48	.27A	
59	VIT09B	1954 2023		.49	.64	

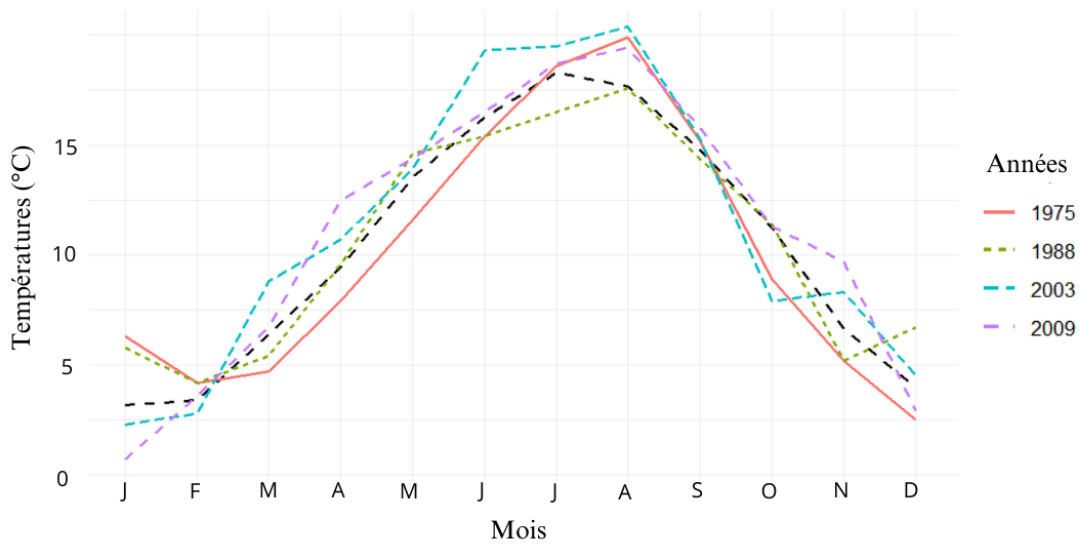
60	RON01A	1984	1985		-1.0B
61	RON01A	1990	2002		.53B
62	RON01A	2010	2022		-.28B
63	RON01B	1982	2021		.28A
64	RON02A	1982	1987		-.18B
65	RON02A	1990	2022		-.13B
66	RON03A	1978	2022		-.02B
67	RON03B	1974	2022	.02B	
68	RON04B	1984	1992		.57B
69	RON04B	2000	2022		.28A
70	RON05A	2002	2004		-.36B
71	RON05A	2010	2022		-.25B
72	RON05B	2000	2007		.00B
73	RON05B	2010	2022		.14B
74	RON06A	2001	2022		.11B
75	RON07A	2002	2002		.00A
76	RON07A	2010	2022		.01B
77	RON07B	2000	2008		.47B
78	RON07B	2010	2022		-.21B
79	RON08A	1999	2009		-.02B
80	RON08A	2020	2022		1.00
81	RON08B	2000	2000		.00A
82	RON08B	2010	2022		.35B
83	RON09A	1978	2022		-.06B
84	RON09C	1979	2022		-.06B
85	RON10B	2000	2022		-.35B
Av segment correlation					-.12 .26 .24 .13

Annexe 5 – Diagramme présentant (a) les précipitations totales mensuelles (en mm) et (b) les températures moyennes mensuelles (en °C) pour les années précédant les années caractéristiques négatives ((c) et (d) pour les années caractéristiques positives). La ligne de pointillés en noir représente la moyenne des précipitations totales mensuelles calculée de 1970 à 2018.

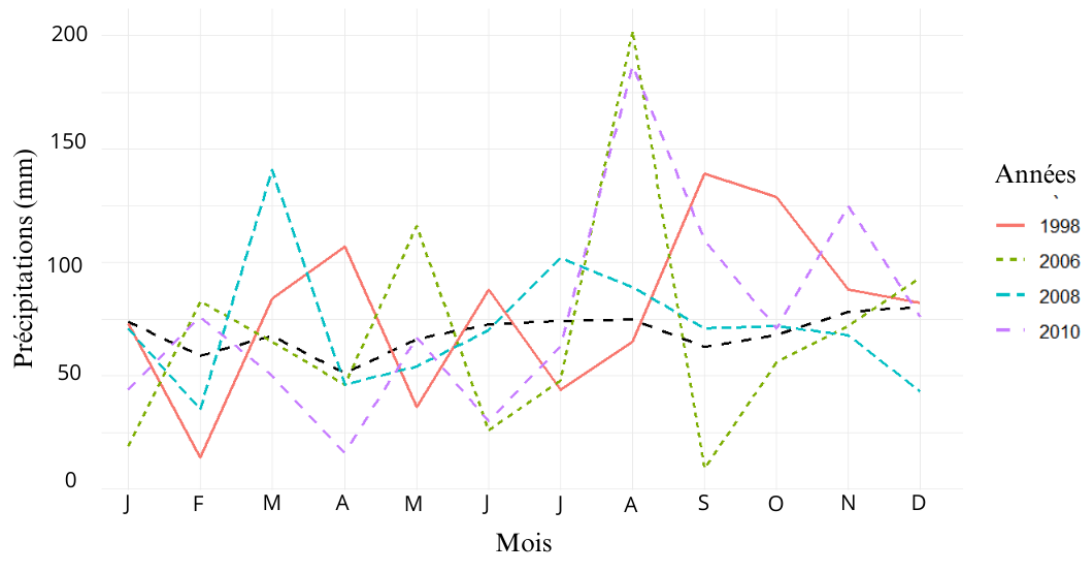
(a)



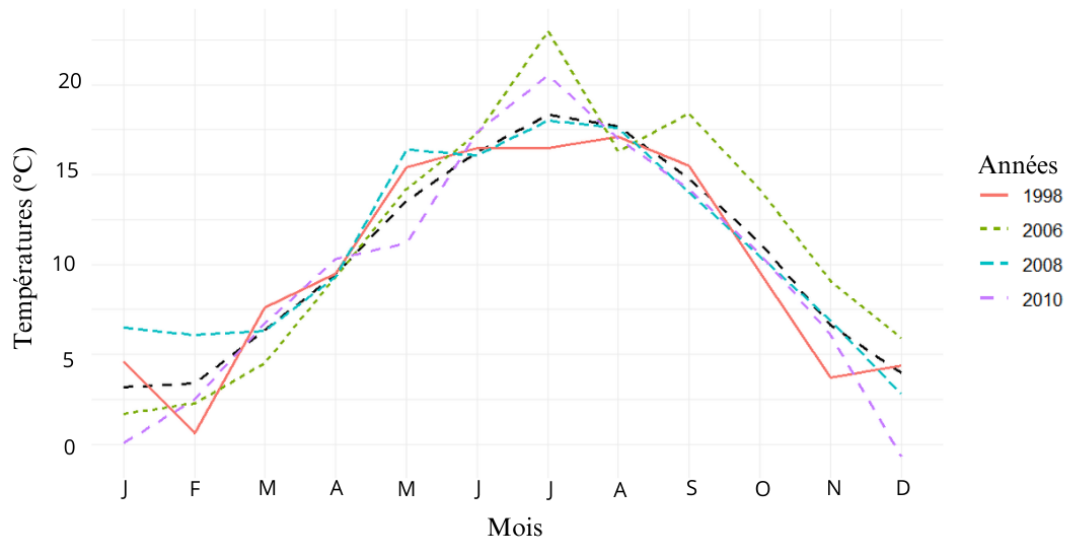
(b)



(c)

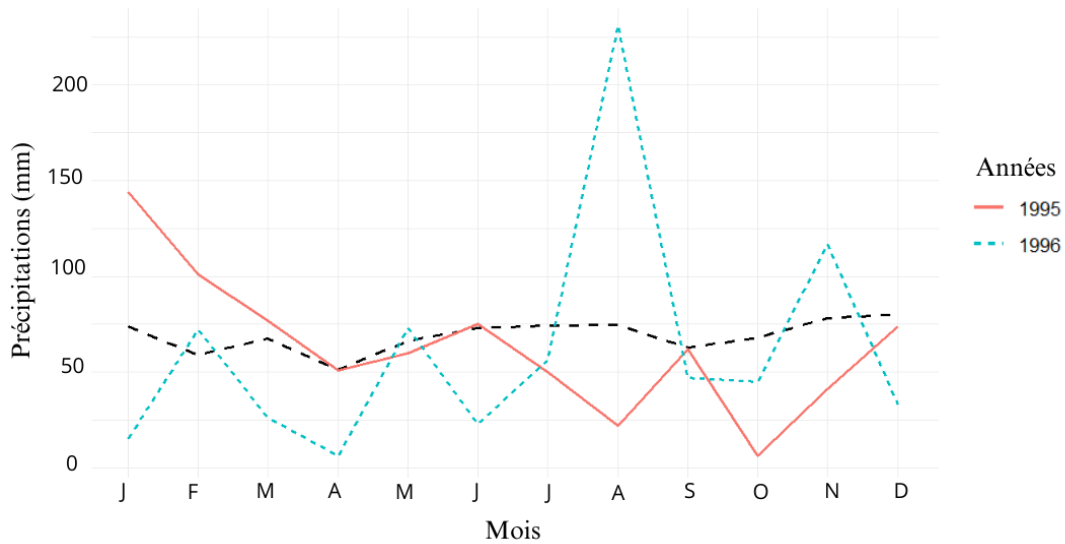


(d)

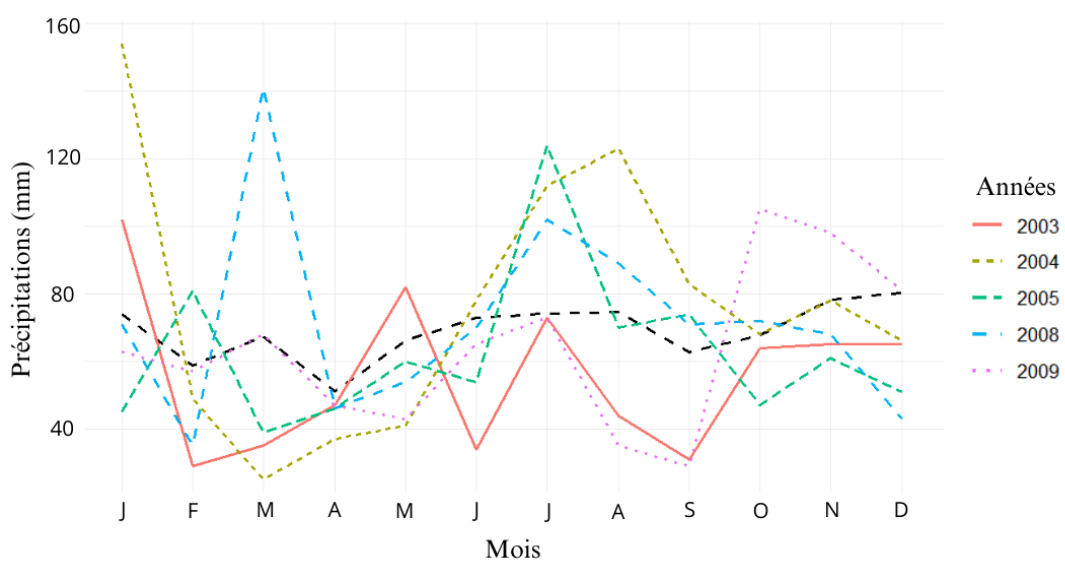


Annexe 6 – Diagramme présentant (a) et (b) les précipitations totales mensuelles (en mm) et (c) et (d) les températures moyennes mensuelles (en °C) pour les années démontrant des absences de vaisseaux dans certains cernes. La ligne de pointillés en noir représente la moyenne des précipitations totales mensuelles calculée de 1970 à 2018.

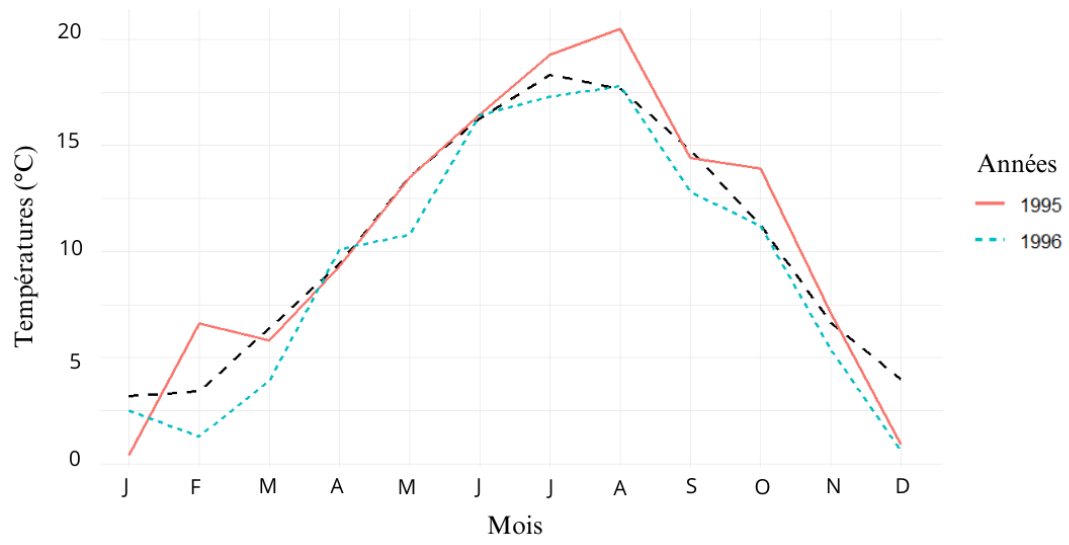
(a)



(b)



(c)



(d)

