

Faculté des bioingénieurs

Analyse comparée de la performance de douze espèces d'avenir au stade juvénile, dans le contexte des changements climatiques

Auteur : Laure Haedens-Dumoulin

Promoteur·ices : Quentin Ponette et Julie Losseau

Lecteur·ices : Morgane Dendoncker et Quentin Leroy

Année académique 2025-2026

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

Remerciements

Ce mémoire est le fruit d'un travail ayant débuté en avril 2025 et se terminant en juin 2026. Je tiens à remercier profondément chaque personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire et tous ceux qui m'ont aidé dans son élaboration.

Dans un premier temps, je remercie mon promoteur, le Professeur Quentin Ponette, pour sa supervision, son aide précieuse pour de nombreux aspects du mémoire ainsi que son temps passé aux relectures.

Je tiens également à remercier chaleureusement ma co-promotrice, Julie Losseau, pour son soutien, son aide et son temps passé pour la réalisation de ce mémoire ainsi que tous les conseils et les connaissances qu'elle a pu me transmettre.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble de l'équipe de la Société Royale Forestière de Belgique (SRFB), dont l'expérience n'aurait pas été la même sans eux. Merci pour leur accueil, leur encadrement, leur bonne humeur ainsi que leur partage de connaissances.

Je souhaite également remercier l'équipe des volontaires de la SRFB ainsi que les propriétaires que j'ai pu rencontrer dans le cadre de ce mémoire pour leur intégration et la transmission de leur savoir-faire. Je leur exprime ma reconnaissance pour m'avoir accueillie avec bienveillance et générosité.

Ensuite, je souhaite adresser un merci particulier à Arthur Guignabert, François Joussemet et André Sasse pour leur expertise et leurs conseils dans la formalisation du modèle de croissance dans le langage R. Ce domaine n'étant pas mon domaine de prédilection, leur patience, leur bienveillance ainsi que leur temps libre m'ont été d'une grande aide durant ce mémoire.

De plus, je tiens à remercier les membres du comité scientifique que j'ai eu l'occasion de rencontrer dans le cadre de ce mémoire afin de leur présenter les premiers résultats. Leurs avis, leurs recommandations ainsi que leurs réflexions m'ont permis d'améliorer ce travail. Merci donc à Etienne Branquart, Nicolas Dassonville, Quentin Leroy, Olivier Noiret et Eléonore Scholzen.

Un grand merci à Morgane Dendoncker et Quentin Leroy d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance envers mes amis les plus proches, surtout Alexia et Héléna, pour les moments passés avec eux, leurs encouragements, leur motivation et leur soutien qui ont rendu le parcours académique plus enrichissant.

Enfin, je remercie ma famille et mon compagnon pour le soutien et les encouragements qu'ils m'ont apportés durant la réalisation de ce mémoire et tout au long de mes études. Merci en particulier à mes parents pour la relecture orthographique de ce mémoire.

J'exprime ma profonde gratitude et mes vifs remerciements à toutes les personnes ayant contribué à ce mémoire. Merci.

CRediT	Laure Haedens	Contributeur·ices	Intelligence artificielle
Conceptualisation	X	QP, JL	
Méthodologie	X	QP, JL	
Investigation		SRFB	
Analyse formelle	X	AG, FJ, AS, QP, JL	X
Validation	X	QP, JL	
Rédaction – version originale	X		
Rédaction – révision et édition	X	QP, JL	X
Visualisation	X		X
Supervision		QP, JL	

*Quentin Ponette (QP), Julie Losseau (JL), Arthur Guignabert (AG), François Joussemet (FJ), André Sasse (AS), Société Royale Forestière de Belgique (SRFB)

La conceptualisation de l'idée de recherche, de la formulation des objectifs et des hypothèses s'est effectuée en collaboration avec Quentin Ponette et Julie Losseau, superviseurs de ce mémoire. La méthodologie, c'est-à-dire la réalisation des choix de méthode d'analyse, a également été effectuée ensemble. La validation des résultats (vérification et confirmation) ainsi que la correction et la révision de la rédaction ont été effectuées en collaboration avec Quentin Ponette et Julie Losseau. La SRFB a contribué à l'investigation à travers la collecte des données antérieurement au mémoire : l'ensemble des données ont été récoltées avant la réalisation du mémoire. L'analyse formelle (méthodes et application de techniques statistiques) a recueilli plusieurs contributeurs : une réunion et plusieurs échanges par mail avec André Sasse ont permis de mieux comprendre la théorie et la pratique de la réalisation du modèle de croissance. Un appel vidéo et plusieurs échanges par mail avec Arthur Guignabert et François Joussemet ont permis la formalisation des différents modèles dans le langage R, utilisés dans le mémoire. Les superviseurs de ce mémoire ont également participé à la conceptualisation et à la réalisation des modèles ainsi que de l'ensemble des autres analyses.

Les outils d'intelligence artificielle ayant été utilisés au cours du travail sont, par ordre d'importance : ChatGPT (OpenAI), Piccolo (UCLouvain), ChatIA (Ecosia) et Copilot (Microsoft). Ces intelligences artificielles ont principalement été utilisées comme assistance pour le code et pour l'amélioration des figures. Elles m'ont également aidée dans la compréhension de certains concepts, les reformulations de certaines phrases, la correction de l'orthographe et de la grammaire du texte préalablement rédigé. Elles m'ont également aidée à optimiser certaines recherches bibliographiques, notamment en trouvant des mots-clés pertinents à insérer dans le moteur de recherche.

Table des matières

Remerciements.....	ii
CRediT	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Lexique.....	x
1. Introduction.....	1
2. État de l’art.....	3
2.1. Problématique des changements climatiques	3
2.1.1. Changements globaux et climats actuels.....	3
2.1.2. Impacts des changements climatiques sur la forêt tempérée	4
2.2. Contexte climatique et forestier en Wallonie	6
2.3. Adaptation des forêts face aux changements climatiques	8
2.3.1. Concept de la sécheresse et de la circulation de l’eau dans l’arbre.....	8
2.3.2. Stratégies d’adaptation à court terme.....	8
2.3.3. Stratégies d’adaptation à long terme	10
2.4. Stratégies de gestion des forêts face aux changements climatiques	11
2.4.1. Gestion sylvicole sur les peuplements	12
2.4.2. Migration assistée et introduction de nouvelles espèces	13
2.5. Projet <i>Trees for Future</i>	16
2.5.1. Description générale du projet	16
2.5.2. Choix de sélection des espèces.....	17
3. Objectifs et démarche	18
4. Matériels et méthodes	20
4.1. Dispositif <i>Trees for Future</i>	20
4.1.1. Stratégie et structure générale	20
4.1.2. La mise en place et le type de plantations.....	20
4.1.3. Suivi post-plantation	22
4.1.4. Suivi annuel.....	22
4.1.5. Stockage et organisation des données	23
4.2. Espèces et sites d’étude	23
4.3. Préparation et correction des données.....	25

4.3.1. Préparation de la base de données.....	25
4.3.2. Gestion des valeurs aberrantes	26
4.4. Analyses des données.....	29
4.4.1. Croissance en hauteur	29
4.4.2. Taux de survie	31
4.4.3. Conformation.....	32
4.4.4. État sanitaire	32
5. Résultats.....	33
5.1. Les valeurs aberrantes.....	33
5.2. Croissance en hauteur	36
5.2.1. Tendances générales observées	36
5.2.2. Sélection du modèle global de croissance	38
5.2.3. Analyse de l'hétérogénéité de croissance.....	40
5.2.4. Analyse de l'effet du site sur la croissance.....	42
5.3. Taux de survie	47
5.4. Conformation.....	49
5.5. État sanitaire.....	49
6. Discussion	53
6.1. Les valeurs aberrantes.....	53
6.1.1. Les causes liées aux valeurs aberrantes	53
6.1.2. Les limites de la méthodologie	54
6.1.3. Les tendances observées	54
6.2. Croissance en hauteur	55
6.2.1. Les tendances générales observées.....	55
6.2.2. Les groupements d'espèces.....	55
6.2.3. Validation et limites du modèle	57
6.2.4. Hétérogénéité de la croissance à cinq ans selon l'espèce	58
6.2.5. L'influence du site sur la croissance	59
6.3. Taux de survie	62
6.4. Conformation.....	63
6.5. État sanitaire.....	64
7. Conclusion et perspectives	66
Références.....	69
Annexes.....	79

Annexe A – Évolution des aires potentielles pour deux espèces, à titre d'exemple (d'après Poquet et al. (2019)).....	79
Annexe B – Santé des forêts en général en 2024 : liste des espèces avec leurs principaux problèmes sanitaires en Belgique en 2024 (Direction du Milieu forestier, 2024).....	80
Annexe C – La théorie de la tension-cohésion de Dixon (1896) © Pearson Education, Inc., Publishing as Benjamin Cummings.....	81
Annexe D – Fiche d'observation pour les suivis de printemps.....	82
Annexe E – Fiche d'observation pour les suivis d'automne.....	84
Annexe F – Fiche des problèmes principaux.....	86
Annexe G – Fiche des symptômes principaux.....	88
Annexe H – Structure de la base de données.....	90
Annexe I – Tableaux récapitulatifs de l'ensemble des espèces du mémoire.....	98
Annexe J – Portfolio des différentes espèces.....	103
Annexe K – Tableau reprenant l'écologie des douze espèces étudiées dans le cadre du mémoire.....	107
Annexe L – Étude de différents modèles : équations testées, explications de chaque modèle et valeurs correspondantes d'AIC.....	110
Annexe M – Nombre d'Unités Génétiques par espèce et par année du suivi ayant été plantées en 2019-2020.....	111
Annexe N – Tableaux reprenant le nombre de données certaines, corrigées et d' <i>outliers</i>	113
Annexe O – Nombre d'Unités Génétiques par espèce et par âge.....	114
Annexe P – Résumés statistiques des modèles utilisés.....	116
Annexe Q – Figures des hauteurs observées (en cm) en fonction de la hauteur prédite par le modèle (en cm).....	118
Annexe R – Tableau reprenant les valeurs statistiques des <i>boxplots</i> avec les coefficients de variation (CV) de la Figure 23.....	123
Annexe S – Données stationnelles pour les deux espèces étudiées dans le cadre de l'analyse de l'effet du site sur la croissance annuelle.....	124
Annexe T – Nombre d'Unités Génétiques ayant un taux de survie inférieur à 80 % en 2024.....	126
Annexe U – Nombre d'Unités Génétiques concernées et étudiées pour réaliser la figure sur l'évolution des proportions selon l'année et l'espèce, avec le nombre total d'arbres repris pour l'ensemble des UG concernées.....	128

Liste des figures

Figure 1 : Anomalie des moyennes annuelles à Bruxelles (Uccle) de 1833 à 2023, par rapport à la période de référence 1961-1990 (<i>IRM - Tendances observées en Belgique</i> , s. d.)	3
Figure 2 : Évolution des précipitations annuelles (à gauche) et estivales (à droite) (en %) au cours de la période 2071-2100 par rapport à la période de référence 1971-2000 pour le scénario RCP 8.5 (European Environment Agency, 2022)	4
Figure 3 : Répartition géographique de sept groupes biogéographiques estimée en fonction du climat actuel et extrapolée aux climats futurs dont le modèle utilisé prévoit une augmentation de + 2,5 °C en moyenne en 2100 (inspirés de Badeau et al. (2010) et de l'Office National des Forêts (2007))	5
Figure 4 : Simulations 2000-2100 pour les événements extrêmes : à gauche sécheresse (nombre maximum de jours consécutifs sans pluie en été), à droite canicule (nombre de jours d'été appartenant à des séquences de plus de 5 jours de canicule) (Déqué, 2005). Le scénario A2 est un des scénarios SRES proposé par l'IPCC fondé sur une croissance démographique continue et sur une croissance économique et technologique fragmentées (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000)	5
Figure 5 : Répartition des espèces forestières en région wallonne selon leur volume sur pied (en %)	7
Figure 6 : Vitesse maximale à laquelle les espèces peuvent se déplacer naturellement (km tous les 10 ans) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014)	11
Figure 7 : Schémas des différentes stratégies d'adaptation artificielle face aux changements climatiques : a. Migration assistée d'espèces, b. Migration assistée de provenances, c. Introduction de nouvelles espèces (inspiré de de Wouters, 2022)	14
Figure 8 : Logos de la Société Royale Forestière de Belgique (à gauche) et du projet <i>Trees for Future</i> (à droite)	16
Figure 9 : Principales étapes du travail permettant de répondre aux questions initiales	19
Figure 10 : Hiérarchisation du projet (Julie Losseau, 2025)	20
Figure 11 : Exemple de dispositif de plantation en plein (Julie Losseau, 2025)	21
Figure 12 : Exemple de dispositif de plantation en cellules (<i>klumps</i>) (Julie Losseau, 2025) ...	21
Figure 13 : Localisation des sites (carreaux rouges) du projet <i>Trees for Future</i> , selon les différentes zones bioclimatiques (J.Losseau, 2025)	24
Figure 14 : Visualisation des cas spéciaux lors de la gestion des <i>outliers</i>	27
Figure 15 : Organigramme du cheminement expliqué lors de la gestion des <i>outliers</i>	28
Figure 16 : Courbes d'évolution des hauteurs (en cm) de chaque individu d'une UG en fonction de l'âge pour <i>Cedrus atlantica</i> dans le site de Hamoir a. Avant la correction des valeurs aberrants b. Après la correction	33
Figure 17 : Courbes d'évolution des hauteurs (en cm) de chaque individu d'une UG en fonction de l'âge pour <i>Quercus pubescens</i> dans le site de Postel a. Avant la correction des valeurs aberrants b. Après la correction	34
Figure 18 : Répartition du type de données selon l'espèce (Données certaines = $\Delta H > 0$; Données corrigées = données considérées comme <i>outlier</i> qui n'est, après traitement, pas un	

<i>outlier</i> ; <i>Outliers</i> certains = $\Delta H < 0$ pour laquelle une hauteur ne chute pas à 0 ; <i>Outliers</i> incertains = $\Delta H < 0$ pour laquelle une hauteur chute à 0 ; <i>Outliers</i> nuls = $\Delta H = 0$; <i>Outliers</i> élevés = ΔH très élevés).....	35
Figure 19 : Répartition du type de données selon l'intervalle de croissance annuelle en hauteur considérée (en cm.an^{-1}) (Données certaines = $\Delta H > 0$; Données corrigées = données considérées comme <i>outlier</i> qui n'est, après traitement, pas un <i>outlier</i> ; <i>Outliers</i> certains = $\Delta H < 0$ pour laquelle une hauteur ne chute pas à 0 ; <i>Outliers</i> incertains = $\Delta H < 0$ pour laquelle une hauteur chute à 0 ; <i>Outliers</i> nuls = $\Delta H = 0$; <i>Outliers</i> élevés = ΔH très élevés).....	35
Figure 20 : Évolution de la hauteur moyenne (en cm) par espèce en fonction de l'âge	36
Figure 21 : Évolution de la hauteur moyenne (en cm) et de l'écart type (en gris) par espèce en fonction de l'âge. Les résineux sont en rouge et les feuillus sont en vert.	37
Figure 22 : Évolution de la hauteur prédite (en cm) en fonction de l'âge par espèce dont les lettres signifient les différents groupes de croissance auxquels appartiennent les espèces..	39
Figure 23 : <i>Boxplots</i> des coefficients de variation (en %) à cinq ans par espèce.....	41
Figure 24 : Comparaison des croissances annuelles (en cm.an^{-1}), par <i>boxplots</i> , en fonction de différents sites pour lesquels <i>Quercus pubescens</i> est planté	44
Figure 25 : Comparaison de la croissance annuelle (en cm.an^{-1}) selon le type de plant chez <i>Quercus pubescens</i> pour les sites présentant les deux types de plant.....	45
Figure 26 : Comparaison des croissances annuelles (en cm.an^{-1}), par <i>boxplots</i> , en fonction de différents sites pour lesquels <i>Cedrus atlantica</i> est planté.....	46
Figure 27 : Évolution du taux de survie moyen (en %) en fonction des années, par espèce pour les UG plantées en 2019-2020	47
Figure 28 : <i>Boxplots</i> représentant les évolutions du taux de survie (en %) en fonction des années, par espèce pour les UG plantées en 2019-2020.....	48
Figure 29 : Part des arbres touchés par des fourches et/ou par une inclinaison (en %), par espèce.....	49
Figure 30 : Évolution des proportions des différents statuts en fonction de l'année, par espèce (en %).....	50
Figure 31 : Part des arbres atteints par un problème selon les espèces pour l'année 2022 (année sèche)	51
Figure 32 : Part des arbres atteints par un problème selon les espèces pour l'année 2024 (année humide)	51
Figure 33 : Part des symptômes (gauche) et des organes touchés par un symptôme (droite) selon les espèces pour l'année 2022 (année sèche)	52
Figure 34 : Part des symptômes (gauche) et des organes touchés par un symptôme (droite) selon les espèces pour l'année 2024 (année humide)	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : État climatique wallon de 2019 à 2024 selon les saisons	7
Tableau 2 : Espèces concernées par le mémoire incluses dans le projet <i>Trees for Future</i> – noms latins et vernaculaires et aires de répartition actuelles.....	24
Tableau 3 : Moyenne des principaux indicateurs climatiques pour les dix zones bioclimatiques en Wallonie (Van der Perre et al., 2015).....	25
Tableau 4 : Type de données avec leur condition d'existence, les causes possibles et le traitement réalisé.....	26
Tableau 5 : Classification des variables utilisées dans le modèle	30
Tableau 6 : Valeurs des variances associées à chaque effet du modèle de l'Équation [8].....	38
Tableau 7 : Valeurs des accroissements en hauteur (en cm.an ⁻¹) et du groupe par espèce ..	40
Tableau 8 : Caractéristiques des effectifs par espèce à cinq ans.....	42
Tableau 9 : Caractéristiques de la croissance annuelle par site (statistiques et groupes de significativité) pour <i>Quercus pubescens</i>	44
Tableau 10 : Caractéristiques de la croissance annuelle par site (statistiques et groupes de significativité) pour <i>Cedrus atlantica</i>	46

Lexique

Abies bornmuelleriana, *A. bornmuelleriana*, **Abo** : Sapin de Bornmüller

Abies nordmanniana, *A. nordmanniana*, **Ano** : Sapin de Nordmann

Calocedrus decurrens, *C. decurrens*, **Cde** : Calocèdre

Cedrus atlantica, *C. atlantica*, **Cat** : Cèdre de l'Atlas

Pinus nigra, *P. nigra*, **Pni** : Pin noir

Pinus pinaster, *P. pinaster*, **Ppi** : Pin maritime

Pinus sylvestris, *P. sylvestris*, **Psy** : Pin sylvestre

Pseudotsuga menziesii, *P. menziesii*, **Pme** : Douglas

Quercus cerris, *Q. cerris*, **Qce** : Chêne chevelu

Quercus petraea, *Q. petraea*, **Qpe** : Chêne sessile

Quercus pubescens, *Q. pubescens*, **Qpu** : Chêne pubescent

SRFB : Société Royale Forestière de Belgique

TFF : *Trees for Future*

Tilia cordata, *T. cordata*, **Tco** : Tilleul à petites feuilles

UG : Unité Génétique

OVSF : Observatoire Wallon de la Santé des Forêts

1. Introduction

Les forêts du monde couvrent approximativement 30 % des terres émergées (Lanly, 2024) tandis que la couverture forestière de la Belgique s'élève à 23 % du territoire, dont la grande majorité se situe en Wallonie (Filière Bois Wallonie, 2024). Elles jouent un rôle essentiel en fournissant des biens et services écosystémiques comme la production de bois et d'énergie, le contrôle et le maintien de la qualité de l'eau, du sol et de l'air ainsi que la récréation sociale (SPW, s. d.-c).

Cependant, la menace des changements climatiques pèse sur ces services (SPW, s. d.-a). En effet, l'augmentation de la température de 1,1 °C depuis l'ère préindustrielle (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023) et la modification des régimes de précipitations en Europe (European Environment Agency, 2022) ont accru la fréquence des événements météorologiques extrêmes tels que les canicules et les sécheresses. Ces phénomènes sont susceptibles d'entraîner un changement des aires de répartition des espèces forestières (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023; SPW, s. d.-a).

Par ailleurs, les changements climatiques entraînent une augmentation de CO₂ dans l'atmosphère, ce qui stimule la production végétale à court terme. À long terme, cependant, cela appauvrit le sol en nutriments, ce qui pourrait réduire la production en forêt (Lousteau, 2001; Nageleisen et al., 2010). De plus, l'augmentation des températures stimule les processus physiologiques des insectes, ce qui augmente la présence de maladies dans les forêts (Nageleisen et al., 2010).

Ces pressions sont d'autant plus renforcées par une forêt belge majoritairement composée d'espèces vulnérables aux changements climatiques. En effet, les espèces principales, comme le hêtre et l'épicéa, sont directement menacées par les changements climatiques. Leur sensibilité à la sécheresse et aux insectes va entraîner un risque écologique majeur pour la résilience de la forêt (ACRVF et al., s. d.-a, s. d.-b). En conclusion, les forêts belges actuelles ne sont plus adaptées au climat futur.

Dans le cadre des changements climatiques et dans l'objectif de préparer la forêt de demain, le projet *Trees for Future* a été mis en place par la Société Royale Forestière de Belgique. L'objectif du projet est d'identifier des espèces et des provenances forestières contribuant à l'adaptation des forêts aux changements climatiques, en s'appuyant principalement sur le concept de migration assistée d'espèces et de provenances. La migration assistée est une méthode d'adaptation aux changements climatiques dont l'objectif est d'accélérer de façon artificielle la vitesse de migration des espèces d'arbres susceptibles d'être mieux adaptées au climat futur (Bower et al., 2024; Ducouso & Musch, 2024). La migration assistée d'espèces consiste en l'introduction d'une espèce absente du territoire à adapter tandis que la migration assistée de provenances est l'introduction d'une espèce déjà présente sur le territoire à adapter mais qui provient du sud de son aire de répartition naturelle.

À ce jour, le projet inclut 30 espèces et 52 provenances réparties sur 58 sites à travers toute la Belgique. Ces parcelles sont suivies annuellement par l'équipe de volontaires afin de mesurer le taux de survie, l'accroissement ainsi que l'état sanitaire.

Cette étude vise donc à aider les forestiers qui se questionnent sur leur façon d'adapter la forêt de demain. Pour cette raison, comprendre les comportements et les besoins des espèces est nécessaire afin d'évaluer quelles espèces sont aptes à composer la forêt future. Cependant, cela inclut des espèces encore inconnues chez nous. Il est donc primordial d'établir une connaissance approfondie de leur comportement afin de mieux répondre à la problématique.

Sur la base de cet objectif, les questions scientifiques de recherche auxquelles nous allons essayer de répondre sont les suivantes :

- (1) Si l'espèce a un effet significatif sur la croissance des arbres, quels sont les groupes d'espèces ayant une croissance similaire ?*
- (2) Quel est le facteur, entre le site, l'année de plantation et l'individu, qui influence le plus la croissance ?*
- (3) Pourquoi des différences de croissance entre individus d'une même espèce âgés de cinq ans sont observées, et quels facteurs expliquent cette hétérogénéité ?*
- (4) Quels facteurs du site expliquent la croissance d'une espèce ?*
- (5) Quels facteurs expliquent l'évolution du taux de survie d'une espèce ?*

Afin de répondre à ces questionnements, plusieurs méthodes sont utilisées, notamment un modèle de croissance afin d'évaluer l'influence significative de l'espèce sur la croissance des arbres, permettant d'établir les différents groupes statistiques d'espèces. L'hétérogénéité de croissance est évaluée en comparant et en analysant les coefficients de variation à cinq ans des différentes espèces. Une analyse des sites de deux espèces (*C. atlantica* et *Q. pubescens*) est également réalisée en comparant la croissance de l'espèce sur les différents sites sur lesquels elle a été plantée. Enfin, le taux de survie est calculé de façon annuelle sur la base des mesures effectuées sur le terrain. Chaque analyse est interprétée en croisant les résultats avec les données stationnelles, climatiques et l'écologie des espèces, afin d'identifier les tendances et d'expliquer d'éventuelles anomalies.

Ce rapport de mémoire se compose de cinq grandes parties. D'abord, l'état de l'art permet de poser le contexte de ce mémoire, notamment à travers la problématique des changements climatiques, les adaptations et les stratégies de gestion des forêts face à ceux-ci ainsi que le projet qui s'intéresse à la problématique de l'adaptation des forêts futures, *Trees for Future*. De plus, les objectifs et la démarche de ce mémoire sont explicités notamment grâce à la réalisation d'un schéma montrant les différentes étapes. Ensuite, la méthodologie permettant de réaliser les résultats est exposée, comme la méthode de récolte des mesures ainsi que les analyses statistiques effectuées. Enfin, les différents résultats obtenus sont présentés et discutés. Ceux-ci concernent la gestion des valeurs aberrantes de la base de données, le modèle de croissance, l'analyse du taux de survie, de la conformation et de l'état sanitaire des différentes espèces.

2. État de l'art

Cet état de l'art examine tout d'abord la problématique des changements climatiques, notamment les changements globaux et les impacts sur les forêts. Ensuite, le contexte climatique et forestier en Wallonie est abordé. Une identification et une explication des différentes stratégies d'adaptation et de gestion des forêts aux changements climatiques seront également abordées. Finalement, le projet *Trees for Future* est décrit de façon générale.

2.1. Problématique des changements climatiques

2.1.1. Changements globaux et climats actuels

Les changements climatiques sont réellement présents sur l'ensemble de la Terre. En effet, au fil des années, les températures moyennes ont augmenté de + 1,1 °C depuis l'ère préindustrielle et cela ne cesse d'augmenter (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). Plus particulièrement en Belgique (Figure 1), une augmentation de 0,41 °C par décennie est observée selon la référence 1961-1990 (*IRM - Tendances observées en Belgique*, s. d.). La température moyenne annuelle ne cesse d'augmenter depuis 1990, dont les records sont principalement enregistrés dans les années 2000. Il y a donc eu un réchauffement ces dernières décennies.

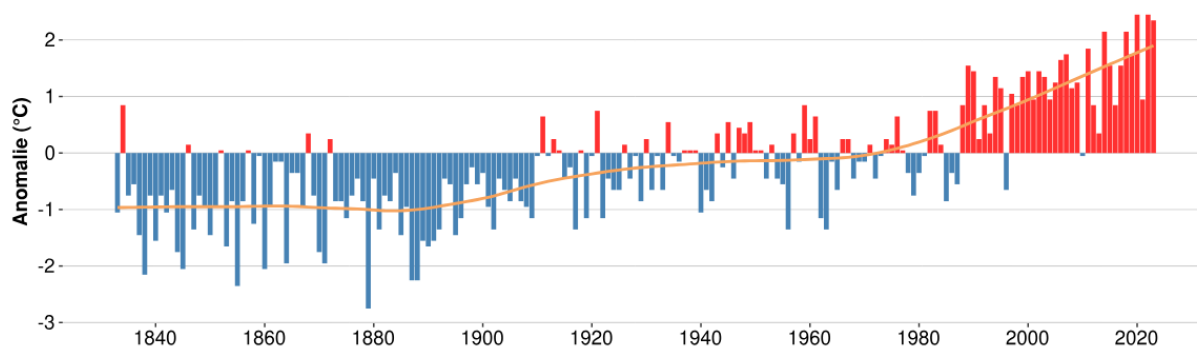


Figure 1 : Anomalie des moyennes annuelles à Bruxelles (Uccle) de 1833 à 2023, par rapport à la période de référence 1961-1990 (*IRM - Tendances observées en Belgique*, s. d.)

De plus, il y a une modification des régimes de précipitations à travers l'Europe (European Environment Agency, 2022). En effet, selon le scénario RCP 8.5 (Figure 2), une augmentation annuelle des précipitations est prévue dans le nord tandis qu'une diminution est attendue dans le sud. Des sécheresses seront également plus importantes en été en raison de la baisse prononcée des précipitations. Ainsi, il y aura plus de pluies en hiver et des étés plus secs en Belgique.

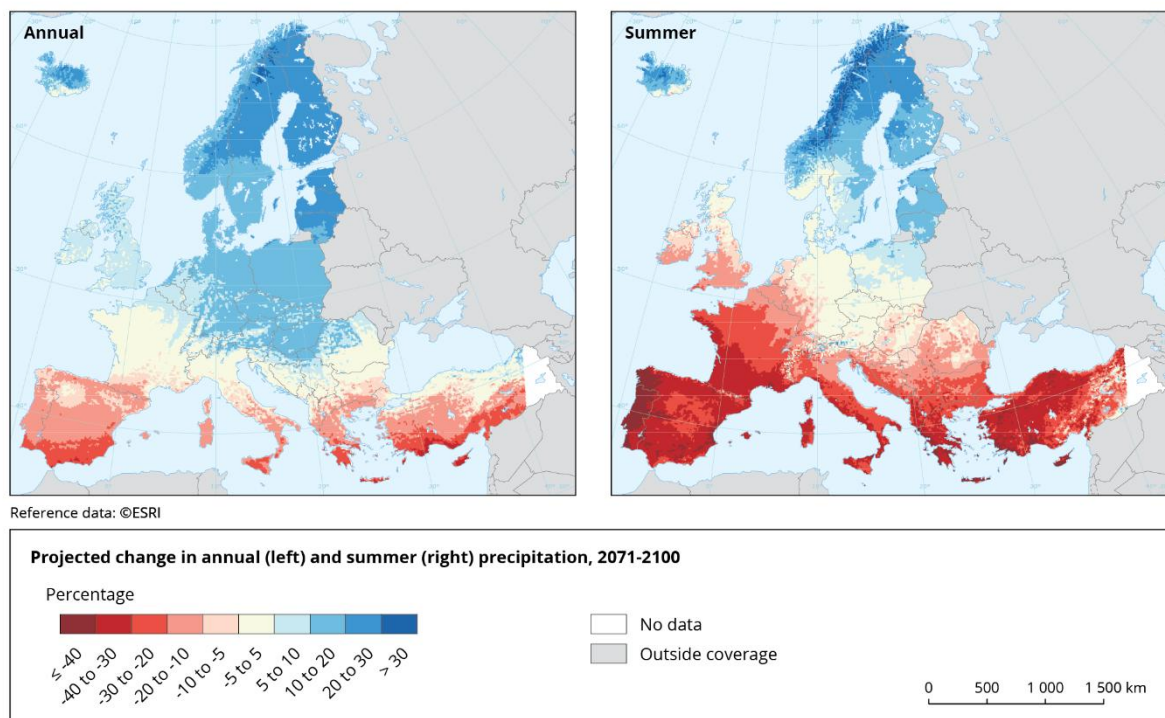


Figure 2 : Évolution des précipitations annuelles (à gauche) et estivales (à droite) (en %) au cours de la période 2071-2100 par rapport à la période de référence 1971-2000 pour le scénario RCP 8.5 (European Environment Agency, 2022)

Cela n'est pas sans conséquence sur les forêts. En effet, à cause des changements climatiques, une augmentation de la fréquence des événements météorologiques et climatiques extrêmes tels que des canicules et des sécheresses est susceptible d'entraîner un changement des aires de répartition des espèces forestières (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023; SPW, s. d.-a).

Il est important de prendre en considération le fait que le scénario utilisé pour la Figure 2 est le scénario le plus pessimiste menant à des conditions climatiques plus défavorables. En effet, plusieurs scénarios sont proposés par l'IPCC, dont le scénario RCP 2.6 est le plus optimiste tandis que le RCP 8.5 est le plus pessimiste. Il y a donc une incertitude liée aux scénarios futurs résultant d'une variabilité du climat et des activités humaines (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

2.1.2. Impacts des changements climatiques sur la forêt tempérée

Les changements climatiques entraînent des conséquences importantes sur les forêts belges. Bien que les tendances mentionnées ci-dessous concernent la France (Figure 3 et Figure 4), elles restent pertinentes à illustrer pour comprendre le contexte belge. En effet, un changement dans l'aire de répartition des espèces pourrait avoir lieu et l'augmentation des événements extrêmes est observée en Belgique (Conseil et al., 2011; Hanewinkel et al., 2013). Cependant, il est important de garder à l'esprit que les conditions stationnelles belges et françaises ne sont pas partout similaires.

Tout d'abord, la modification des conditions climatiques décrites ci-dessus sont susceptibles d'entraîner un changement dans l'aire de répartition des espèces (Figure 3) (Thuiller et al., 2005). En effet, en France, l'aire des espèces méditerranéennes et du sud-ouest devrait s'agrandir tandis que l'aire des espèces des montagnes et du nord-est devrait se réduire. Par exemple, l'aire potentielle du hêtre (*F. sylvatica*) en France devrait diminuer tandis que le pin maritime (*P. pinaster*) devrait élargir son aire de répartition (Badeau et al., 2010) (Annexe A).

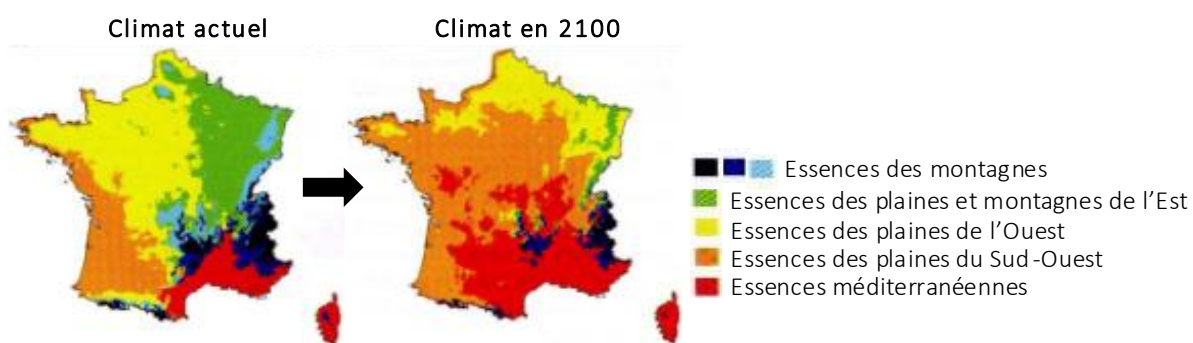


Figure 3 : Répartition géographique de sept groupes biogéographiques estimée en fonction du climat actuel et extrapolée aux climats futurs dont le modèle utilisé prévoit une augmentation de + 2,5 °C en moyenne en 2100 (inspirés de Badeau et al. (2010) et de l'Office National des Forêts (2007))

Ensuite, l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère favorise la photosynthèse ce qui augmente la croissance des arbres (Nageleisen et al., 2010; Norby et al., 2024). L'augmentation de température va allonger la période de végétation. Cela permet actuellement une augmentation de production mais, avec le temps, le manque d'eau et l'appauvrissement du sol en nutriments pourraient contribuer à une baisse de production (Lousteau, 2001).

De plus, les sécheresses, les tempêtes ou encore les attaques d'insectes plus intenses et plus fréquentes vont affaiblir nos forêts. D'ici 2100, les simulations de la Figure 4 illustrent une intensification des épisodes de sécheresse et de canicule (Déqué, 2005).

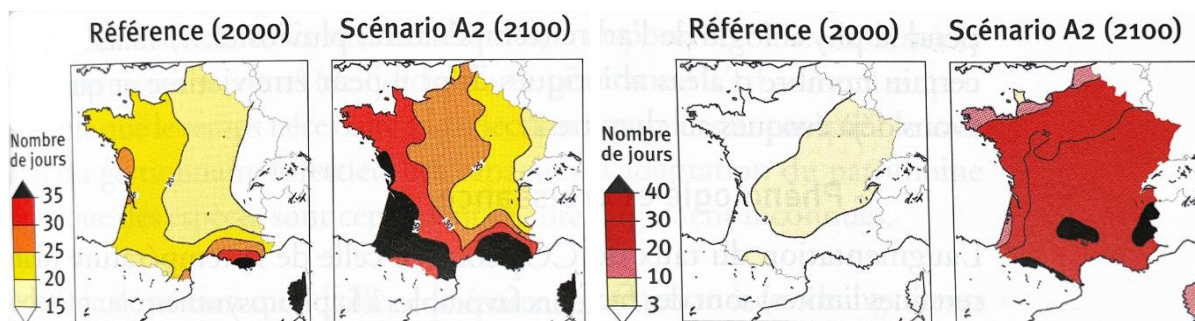


Figure 4 : Simulations 2000-2100 pour les événements extrêmes : à gauche sécheresse (nombre maximum de jours consécutifs sans pluie en été), à droite canicule (nombre de jours d'été appartenant à des séquences de plus de 5 jours de canicule) (Déqué, 2005). Le scénario A2 est un des scénarios SRES proposé par l'IPCC fondé sur une croissance démographique continue et sur une croissance économique et technologique fragmentées (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000)

Les évènements extrêmes tels que les sécheresses et canicules ne sont pas sans conséquence (Nageleisen et al., 2010). Par exemple, les sécheresses entraînent des nécroses, de la défoliation ou des dépérissements qui favorisent l'accès aux parasites. Les gelées tardives peuvent quant à elles causer des déformations ou la mort de l'arbre et les gelées précoces entraînent la lésion cambiale.

En raison des changements climatiques, les maladies vont également augmenter car les insectes, les parasites et les champignons sont dépendants de la température. En effet, selon Nageleisen et al. (2010), une augmentation de température stimule les processus physiologiques des insectes ce qui permet, par exemple, un développement plus rapide des œufs, une augmentation du nombre de générations, de meilleurs déplacements et une diminution de la mortalité. En revanche, certains pathogènes tels que les champignons peuvent être désavantagés face aux changements climatiques car ils manquent d'humidité pour effectuer leur processus de reproduction et de dissémination.

L'Observatoire Wallon de la Santé des Forêts (OWSF) réalise des lettres d'information annuelles afin de partager les dernières actualités pédoclimatiques et phytosanitaires (Direction du Milieu forestier, 2024). Actuellement, les espèces principales en Belgique montrent des signes de faiblesse, notamment des problèmes sanitaires. Par exemple, les épicéas se retrouvent plus vulnérables à cause de la sécheresse et du scolyte, les hêtres montrent des dépérissements à grande échelle et les frênes sont touchés par des champignons, notamment la chalarose qui peut engendrer des mortalités importantes (Annexe B).

2.2. Contexte climatique et forestier en Wallonie

Un état climatique wallon des dernières années peut également être dressé selon l'OWSF (Tableau 1) (Direction du Milieu forestier, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024). La période considérée, de 2019 à 2024, correspond à la période couverte par le jeu de données qui sera utilisé dans le cadre de ce mémoire.

Les dernières années ont été plutôt chaudes à l'exception de 2021, les années 2021 et 2022 ont été sèches tandis que 2024 a été une année humide (Tableau 1).

Tableau 1 : État climatique wallon de 2019 à 2024 selon les saisons

Année	Hiver	Printemps	Été	Automne
2019	Précipitations intenses certaines semaines	Précipitations intenses certaines semaines	Sec	Précipitations intenses certaines semaines
2020	Doux et précipitations normales à excessives	Peu pluvieux et gelées en avril-mai	Chaud et sec	Chaud et pluvieux
2021	Normales de saison	Début : températures froides et sèches Fin : deux mois pluvieux	Très pluvieux et températures normales	Froid et sec
2022	Chaud avec des précipitations normales	Températures normales et sec	Chaud et sec	Chaud avec plus de pluie
2023	Contrasté	Contrasté	Chaud avec une pluviométrie contrastée	Chaud avec une pluviométrie contrastée
2024	Doux et pluvieux	Chaud et pluvieux	Très pluvieux avec des températures hautes	Précipitations et températures élevées

Enfin, le contexte des forêts wallonnes constitue une difficulté majeure. Comme l’illustre la Figure 5 (basée sur les données du PanoraBois, Filière Bois Wallonie, 2024), la forêt wallonne présente une diversité limitée : le hêtre, le chêne et l’épicéa y représentent plus de 60 % des volumes sur pied. Or, ces espèces principales, en particulier le hêtre et l’épicéa, sont directement menacées par les changements climatiques (ACRVF et al., s. d.-a, s. d.-b). Leur sensibilité accrue à la sécheresse et aux insectes, comme évoqué précédemment, transforme cette dominance en risque écologique majeur pour la résilience de la forêt.

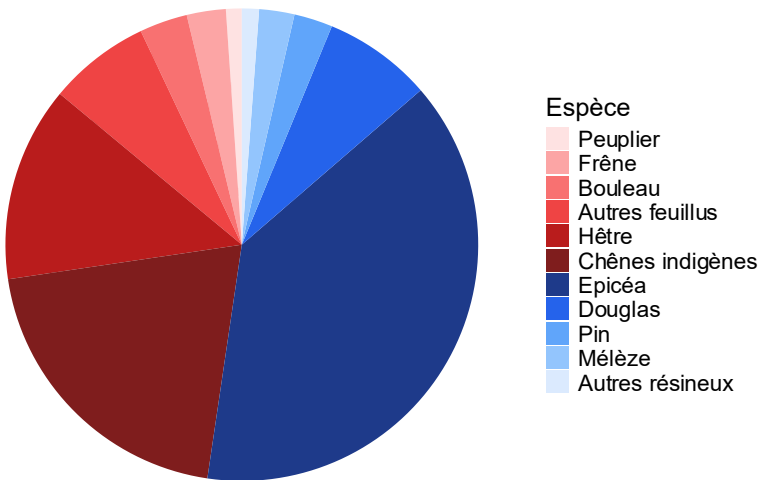


Figure 5 : Répartition des espèces forestières en région wallonne selon leur volume sur pied (en %)

2.3. Adaptation des forêts face aux changements climatiques

Face aux changements climatiques, les arbres ont plusieurs alternatives : décliner puis disparaître, rester en s'adaptant naturellement aux nouvelles conditions locales, ou migrer vers le nord ou en altitude en direction d'habitats plus opportuns (Nageleisen et al., 2010). Cette section vise tout d'abord à exposer le processus fondamental de la circulation de l'eau dans l'arbre ainsi que les impacts de la sécheresse sur cette circulation. Les stratégies d'adaptation seront également décrites.

2.3.1. Concept de la sécheresse et de la circulation de l'eau dans l'arbre

Tout d'abord, la sécheresse se définit comme une notion reposant sur l'existence d'un manque de pluviométrie, souvent accompagné d'une augmentation de température (Eamus et al., 2013). Elle peut être de deux types : la sécheresse édaphique ou atmosphérique. La sécheresse édaphique entraîne une diminution des réserves en eau du sol pouvant affecter les échanges entre le sol et la plante et donc limiter la croissance des arbres. La sécheresse atmosphérique est plutôt liée à un déficit de pression de vapeur dans l'air.

Les stratégies de résistance au stress hydrique édaphique ou atmosphérique dépendent des espèces. Afin de mieux comprendre ces stratégies, il faut d'abord décrypter un processus fondamental : la circulation de l'eau au sein de l'arbre.

La théorie de la tension-cohésion présentée par Dixon permet d'expliquer la circulation de la sève des racines jusqu'aux feuilles de l'arbre en passant par des différences de potentiel entre le sol, l'arbre et l'atmosphère (Annexe C). La circulation de la sève repose sur les forces de cohésion et de tension au sein du xylème (Cruziat et al., 2001).

Cependant, la tension s'intensifie en cas de sécheresse édaphique, lorsque l'eau du sol se fait rare. Ce phénomène s'aggrave d'autant plus lorsque l'air est sec, c'est-à-dire que la demande évaporative de l'air est élevée. Cela peut engendrer la cavitation qui est un phénomène de rupture dans les colonnes d'eau sous tension des vaisseaux conducteurs de sève ascendante. Par la suite, celle-ci peut entraîner l'embolie gazeuse qui est la formation de bulles d'air dans la colonne d'eau. Ces deux processus réduisent la circulation de l'eau ce qui peut entraîner la mort de l'arbre (H. Cochard & Granier, 1999). En effet, les feuilles ne sont plus approvisionnées en sève, engendrant des flétrissements ou des chutes de feuilles de l'arbre (Bréda et al., 2004).

Selon Nageleisen et al. (2010), lors d'une sécheresse, la photosynthèse est également bloquée en raison de la fermeture des stomates. Cela mène à une réduction de la croissance cellulaire qui engendre à son tour un ralentissement de la pousse des rameaux et des racines fines.

2.3.2. Stratégies d'adaptation à court terme

Selon la littérature (Brendel & Cochard, 2011; Courbet et al., 2022; Fang & Xiong, 2015), il existe plusieurs stratégies d'adaptation des espèces face à la sécheresse. En effet, la plante met au point plusieurs mécanismes morphologiques, physiologiques et cellulaires afin de contrer le

stress hydrique (Fang & Xiong, 2015). Quatre grands types de mécanismes à la sécheresse sont identifiés : l'évitement, la tolérance, l'échappement et la récupération. Les deux premières stratégies sont les plus répandues chez les plantes (Yue et al., 2006).

Il est également possible pour certaines espèces de combiner plusieurs stratégies. Il est donc difficile d'étudier précisément la résistance totale d'une espèce en raison des nombreuses stratégies utilisées pour une même espèce et du caractère imprévisible de la durée et de l'intensité des sécheresses (Fang & Xiong, 2015).

La stratégie d'évitement

La stratégie d'évitement consiste pour la plante à maintenir son hydratation (Brendel & Cochard, 2011). Grâce à cela, la plante va pouvoir conserver ses processus physiologiques. Afin de maintenir un potentiel hydrique dans la plante, celle-ci peut mettre en œuvre quatre processus, décrits par plusieurs articles (Maury et al., 2011; Polle et al., 2019).

Tout d'abord, elle peut réduire la transpiration par la fermeture des stomates. Ce processus se nomme le « principe de régulation de la conductance stomatique » (Maury et al., 2011; Polle et al., 2019).

Ensuite, elle peut limiter la croissance de ses feuilles et/ou accélérer la sénescence foliaire. Ce processus permet de diminuer les pertes d'eau en diminuant la transpiration et la respiration (Maury et al., 2011; Polle et al., 2019).

De plus, elle peut développer sa croissance racinaire afin d'aller puiser l'eau en profondeur. Elle peut notamment puiser l'eau en profondeur grâce à un enracinement étendu et plus profond ou à l'aide d'une densité d'enracinement plus élevée (Maury et al., 2011; Polle et al., 2019).

Enfin, elle peut conserver la turgescence de ses tissus, notamment par le biais de l'ajustement osmotique et l'élasticité des parois cellulaires (Maury et al., 2011).

Cependant, si l'arbre utilise la stratégie d'évitement, cela va causer une baisse de productivité. En effet, la fermeture des stomates empêche le bon fonctionnement de la photosynthèse et donc de la croissance entraînant une perte de productivité (Brendel & Cochard, 2011).

L'acclimatation par la plasticité phénotypique peut être considérée comme l'une des stratégies d'évitement. Selon le Centre National de la Propriété Forestière & Office National des Forêts (2025), la plasticité phénotypique d'une espèce peut être perçue par sa variété de forme et de comportement dans différentes conditions environnementales pour un même génotype. Elle permet aux arbres de s'acclimater constamment aux conditions environnementales. Par exemple, lors d'une sécheresse, la défoliation ou la microphyllie sont des changements de la surface foliaire afin de diminuer la transpiration.

La stratégie de tolérance

Ensuite, la stratégie de tolérance consiste pour la plante à maintenir son activité physiologique et sa productivité, contrairement à la stratégie d'évitement (Brendel & Cochard, 2011; Fang & Xiong, 2015). Cette stratégie opte donc pour le maintien de l'ouverture des stomates, contrairement à la stratégie d'évitement.

Afin de maintenir l'activité physiologique, la plante va modifier son métabolisme cellulaire par des régulations génétiques et métaboliques permettant de réduire les dommages causés par la sécheresse (Fang & Xiong, 2015; Polle et al., 2019). Par exemple, la plante s'acclimate à la sécheresse en changeant la composition de sa membrane (Polle et al., 2019).

La stratégie d'échappement

Des plantes peuvent également utiliser la stratégie d'échappement. La plante va adapter naturellement la période de sa croissance ou de son cycle de vie lui permettant d'éviter la période de sécheresse (Fang & Xiong, 2015). En effet, le cycle de vie de la plante s'arrête avant l'apparition de déficits hydriques. Par exemple, la plante possède un développement phénologique rapide, se traduisant par une floraison précoce (Mitra, 2001).

Cependant, ce type de stratégie concerne principalement les plantes disposant d'un cycle court, notamment les plantes annuelles. Il est donc peu probable d'observer ce type de stratégie chez les arbres.

La stratégie de récupération

La dernière stratégie concerne la stratégie de récupération, après une sécheresse. En effet, les arbres sont capables de restaurer leurs fonctions physiologiques après une sécheresse (Fang & Xiong, 2015).

2.3.3. Stratégies d'adaptation à long terme

À plus long terme, l'adaptation des espèces ne repose plus seulement sur les réponses immédiates expliquées ci-dessus. En effet, les espèces peuvent s'adapter génétiquement ou bien migrer naturellement vers des aires plus propices.

D'abord, il existe l'adaptation génétique des espèces par des mécanismes évolutifs (Centre National de la Propriété Forestière & Office National des Forêts, 2025). La diversité génétique, qui dépend du taux de mutation et du nombre d'individus, est en effet un avantage pour leur potentiel d'adaptation. Un article démontre que la sélection naturelle est étroitement associée aux conditions environnementales, perceptible au niveau du génome (Saleh et al., 2022). Cependant, les mécanismes évolutifs sont encore partiellement inconnus mais leur compréhension permettrait d'aider à adapter les forêts aux changements climatiques.

La dernière adaptation possible est la migration naturelle des espèces. En effet, les espèces sont capables de migrer vers le nord ou en altitude en lien avec les changements climatiques (Delzon et al., 2013; Lenoir et al., 2008).

Cependant, à la vue de la rapidité du réchauffement actuel, les espèces végétales n'arrivent pas à suivre et donc ne migrent pas assez rapidement. En effet, les vitesses maximales de déplacement des espèces (axe vertical de gauche) sont comparées aux vitesses de déplacement prévues des températures (axe vertical de droite) (Figure 6).

Les rectangles blancs à barres noires (Figure 6) indiquent les intervalles et les médianes des vitesses maximales de déplacement. Pour les scénarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5, les lignes

horizontales représentent la vitesse moyenne du climat. Les espèces dont la vitesse maximale est inférieure à chaque ligne devraient être incapables de suivre le réchauffement climatique en l'absence d'intervention humaine (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014).

Les résultats révèlent donc que la vitesse d'évolution du climat serait plus rapide que les vitesses de migration des arbres (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). Cela est susceptible d'entraîner des extinctions d'espèces permettant de faire ressortir les limites de cette adaptation face à l'urgence climatique. Une solution serait la migration assistée ou l'introduction de nouvelles espèces.

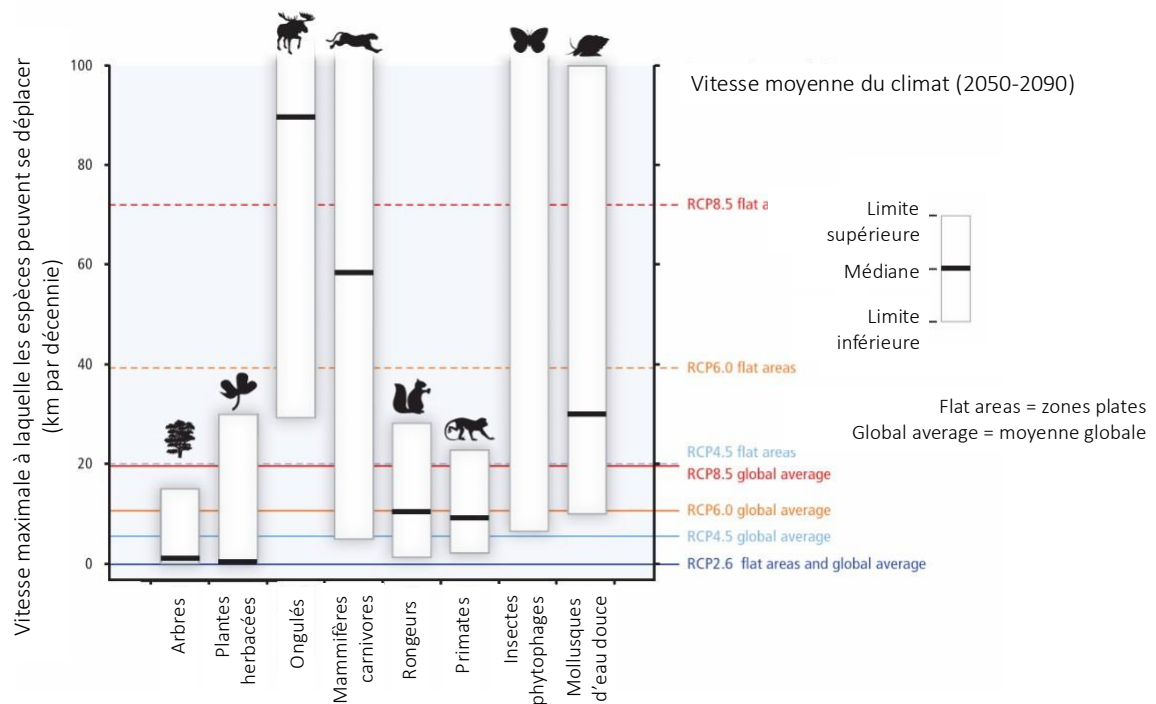


Figure 6 : Vitesse maximale à laquelle les espèces peuvent se déplacer naturellement (km tous les 10 ans)
(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014)

2.4. Stratégies de gestion des forêts face aux changements climatiques

Face aux limites de l'adaptation naturelle, il est possible de revoir les pratiques sylvicoles afin de rendre les forêts plus résilientes face aux changements climatiques. En effet, la gestion sylvicole peut être adaptée à travers le changement de la densité, de la structure et de la composition d'un peuplement tandis que le concept de migration assistée permet d'accélérer la vitesse de migration des espèces de façon artificielle.

2.4.1. Gestion sylvicole sur les peuplements

De manière générale, il est possible d'agir à trois niveaux différents en matière de gestion sylvicole : agir sur la densité, la structure et la composition du peuplement par le gestionnaire (Centre National de la Propriété Forestière & Office National des Forêts, 2025).

Tout d'abord, agir sur la densité a pour objectif de limiter la concurrence ce qui permet de conférer d'une part plus de ressources aux arbres et, d'autre part, une meilleure croissance (Centre National de la Propriété Forestière & Office National des Forêts, 2025). La gestion de la densité peut s'effectuer grâce à des éclaircies.

La modification de la densité permet de réduire la compétition pour les ressources telles que l'eau (Centre National de la Propriété Forestière & Office National des Forêts, 2025). En effet, les éclaircies ont un effet sur le bilan hydrique (Bertin et al., 2016; Bréda, 1999; Office National des Forêts, 2008). Diminuer la densité d'un peuplement va permettre de diminuer la surface foliaire limitant la transpiration et l'interception par les arbres. Il en résulte plus de pluie arrivant au sol, permettant de remplir la réserve en eau du sol. Le bilan hydrique sera donc meilleur (Bertin et al., 2016; Centre National de la Propriété Forestière & Office National des Forêts, 2025). Cependant, le couvert du peuplement va se refermer avec les années après une éclaircie, retrouvant ainsi la surface foliaire initiale et donc la réserve en eau initiale : il serait donc judicieux d'éclaircir de façon plus dynamique permettant de conserver un bilan hydrique optimal (Centre National de la Propriété Forestière & Office National des Forêts, 2025).

Les éclaircies permettent également de meilleures performances de croissance du peuplement sur le plan de la production, de la résistance et de la récupération (Schmitt et al., 2023; Sohn et al., 2016). Cependant, la gestion de la densité devrait rester contrôlée. En effet, ouvrir fortement le peuplement peut favoriser l'instabilité du peuplement, la végétation vigoureuse ou encore la présence de gourmands (Bertin et al., 2016).

Ensuite, une autre pratique sylvicole vise à modifier la structure, liée au régime, au traitement et au stade de développement, en agissant sur les plans vertical et horizontal (Centre National de la Propriété Forestière & Office National des Forêts, 2025). Cependant, il n'existe aucune structure optimale face aux changements climatiques (Dănescu et al., 2018; Office National des Forêts, 2008).

Enfin, il est possible d'agir sur la composition spécifique et la structure du peuplement. En effet, la diversification peut se réaliser à plusieurs niveaux : à l'échelle spatiale, au niveau de la structure et/ou par le mélange d'espèces. L'échelle spatiale implique celle du paysage, de la propriété et du peuplement tandis que la diversification de structure favorise une variété d'âge et de hauteur au sein d'un peuplement.

Il est donc possible d'avoir recours au mélange d'espèces. En effet, promouvoir et renforcer le mélange d'espèces permet d'améliorer la résilience des forêts (Centre National de la Propriété Forestière & Office National des Forêts, 2025). Selon l'Office National des Forêts (2022), le mélange d'espèces possède plusieurs avantages. Il permet notamment la complémentarité pour l'accès et l'utilisation des ressources selon deux interactions.

La première interaction est le partage de l'espace qui permet aux espèces d'utiliser et de survivre dans des compartiments différents, par exemple par des systèmes racinaires différents. Les ressources qui sont disponibles sont donc mieux réparties entre espèces (Office National des Forêts, 2022).

La seconde interaction est la facilitation. Par ce principe, le fonctionnement d'une espèce est optimisé grâce à la présence d'une espèce particulière. Par exemple, une espèce avec des fixatrices d'azote permet aux autres espèces de croître plus rapidement (Office National des Forêts, 2022).

Le mélange d'espèces possède d'autres avantages. Il permet la complémentarité grâce à des réactions différentes face au stress environnemental ou biologique. Cela signifie que, si un stress a lieu dans un peuplement ayant une diversité d'espèces, alors une partie du peuplement aura plus de chance de survivre, notamment grâce à la résistance au stress de certaines espèces (Office National des Forêts, 2022). Ces peuplements mélangés ont également une influence positive sur la biodiversité et sur les attaques biotiques (Bello et al., 2022).

Cependant, l'efficacité du mélange repose sur la complémentarité des espèces en termes de réponse au stress ou de morphologie ou de niche écologique. Par conséquent, si ces espèces possèdent une niche écologique proche, cela serait susceptible d'induire de la compétition pour les ressources. Donc, si le mélange d'espèces montre des différences de niches, les ressources seront probablement utilisées de façon complémentaire et donc la compétition interspécifique est réduite (Bauhus et al., 2017).

2.4.2. Migration assistée et introduction de nouvelles espèces

Comme expliqué ci-dessus, la vitesse du réchauffement actuel dépasse les vitesses de migration des espèces végétales (Figure 6). Des interventions humaines peuvent aider ces espèces à migrer plus rapidement : la migration assistée d'espèces, la migration assistée de provenances et l'introduction de nouvelles espèces (Figure 7).

L'objectif de cette section vise à définir ces trois adaptations artificielles, à identifier les risques de ces adaptations ainsi que les incertitudes qui y sont liées.

Définitions et types

Tout d'abord, la migration assistée, en général, se définit comme une méthode d'adaptation aux changements climatiques dont l'objectif est d'accélérer de façon artificielle la vitesse de migration des espèces étant susceptibles d'être mieux adaptées au climat futur (Bower et al., 2024; Ducouso & Musch, 2024). Selon Bower et al. (2024), la migration assistée permet le déplacement de génotypes, de populations ou d'espèces vers des zones où l'espèce est actuellement absente, c'est-à-dire en dehors de leur aire de répartition actuelle.

L'objectif de la migration assistée est double. D'une part, elle introduit des espèces mieux adaptées afin d'assurer la durabilité de la forêt et d'une autre part, elle permet d'éviter l'extinction d'espèces dans leurs aires d'origine.

La migration assistée répond également à plusieurs enjeux. Selon Bower et al. (2024), elle permet par exemple d'atténuer la « mauvaise adaptation climatique » et de maintenir les services écosystémiques (les habitats de la faune ou le stock de carbone), les ressources économiques de la forêt, la santé des forêts et la productivité en utilisant des graines adaptées aux changements climatiques. La migration assistée permet également une diversité en termes de sélection phénologique (Ducouso & Musch, 2024).

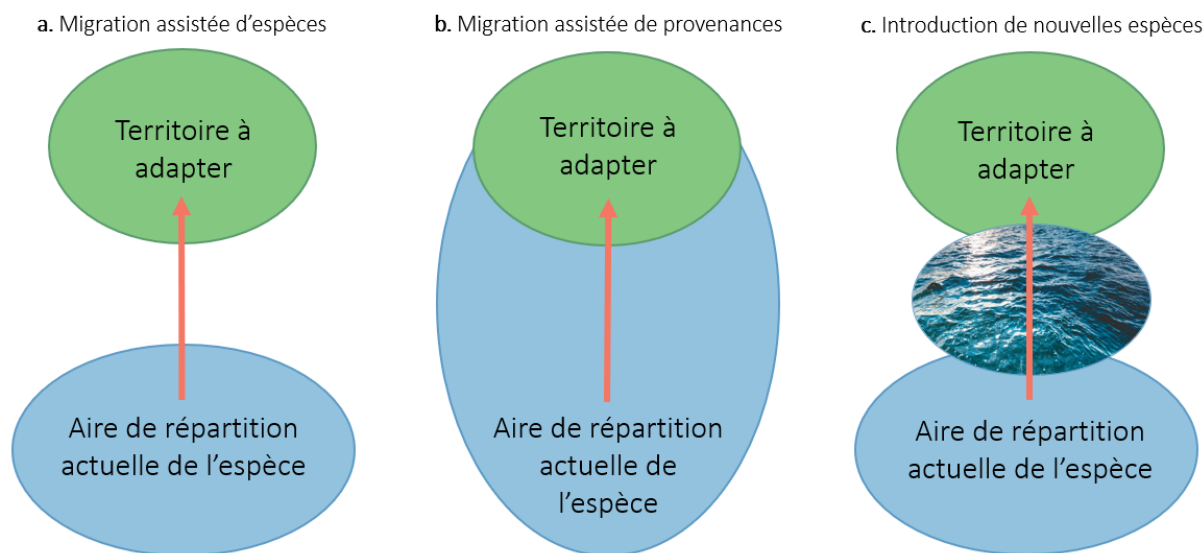


Figure 7 : Schémas des différentes stratégies d'adaptation artificielle face aux changements climatiques : a. Migration assistée d'espèces, b. Migration assistée de provenances, c. Introduction de nouvelles espèces (inspiré de de Wouters, 2022)

Ensuite, il existe deux types de migration assistée : la migration assistée d'espèces et la migration assistée de provenances. La migration assistée d'espèces (Figure 7 a.) consiste en l'introduction d'une espèce absente du territoire à adapter, originaire du sud-est de l'Europe dans un climat proche de celui qui est attendu en Belgique dans le futur (Dancart, 2023). Les espèces concernées seront donc déplacées en dehors de leur aire de répartition naturelle (Bower et al., 2024). Par exemple, la migration assistée d'espèces en Belgique s'applique pour des chênes méditerranéens (chêne de Hongrie et chêne chevelu), des sapins méditerranéens (sapin de Céphalonie et sapin de Bornmüller) ou des pins méditerranéens (pin maritime, pin de Macédoine et pin de Bosnie) (Dancart, 2023).

En revanche, la migration assistée de provenances (Figure 7 b.) est l'introduction d'une espèce étant déjà présente sur le territoire à adapter mais qui provient du sud de son aire de répartition naturelle (Dancart, 2023). Par exemple, planter du hêtre commun (*F. sylvatica*) provenant d'une graine d'Italie est une migration assistée de provenances. L'objectif de cette adaptation artificielle est d'améliorer la diversité génétique par l'introduction de gènes résistants à la sécheresse (Dancart, 2023). En effet, cela permettra à l'espèce concernée de s'adapter aux changements climatiques. Par exemple, la migration assistée de provenances en Belgique s'applique pour le chêne sessile, le hêtre, le tilleul à petites feuilles et le chêne pubescent.

La dernière adaptation possible est l'introduction de nouvelles espèces (Figure 7 c.). Dans ce cas-ci, de nouvelles espèces sont introduites alors que, théoriquement, elles ne se seraient jamais retrouvées en Belgique car elles doivent traverser l'océan pour s'installer. Le principe d'introduire de nouvelles espèces est donc différent de la migration assistée dont celle-ci a pour objectif d'introduire des espèces qui se retrouveraient probablement en Belgique dans un futur lointain. Par exemple, l'introduction de nouvelles espèces en Belgique s'applique pour le séquoia, le douglas, le tsuga ou encore le cerisier tardif.

Risques et incertitudes

Plusieurs risques sont liés à ces adaptations. D'abord, les espèces introduites peuvent être invasives, ce qui peut entraîner des conséquences néfastes sur les forêts (Ricciardi & Simberloff, 2009; Twardek et al., 2023; Vitt et al., 2010). Par exemple, les espèces invasives, telles que le cerisier tardif ou la renouée du Japon, vont coloniser massivement les forêts pouvant entraîner de la compétition et, par la suite, la suppression d'espèces indigènes et de régénération naturelle (Decocq, 2021). Le coût de leur lutte est également très élevé. Les espèces invasives peuvent également modifier la biodiversité présente dans une région, ne permettant donc plus d'accueillir la faune et la flore locale (Decocq, 2021).

De plus, les risques liés à la migration assistée augmentent généralement avec la distance de transfert, c'est-à-dire que les risques de la migration assistée d'espèces sont plus élevés que ceux des provenances (Bower et al., 2024). En effet, l'adaptation à un nouveau territoire peut être difficile pour l'espèce, pouvant mener à l'échec de la plantation.

Enfin, l'introduction de nouvelles espèces pourrait également induire l'introduction de maladies (Simler et al., 2018) ou pourrait perturber les relations symbiotiques entre espèces (Twardek et al., 2023).

Les risques présentés ci-dessus sont des risques potentiels, dont leur estimation est incertaine (Ricciardi & Simberloff, 2009). En effet, l'impact précis d'une espèce introduite varie selon l'environnement local et les interactions entre espèces.

Plusieurs dénominations sont également utilisées pour définir la migration assistée (Ste-Marie et al., 2011). En effet, plusieurs définitions sont utilisées par les auteurs, bien que ces termes s'apparentent et ne se contredisent pas. Par exemple, *assisted colonization* est un synonyme de *assisted migration*. Dans le cadre de ce mémoire, les termes utilisés précédemment pour définir la migration assistée et ses variantes se fondent sur ceux utilisés par le projet *Trees for Future*, dont la description détaillée se fera dans la prochaine section, afin de rester cohérent.

Pour conclure, il est nécessaire d'utiliser la migration assistée car ne rien faire est également un risque du point de vue des changements climatiques (Bower et al., 2024). Un des enjeux majeurs associés à cette approche est donc d'évaluer le comportement de provenances ou d'espèces dans un milieu autre que leur milieu d'origine, et où les conditions sont transitoires.

2.5. Projet *Trees for Future*

Cette section vise à décrire le projet *Trees for Future*. Les informations développées proviennent principalement du site internet de la Société Royale Forestière de Belgique ainsi que des échanges avec Julie Losseau, la responsable du projet.

2.5.1. Description générale du projet

Comme expliqué précédemment, les forêts belges sont peu diversifiées et dominées par des espèces sensibles aux changements climatiques, ce qui constitue une préoccupation majeure quant à l'adaptation des forêts. Dans le cadre des changements climatiques et dans l'objectif de préparer la forêt de demain, le projet *Trees for Future* a été mis en place par la Société Royale Forestière de Belgique en 2018 (Figure 8).



Figure 8 : Logos de la Société Royale Forestière de Belgique (à gauche) et du projet *Trees for Future* (à droite)

La Société Royale Forestière de Belgique (SRFB) est une association à but non lucratif (ASBL) ayant pour objectif d'aider les propriétaires forestiers privés en les encourageant à pratiquer une gestion durable de leur forêt et de qualité via différents services, formations, informations et projets de recherche. Conjointement, cette association réalise des projets de recherche appliqués, notamment *Trees for Future* et *MigForest*, dont ce dernier est un projet financé par l'Europe afin d'étendre la migration assistée. La SRFB propose également un programme de sensibilisation pour le grand public, nommé *Forest Friends*, afin de proposer des balades forestières, par exemple.

Le projet *Trees for Future* trouve son origine dans la nécessité de diversifier les forêts et la difficulté pour le forestier de savoir quelles espèces utiliser dans le contexte des changements climatiques. L'objectif du projet est donc d'identifier des espèces et des provenances forestières contribuant à l'adaptation des forêts aux changements climatiques, en s'appuyant principalement sur le concept de migration assistée.

Le projet *Trees for Future* est un projet qui ne dépend que de financements privés. Ces financements permettent l'encadrement du projet par l'équipe du projet ainsi que le renforcement d'outils permettant la transmission d'informations.

À ce jour, le projet inclut 30 espèces et 52 provenances réparties sur 58 sites à travers toute la Belgique. Ces parcelles sont suivies annuellement par l'équipe de volontaires afin de mesurer le taux de survie, l'accroissement ainsi que l'état sanitaire (Société Royale Forestière de Belgique, s. d.-b). Lorsque la campagne de mesure est terminée, les mesures sont doublement validées : les données sanitaires sont validées par l'OWSF et les données dendrométriques par la SRFB.

Les parcelles sont mises à la disposition de la SRFB par des propriétaires privés et publics. Une convention est donc signée de façon à préciser les obligations de chacun. Par exemple, la SRFB s'engage à mettre en place l'expérimentation au cours de la saison de plantation et à prendre en charge le financement de la fourniture des plants. Du côté du propriétaire, celui-ci s'engage à prendre en charge financièrement certains travaux comme la préparation de terrain, les frais de protection contre le gibier et l'entretien de la plantation.

De plus, des rapports d'activités annuels sont réalisés afin d'enrichir les informations initiales des différentes espèces testées. Ceux-ci comprennent notamment une brève introduction sur le projet, l'avancement ainsi que quelques résultats tels que l'espèce qui pousse le plus vite, les taux de survie et enfin quelques perspectives du projet.

Enfin, les lignes scientifiques du projet, notamment le choix d'espèces et le protocole de suivi, sont discutées et décidées avec un comité scientifique regroupant plusieurs universités belges (KULeuven, UCLouvain et ULiège), le Département d'Étude du Milieu Naturel et Agricole (DEMNA) et de son pendant flamand l'Institut voor Natuur en Bosonderzoek (INBO) et enfin le Département de la Nature et des Forêts (DNF), à travers le Comptoir Forestier.

2.5.2. Choix de sélection des espèces

À ce jour, le projet inclut 30 espèces dont 11 feuillus et 19 résineux. Une grande partie des espèces sont d'origine méridionale afin de pratiquer la migration assistée comme expliqué précédemment. Les espèces concernées par la migration assistée de provenances concernent le chêne sessile, le hêtre, le tilleul à petites feuilles et le chêne pubescent tandis que les espèces concernées par la migration assistée d'espèces concernent les chênes méditerranéens (chêne chevelu, chêne de Hongrie), les sapins méditerranéens (sapin de Bornmüller, *etc.*) et les pins méditerranéens (pin maritime, *etc.*).

La sélection des espèces s'est effectuée à l'aide de l'expérience des membres du comité scientifique, de dendrologues et de résultats obtenus par différents projets. Chaque provenance d'une espèce est plantée un minimum de trois fois, afin de pouvoir étudier l'espèce dans différentes stations.

Les espèces du projet ont été sélectionnées selon différents critères (Société Royale Forestière de Belgique, s.d.-b). Tout d'abord, leur sélection repose sur des critères écologiques notamment leur résistance à la sécheresse et aux fortes chaleurs, au froid, aux ravageurs (insectes) et aux pathogènes (maladies, champignons). Ensuite, l'impact biologique est pris en compte afin d'évaluer le caractère envahissant de l'espèce ainsi que la capacité d'accueil de la faune et de la flore. Enfin, la valeur économique est prise en considération dans le but d'évaluer leur productivité et leur qualité en bois d'œuvre permettant une production de bois durable et rentable.

3. Objectifs et démarche

Comme expliqué précédemment, les forêts belges sont peu diversifiées et dominées par des espèces sensibles dans le contexte des changements climatiques. L'adaptation et la diversification de nos forêts futures constituent donc des préoccupations majeures dans le cadre des changements climatiques. Dans ce cadre, le projet *Trees for Future*, mis en place par la Société Royale Forestière de Belgique, vise à identifier des espèces et des provenances forestières contribuant à l'adaptation des forêts aux changements climatiques, en s'appuyant principalement sur le concept de migration assistée.

De nouvelles espèces, parfois peu connues en Belgique, sont ainsi testées dans le cadre de ce projet. Cependant, leurs comportements et leurs besoins restent inconnus, ce qui soulève des questions quant à leur adaptation. C'est ici que le projet prend sens : grâce aux plantations de douze espèces cibles, ayant un suivi jusqu'à cinq ans pour certaines, il devient possible d'observer leur croissance et de mieux comprendre leurs comportements et leurs besoins. Ces données sont essentielles pour évaluer leur potentiel réel et leur installation durable en Belgique. Il est donc primordial d'établir une connaissance approfondie de ces espèces pour répondre à la problématique climatique et garantir la résilience de nos forêts.

L'objectif général de ce mémoire est donc, à travers les données collectées, d'analyser et de comparer les comportements et les besoins de ces espèces à leur stade juvénile, en Belgique.

Ce mémoire tente donc de répondre à ce premier objectif général en étudiant trois thématiques différentes : la croissance, le taux de survie et l'état sanitaire. Des liens entre ces trois thématiques seront abordés dans la discussion. Les sous-questions établies sont :

- (1) Si l'espèce a un effet significatif sur la croissance des arbres, quels sont les groupes d'espèces ayant une croissance similaire ?*
- (2) Quel est le facteur, entre le site, l'année de plantation et l'individu, qui influence le plus la croissance ?*
- (3) Pourquoi des différences de croissance entre individus d'une même espèce âgés de cinq ans sont observées, et quels facteurs expliquent cette hétérogénéité ?*
- (4) Quels facteurs du site expliquent la croissance d'une espèce ?*
- (5) Quels facteurs expliquent l'évolution du taux de survie d'une espèce ?*

L'une des hypothèses centrales de ce mémoire est que l'espèce exerce une influence significative sur la croissance des arbres. Bien que les analyses statistiques puissent confirmer cette hypothèse, il faut souligner que ce résultat est soumis à une certaine incertitude. Cependant, cette hypothèse structure certains résultats ultérieurs. Il faut donc admettre sa validité afin d'explorer plus en détail certains aspects, notamment la formation des groupes d'espèces à croissance similaire.

Des étapes claires et précises doivent être envisagées afin de répondre concrètement aux questions de recherche. Celles-ci sont présentées à la Figure 9.

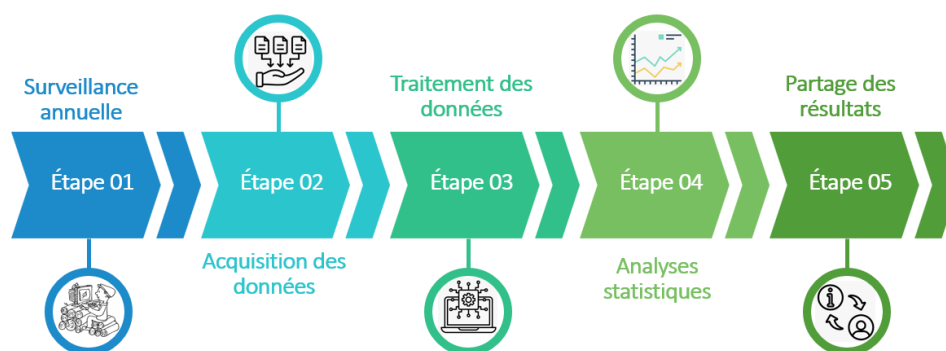


Figure 9 : Principales étapes du travail permettant de répondre aux questions initiales

La première étape, préliminaire au mémoire, consistait en la prise de mesures annuelles (mesures dendrométriques, pathologies, santé, taux de survie, *etc.*) sur le terrain ainsi que l'enregistrement de celles-ci sur *EpiCollect*¹, effectués par les volontaires. Afin de se rendre compte de la manière dont les mesures sont effectuées, j'ai également participé à la collecte des données en automne 2025 sur les parcelles expérimentales bien que ces mesures ne fassent pas partie de la base de données étudiée dans le cadre de ce mémoire. La deuxième étape consiste en l'acquisition des données, lesquelles sont répertoriées dans plusieurs tables *Excel* fournies par la SRFB. Ensuite, la mise en forme et le traitement des données (gestion des *outliers* et correction d'erreurs) ont été effectués à l'aide du logiciel *RStudio*. Enfin, des analyses statistiques ont été réalisées, notamment un modèle de croissance en hauteur.

Afin de répondre à ces questionnements, plusieurs méthodes sont utilisées, notamment un modèle de croissance pour évaluer l'influence significative de l'espèce sur la croissance des arbres. Ce modèle permet d'établir les différents groupes statistiques d'espèces à croissance similaire et d'identifier le facteur qui influence le plus la croissance. L'hétérogénéité de croissance est évaluée en comparant et en analysant les coefficients de variation à cinq ans des différentes espèces. Une analyse des sites de deux espèces (*C. atlantica* et *Q. pubescens*) est également réalisée en comparant la croissance de l'espèce sur les différents sites sur lesquels elle a été plantée. Enfin, le taux de survie est calculé de manière annuelle sur la base des mesures effectuées sur le terrain. Chaque analyse est interprétée en croisant les résultats avec les données stationnelles, climatiques et l'écologie des espèces, afin d'identifier les tendances et d'expliquer d'éventuelles anomalies.

Grâce à ces analyses, certains résultats peuvent être attendus : on s'attend à avoir des groupes de croissance différents, à ce que le site et l'espèce aient un effet significatif sur la croissance et à ce que la croissance (et le taux de survie) soit influencée par plusieurs facteurs.

Enfin, les résultats et les conclusions de ce mémoire pourraient être partagés avec l'équipe des volontaires afin de communiquer les premières conclusions.

¹ Plateforme permettant de collecter et partager des données de terrain.

4. Matériels et méthodes

4.1. Dispositif *Trees for Future*

Pour rappel, le projet *Trees for Future* a été mis en place par la SRFB en 2018. L'objectif du projet est d'identifier des espèces et des provenances forestières contribuant à l'adaptation des forêts aux changements climatiques.

4.1.1. Stratégie et structure générale

À ce jour, le projet inclut 30 espèces et 52 provenances réparties sur 58 sites en Belgique. Ces espèces ont été sélectionnées selon les critères déjà mentionnés précédemment. Le projet s'hiérarchise en branches (Figure 10). En effet, les données s'articulent sur trois échelles : *site* > *UG* > *arbre*. Le niveau clé est l'Unité Génétique (UG) car celui-ci permet de faire le lien entre les différentes échelles. Il y a, pour un site donné, une ou plusieurs UG avec plusieurs arbres par UG. Une UG est une plantation de minimum 60 ares d'une espèce d'une provenance sur un territoire donné.

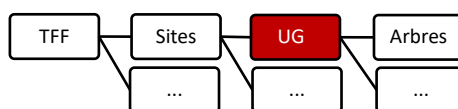


Figure 10 : Hiérarchisation du projet (Julie Losseau, 2025)

Le site (ou la parcelle) contient plusieurs UG selon la surface disponible. Comme plusieurs UG se retrouvent sur un même site homogène, il est possible de comparer ces espèces qui se développent dans des conditions similaires. Par ailleurs, chaque provenance d'une espèce est plantée un minimum de trois fois, afin de pouvoir étudier l'espèce dans différentes stations.

Le niveau étudié est celui de l'UG. Il possède un code unique permettant une identification aisée lors de l'utilisation de la base de données. Celui-ci est composé de quatre éléments : le propriétaire, le site, l'espèce et la provenance. Par exemple, BoiVieCatMen est un code UG dont le nom du propriétaire possède l'acronyme Boi, le site (Vie) est Vierves-sur-Viroin, l'espèce (Cat) est *Cedrus atlantica* et la provenance (Men) est Menerbes en France. Il n'y a donc qu'une espèce d'une provenance qui est plantée au sein d'une UG donnée.

4.1.2. La mise en place et le type de plantations

Lorsque les espèces ont été officiellement choisies, les graines ont été récoltées dans les pays et/ou les régions d'origine. Ces graines ont ensuite été semées en pépinière. Parallèlement, les sites appartenant à différents propriétaires membres de la SRFB ont été choisis selon plusieurs critères notamment une surface minimale de 60 ares et des critères topographiques, climatiques et édaphiques, qui sont adaptés aux espèces testées. Les plants provenant des

pépinières ont pu être repiqués sur ces parcelles. Les plants peuvent être plantés à racines nues ou en godets et peuvent également disposer d’une protection contre le gibier, soit individuelle, soit collective.

Afin de garantir la pérennité de la plantation, le propriétaire doit signer une convention : celle-ci l’engage à être responsable de la plantation, en réalisant des interventions d’entretien comme le dégagement ou la taille de formation tandis que la SRFB offre les plants.

Il existe deux types de plantation : en plein et en cellules (*klumps*). Lors de la plantation en plein (Figure 11), une UG contiendra 400 arbres plantés avec un écartement de 2 x 2,5 m sur un total de 20 ares. Au centre de l’UG, une placette permanente est matérialisée et contiendra 50 arbres sur lesquels seront récoltées annuellement des données dendrométriques et sanitaires. La placette permanente est au centre de l’UG afin d’éviter les effets de bordure. Elle permet de suivre les mêmes individus ainsi que leur évolution. Pour ce faire, chaque individu doit être identifié à l’aide d’un numéro unique, grâce à des étiquettes bleues numérotées. La matérialisation des placettes sera expliquée au point suivant.

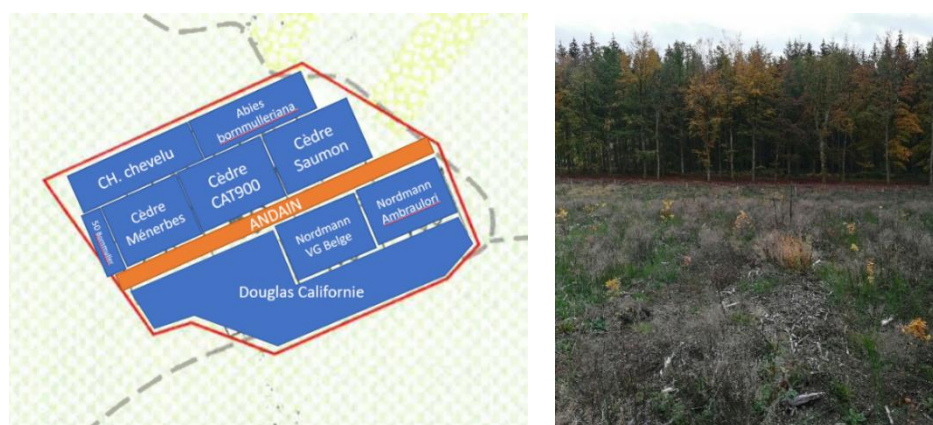


Figure 11 : Exemple de dispositif de plantation en plein (Julie Losseau, 2025)

Lors de la plantation en *klumps* (Figure 12), les cellules sont composées de 25 arbres à écartement de 1 x 1 m dont la placette permanente au centre compte neuf arbres. Dans ce dispositif, au moins cinq *klumps* doivent être plantés pour former l’UG. L’objectif est de mettre en œuvre les pratiques sylvicoles aujourd’hui recommandées, qui favorisent la diversification des forêts en évitant la coupe rase. Il s’agit également d’observer le comportement des différentes espèces dans ce type de modalité sylvicole.



Figure 12 : Exemple de dispositif de plantation en cellules (*klumps*) (Julie Losseau, 2025)

4.1.3. Suivi post-plantation

Lorsque la plantation a été réalisée, un suivi post-plantation au printemps, vers mai-juin, est réalisé afin d'évaluer l'état de la plantation ainsi que de matérialiser la placette permanente de l'UG. La placette permanente se situe préférentiellement au centre de l'UG, dont le début est localisé par un piquet en bois.

L'état de la plantation est quant à lui évalué sur base de plusieurs critères. D'une part, il y a la réception du chantier qui permet d'évaluer la qualité de la plantation et reprend la verticalité du plant, la profondeur du plant, la compaction, l'espacement entre les plants (trop ou pas assez) et l'état du plant (sain, atteint, mort ou absent). D'autre part, les symptômes et les problèmes qui touchent les arbres sont également identifiés. Les champs qui composent la fiche de printemps sont repris dans l'Annexe D.

4.1.4. Suivi annuel

Chaque année, en automne, des suivis sont effectués au sein des placettes permanentes avec l'aide d'une équipe de volontaires. Les fiches de terrain concernant le protocole de suivi pour les plantations de moins de cinq ans sont disponibles en Annexe E.

Les variables mesurées

Plusieurs variables sont mesurées lors du suivi d'automne. D'abord, un état général de la placette est évalué en identifiant la présence ou non de végétation spontanée (herbacées, fougères, ronces, genets, ligneuses) ainsi que sa concurrence avec les arbres.

Ensuite, sur chacun des arbres de la placette, est mesurée la hauteur totale de l'arbre en centimètres à l'aide d'une perche télescopique. La hauteur totale d'un arbre est définie comme la distance entre la base de l'arbre et son sommet. Le diamètre à 130 cm est également mesuré avec un pied à coulisse lorsque l'arbre fait plus de 150 cm de hauteur.

De plus, la conformation est évaluée à l'aide de deux critères. Le premier est la dominance apicale, c'est-à-dire qu'il s'agit d'examiner la présence ou non de fourche, et le second est l'inclinaison de plus de 20°. Dans le cas de protection gibier individuelle, l'absence d'une protection doit être notifiée. La présence de dégât apical doit également être notifiée.

Enfin, l'état sanitaire sera évalué. Pour cela, chaque arbre de la placette sera identifié comme sain, absent, mort ou atteint. Dans le cas d'un arbre atteint, celui-ci présente des dégâts biotiques ou abiotiques. Afin de les identifier correctement, l'identification des problèmes et des symptômes utilisent le protocole de l'OWSF (Annexe F et G).

Fréquence de mesure

Les mesures sont prises chaque année, et ce durant la période d'automne (septembre-octobre). Cette courte période d'échantillonnage a été retenue pour deux raisons. La première repose sur la période de végétation. En effet, à ce stade-ci, la croissance en hauteur est terminée ce qui permet d'effectuer les mesures et comparer les mesures entre années en limitant les erreurs liées à une mesure effectuée en cours de saison de végétation. La seconde

est justifiée par les feuilles. En effet, à cette période, les feuilles sont encore présentes ce qui permet d'identifier clairement les symptômes sanitaires et les maladies. Cela permet également d'obtenir un bilan sanitaire complet de la saison de végétation.

Volontaires

Le projet repose sur le principe de la science participative. Selon le Centre de Recherche sur la Biodiversité et l'Environnement (s. d.), la science participative est un moyen de faire de la recherche scientifique à l'aide de personnes qui ne sont pas professionnelles dans le domaine de la recherche et qui collaborent de façon active à la production de connaissances. Dans le cadre du projet, les mesures sont réalisées par un réseau de volontaires formés.

4.1.5. Stockage et organisation des données

Après avoir récupéré les données sur le terrain, celles-ci ont pu être enregistrées par les volontaires sur la plateforme *EpiCollect*. Cela permet de récupérer l'ensemble des informations sous un même format afin de créer la base de données. À la fin d'une campagne de mesures, les mesures sont doublement validées : les données sanitaires sont validées par l'OWSF et les données dendrométriques par la SRFB.

Des tables *Excel* ont pu être créées sur base de ces données de terrain. Leur structure est illustrée en Annexe H. À titre informatif, les tables contiennent des données par site et par UG telles que la localisation du site, une description de la station et des informations sur la plantation. Il y a également des tables sur le suivi post-plantation effectué la première année, le suivi d'automne et des données ponctuelles telles que les regarnissages, les travaux et les éclaircies effectués.

4.2. Espèces et sites d'étude

Les douze espèces parmi les 30 espèces du projet *Trees for Future* retenues dans le cadre du mémoire sont reprises dans le Tableau 2. L'étude porte sur l'ensemble des plantations de ces douze espèces, indépendamment de l'âge. En effet, cela permet un recul suffisant pour réaliser des analyses statistiques robustes. Il est possible de consulter en Annexe I des tableaux récapitulatifs des douze espèces plantées dans chaque site ainsi que leur provenance, l'année de plantation, le nombre d'UG par site, etc. Un portfolio de photos se trouve également en Annexe J illustrant les douze espèces.

Tableau 2 : Espèces concernées par le mémoire incluses dans le projet *Trees for Future* – noms latins et vernaculaires et aires de répartition actuelles

Nom latin	Nom vernaculaire	Aire de répartition
<i>Abies bornmuelleriana</i>	Sapin de Bornmüller/Turquie	Asie (nord de la Turquie)
<i>Abies nordmanniana</i>	Sapin de Nordmann	Asie (Caucase)
<i>Calocedrus decurrens</i>	Calocèdre	Ouest de l'Amérique du Nord
<i>Cedrus atlantica</i>	Cèdre de l'Atlas	Afrique du Nord
<i>Pinus nigra</i>	Pin noir	Au bord du nord de la Méditerranée
<i>Pinus pinaster</i>	Pin maritime	Au bord de l'ouest de la Méditerranée
<i>Pinus sylvestris</i>	Pin sylvestre	Europe
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglas	Ouest de l'Amérique du Nord
<i>Quercus cerris</i>	Chêne chevelu	Europe Sud-Est
<i>Quercus petraea</i>	Chêne sessile	Indigène/Europe
<i>Quercus pubescens</i>	Chêne pubescent	Indigène/Europe
<i>Tilia cordata</i>	Tilleul à petites feuilles	Indigène/Europe et Asie du Nord

Il convient également de localiser les sites sur une carte des zones bioclimatiques (Figure 13). En 2015, le Fichier écologique des essences a été amélioré et a défini dix zones bioclimatiques en Wallonie. Ces zones se distinguent par leurs valeurs moyennes de longueur de la saison de végétation, de précipitations annuelles et de température moyenne annuelle (Tableau 3).

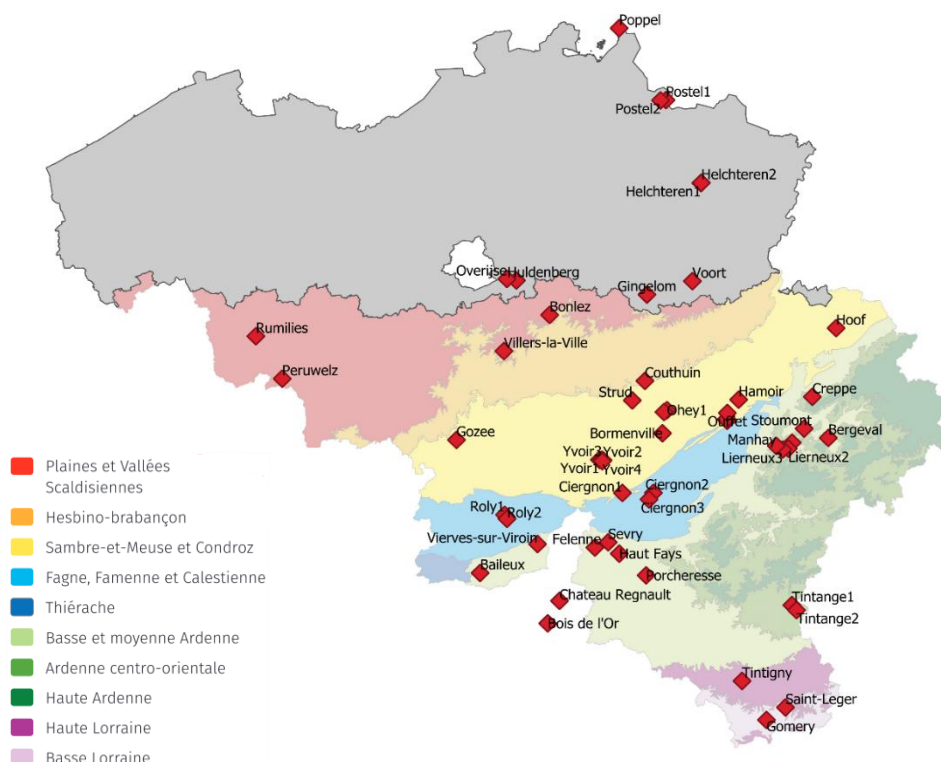


Figure 13 : Localisation des sites (carreaux rouges) du projet *Trees for Future*, selon les différentes zones bioclimatiques (J.Losseau, 2025)

Tableau 3 : Moyenne des principaux indicateurs climatiques pour les dix zones bioclimatiques en Wallonie (Van der Perre et al., 2015)

	Longueur de la saison de végétation (jours)	Précipitations annuelles (mm)	Température moyenne annuelle (°C)	Indice de Lang ² (xéridité) (mm.°C ⁻¹)	Température maximale absolue (°C)	Température minimale absolue (°C)
Plaines et Vallées Scaldisiennes	187	859	10,4	83,5	36,2	-14,5
Hesbino-Brabançon	182	864	10,0	87,6	35,7	-16,5
Sambre-et-Meuse et Condroz	177	937	9,6	98,9	35,8	-17,8
Fagne, Famenne et Calestienne	174	976	9,5	104,5	36,2	-18,3
Thiérache	170	1145	9,2	126,1	35,9	-18,5
Basse et moyenne Ardenne	1163	1170	8,7	136,8	35,8	-18,9
Ardenne centro-orientale	56	1136	8,1	141,8	35,3	-19,8
Haute Ardenne	151	1219	7,7	161,4	34,9	-20,6
Haute Lorraine	163	1179	8,9	135,1	36,9	-17,4
Basse Lorraine	168	1119	9,3	122,8	37,5	-17

Afin de synthétiser l'écologie des douze espèces, un tableau détaillé et comparatif a été élaboré dans le cadre de ce mémoire, à partir de plusieurs sources (Annexe K) (Aussenac, 2002; Centre National de la Propriété Forestière, s. d., 2023; *Climate-Vegetation Atlas of North America*, s. d.; *Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.; *Fichier écologique des essences*, s. d.; *Graines et plants forestiers*, 2025; H. H. Cochard et al., 2016; Dancart, 2023; Dumé et al., 2018; Fady & Scotti-Saintagne, 2023; Fauconnier, 2009; Nageleisen et al., 2010; Société Royale Forestière de Belgique, s. d.-a). La sensibilité à différentes contraintes ainsi que les besoins en eau, en lumière et en températures y sont répertoriés.

4.3. Préparation et correction des données

À partir de cette section, les différentes étapes présentées ont été réalisées dans le cadre de ce mémoire. Le traitement de données passe par plusieurs étapes en s'aidant de quelques logiciels tels que *EpiCollect*, *Excel*, *RStudio* et *Word*.

4.3.1. Préparation de la base de données

Une première étape a consisté en l'harmonisation et la fusion des différentes tables afin d'y croiser plusieurs informations liées notamment à l'espèce, au code UG, au taux de survie et à la hauteur. Ensuite, un filtrage a été mis en pratique afin de ne conserver que les douze espèces dans le cadre du mémoire. Une vérification et une correction en lien avec des doublons ont également été effectuées. La période du suivi considérée est de 2020 à 2024, bien que

² Rapport entre la pluviométrie annuelle et la température moyenne annuelle.

certaines plantations aient été plantées en 2018-2019. Enfin, l'âge des arbres a été calculé en fonction de l'année de plantation. En effet, la première valeur de hauteur utilisée est celle de la première saison de végétation. Par exemple, une UG plantée en 2019-2020 suivie de 2020 à 2024 aura des arbres âgés d'un an en 2020, deux ans en 2021, etc.

4.3.2. Gestion des valeurs aberrantes

Contexte et objectifs

Dans la base de données, des erreurs peuvent être relevées à la suite de la réalisation de graphiques de la hauteur en fonction de l'âge pour une UG donnée. L'objectif principal est d'évaluer la cohérence des données de hauteur des arbres mesurées sur plusieurs années, afin d'identifier les valeurs aberrantes (*outliers*). Tous les calculs se font par UG et par année. La croissance annuelle en hauteur, soit la différence de hauteur de chaque arbre d'une UG, se calcule toujours de la manière suivante :

$$\Delta \text{Hauteur} = \text{Hauteur}(t) - \text{Hauteur}(t - 1) \quad [1]$$

Tout d'abord, il existe différents types de données dont des *outliers*. Les *outliers* correspondent à des ΔH négatifs, nuls ou anormalement élevés entre deux années consécutives. En effet, ceux-ci ont été identifiés comme suit notamment car une perte de hauteur entre deux années consécutives n'est biologiquement pas possible sauf en cas de casse, de dégât apical ou de mortalité. Une erreur de mesure peut également être à l'origine de ce type d'*outlier*. Le Tableau 4 reprend le type de données identifié dans la base de données ainsi que leur condition d'existence, les causes possibles ainsi que le traitement qui sera réalisé par la suite.

Tableau 4 : Type de données avec leur condition d'existence, les causes possibles et le traitement réalisé

Type de données	Condition	Causes possibles	Traitement réalisé
Données certaines	$\Delta H > 0$ p.ex H = 27-30-35 cm	Croissance normale	Non transformée
Outliers incertains	$\Delta H < 0$ et H = 0 p.ex H = 27-0-35 cm	Mauvais encodage, arbre noté comme absent/mort	Suppression ou interpolation
Outliers certains	$\Delta H < 0$ et H $\neq 0$ p.ex H = 27-25-35 cm	Erreur de mesure/encodage ou cause biotique/abiotique	Suppression ou interpolation
Outliers nuls	$\Delta H = 0$ p.ex H = 27-27-35 cm	Erreur de mesure, arrêt de croissance, arbre absent deux années consécutives	Suppression ou interpolation
Outliers élevés	$\Delta H \gg 0$ (lorsque $\Delta H >$ seuil)	Erreur d'encodage ou de mesure, phénomène réel (croissance exceptionnellement vigoureuse)	Suppression ou interpolation
Données corrigées	<i>Outlier</i> élevé suivi d'un négatif	Comptabilisation erronée d' <i>outlier</i> (voir ci-dessous l'exemple)	<i>Outlier</i> négatif devient une donnée corrigée
	<i>Outlier</i> négatif suivi d'un élevé	Comptabilisation erronée d' <i>outlier</i> (voir ci-dessous l'exemple)	<i>Outlier</i> élevé devient une donnée corrigée

Typologie et identification des données

Selon le Tableau 4, les données certaines sont des données pour lesquels les ΔH sont positifs. Les *outliers* incertains concernent les données pour lesquels le ΔH est négatif et montre une hauteur nulle à la deuxième mesure. Les *outliers* certains montrent quant à eux un ΔH négatif sans hauteur nulle dans les trois mesures. Les *outliers* nuls concernent les ΔH nuls, soit deux valeurs de hauteur consécutives identiques.

Pour la détection des *outliers* avec un ΔH trop élevé, la procédure est la suivante. Pour rappel, tous les calculs se font par UG et par année. La première étape consiste à ne garder que les données certaines, pour lesquels ΔH est positif. Ensuite, les moyennes et les écarts types de hauteur et de ΔH sont calculés. Enfin, un seuil est défini sur la base du z-score indiquant de combien d'écarts types une valeur est éloignée de la moyenne (*Détection et gestion des outliers*, s. d.).

Pour le ΔH anormalement supérieur, les ΔH sont identifiés comme *outliers* lorsque celui-ci dépasse le seuil égal à $\mu(\Delta H) + 2 \times \sigma(\Delta H)$. Les ΔH anormalement inférieurs égaux à $\mu(\Delta H) - 2 \times \sigma(\Delta H)$ ne seront pas pris en compte, car cela n'est, dans ce cas-ci, pas considéré comme une valeur aberrante. En effet, un arbre donné peut très bien croître plus lentement que son voisin, en raison de l'apport en lumière, en eau, du type de sol, etc. Les valeurs anormalement élevées sont plus souvent considérées comme des *outliers*.

En faisant cette méthodologie, des mesures peuvent être considérées comme *outliers* alors que ce n'est pas le cas. En effet, il est possible d'être face à deux cas spéciaux. Par exemple à la Figure 14, lorsqu'un ΔH élevé est suivi d'un ΔH négatif, le ΔH négatif devient une donnée corrigée et seul le ΔH élevé est considéré comme *outlier*. À l'inverse, lorsqu'un ΔH négatif est suivi d'un ΔH élevé, le ΔH élevé, noté précédemment comme un *outlier* élevé, devient une valeur corrigée et le ΔH négatif reste *outlier*.

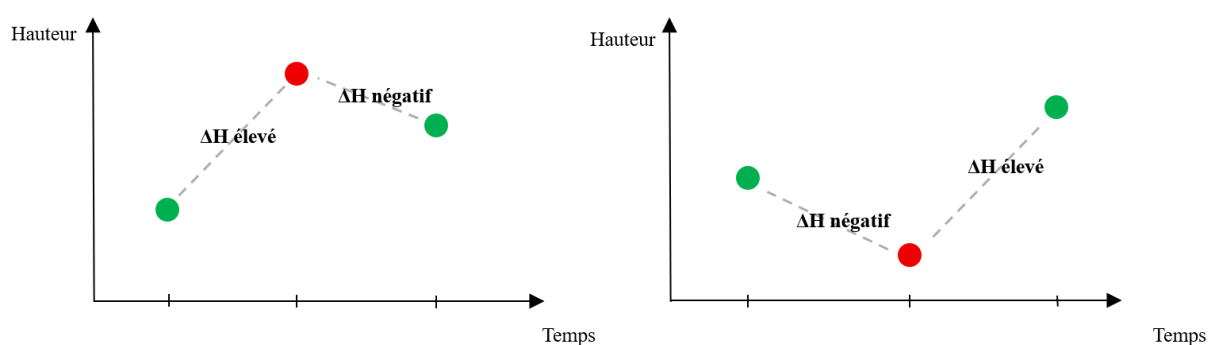


Figure 14 : Visualisation des cas spéciaux lors de la gestion des *outliers*

Cette approche permet de ne retenir que les vrais *outliers*. C'est pour cette raison que ces cas (dernier point vert sur les figures) seront supprimés de la liste d'*outliers* et seront notés comme des données « corrigées », soit des données qui sont finalement certaines.

Traitement réalisé selon le type de données

Plusieurs traitements sont envisagés sachant que chaque donnée possède une typologie (Tableau 4). Le premier traitement est de laisser les données certaines et les données corrigées telles qu'elles sont puisqu'elles sont correctes.

Le deuxième traitement concerne les quatre types d'*outliers*. Il consiste à réaliser une interpolation linéaire ayant pour but d'estimer la hauteur manquante par la moyenne entre les années t-1 et t+1. Avant d'appliquer la deuxième méthode, une vérification est effectuée : le ΔH théorique maximum (via le seuil) et ΔH interpolé (calculé seulement avec les données certaines) sont comparés. Si le ΔH interpolé est inférieur au seuil, l'interpolation sera retenue comme méthode de correction fiable. Cependant, certaines données sont supérieures à ce seuil, celles-ci seront donc définitivement supprimées de la base de données.

Enfin, il est possible d'avoir des *outliers* qui ne possèdent pas de valeurs avant et/ou après. Leur valeur de hauteur est donc supprimée. Par exemple, pour un arbre donné, les valeurs de ΔH sont 15-0-NA-NA qui deviennent 15-NA-NA-NA, où « NA » signifie non disponible.

Représentation et schéma récapitulatif

En conclusion, les douze espèces sont représentées, sur un graphique reprenant le suivi de la moyenne de hauteur des arbres à travers le temps. Pour cela, la moyenne et l'écart type sont calculés par espèce et par âge, toutes UG confondues. Un organigramme reprend le cheminement expliqué lors de la gestion des *outliers* à la Figure 15.

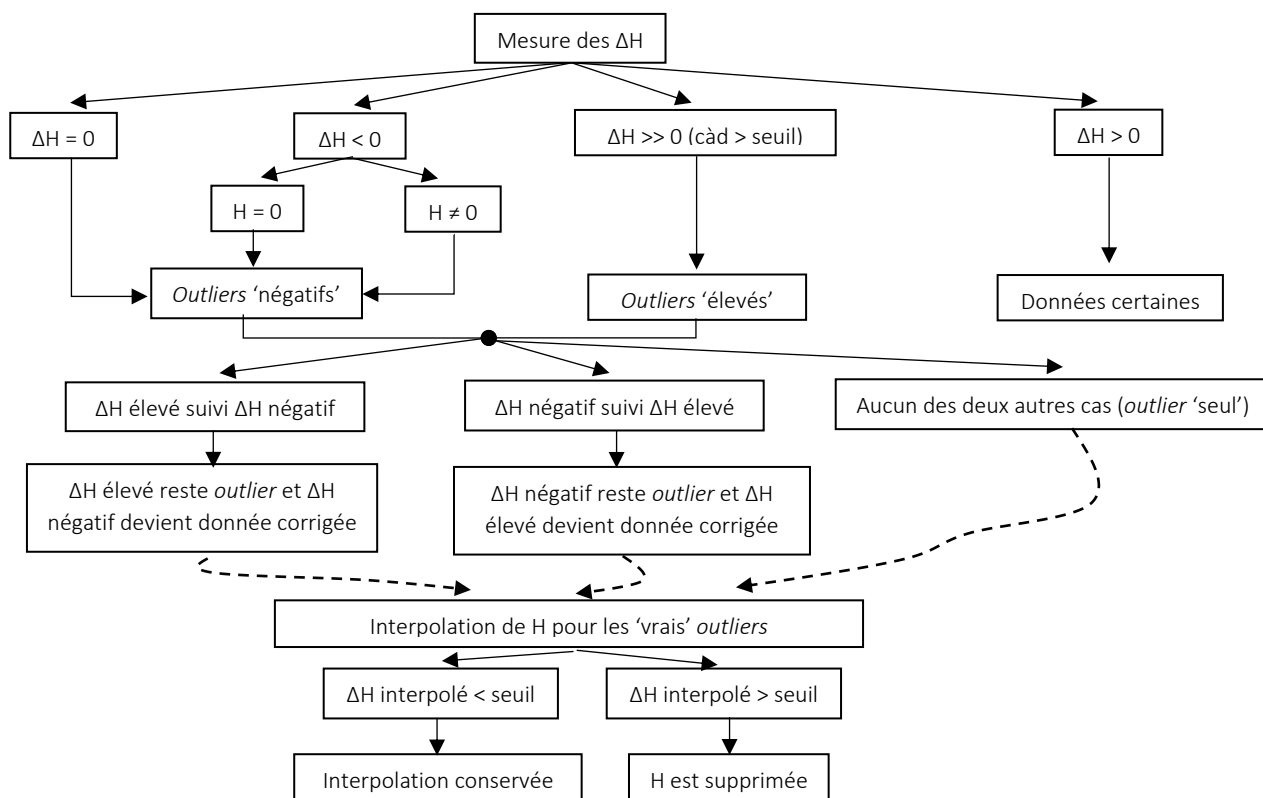


Figure 15 : Organigramme du cheminement expliqué lors de la gestion des *outliers*

4.4. Analyses des données

Les analyses statistiques passent par plusieurs étapes en s'aidant de quelques logiciels tels que *RStudio*, *Excel* et *Word*.

4.4.1. Croissance en hauteur

Un modèle linéaire de croissance est développé afin d'identifier les facteurs influençant le plus la croissance et vérifier l'hypothèse selon laquelle celle-ci dépend de l'espèce. Dans le cas où cette hypothèse est confirmée, l'objectif est d'identifier des groupes d'espèces présentant une croissance similaire. Le modèle retenu est une régression linéaire multiple appliquée à la relation entre la hauteur (H) et l'âge (t) des arbres :

$$H(t) = a + b \times t \quad [2]$$

Ce modèle repose sur l'hypothèse d'une relation linéaire entre la hauteur et l'âge, et par conséquent un accroissement en hauteur constant.

Quelques notions de vocabulaire

La régression linéaire multiple permet d'introduire des variables dépendantes (paramètre du problème variant sous l'influence de la variable indépendante, soit y) et indépendantes (paramètre variant sans être influencé par les autres paramètres du problème, soit x). Les objectifs du modèle sont de prédire la variable dépendante à partir d'un groupe de variables indépendantes et de quantifier cette relation.

Le modèle permet d'isoler l'impact d'une variable en ajustant les autres variables. Dans le cadre du mémoire, il est nécessaire d'ajuster le modèle avec les variables concernant le site et l'année de plantation pour éviter de biaiser l'analyse. Par exemple, une espèce qui serait systématiquement plantée sur une meilleure station est avantagée.

Les variables peuvent être nominales, c'est-à-dire des données qualitatives comme l'espèce, ou ordinales, c'est-à-dire des données numériques comme le niveau hydrique et trophique.

Les variables qui composent le modèle sont les variables fixes et aléatoires. Les variables fixes sont connues de façon explicites et quantitatives. En effet, elles peuvent être connues et déterminées. Le modèle permet d'interpréter directement l'effet des variables fixes sur la hauteur. Cependant, dans ce cas-ci, une espèce donnée est plantée sur plusieurs sites à des années différentes dont une UG possède plusieurs arbres réagissant différemment. Il faut donc prendre en compte cette classification et le lien entre les données. C'est pourquoi des variables aléatoires s'intègrent dans le modèle. Les variables aléatoires sont les variables qu'il n'est pas possible d'expliquer en détail. En effet, ces variables influencent le modèle mais elles ne sont pas possibles de fixer et de quantifier. Donc, les variables aléatoires prennent compte de l'ensemble de la structure des données afin d'éviter des biais notamment liés au site.

Définition du modèle global

L'objectif du modèle est de rendre compte de l'effet de l'espèce sur la hauteur sur la période de mesure (paramètre *a*) ainsi que de son effet sur l'accroissement annuel en hauteur (paramètre *b*). Le modèle dépend d'une part d'effets fixes, d'effets aléatoires et de résidus. Les variables fixes concernent l'espèce et l'âge tandis que les variables aléatoires sont le site, l'année de plantation et l'arbre c'est-à-dire l'individu en tant que tel car chaque individu répond différemment à un stimulus (Tableau 5). Les paramètres *a* et *b* pourront varier selon la variable.

Tableau 5 : Classification des variables utilisées dans le modèle

Variable	Fixe/Aléatoire	Nominale/Ordinale	Exemples
Espèce	Fixe	Nominale	<i>Cedrus atlantica</i> , etc.
Âge	Fixe	Ordinale	1, 2, 3, 4 et 5 ans
Site	Aléatoire	Nominale	Hamoir, etc.
Année de plantation	Aléatoire	Ordinale	2019-2020, 2020-2021, etc.
Arbre	Aléatoire	Nominale	BoiVieCatCat.1, BoiVieCatCat.2, etc.

Plusieurs modèles différents ont été réalisés afin de choisir le meilleur modèle (Annexe L). En effet, la base de données ne se limite pas à la mesure de hauteur, elle contient également plusieurs informations. Cela permet de tester les différences de croissance entre espèces, tout en prenant en compte les autres sources de variabilité et la structure du jeu de données.

Le choix du meilleur modèle s'effectue selon sa pertinence écologique, la qualité de son ajustement et une analyse AIC, dont le meilleur modèle retenu possède l'AIC le plus faible, c'est-à-dire le meilleur compromis entre la qualité de l'ajustement et la complexité du modèle (« Qu'est-ce que », s. d.). Sur la base du modèle retenu, le R^2 du modèle appelé coefficient de détermination est calculé afin de connaître les variances expliquées pour les effets fixes égaux à R^2 marginal, les effets aléatoires égaux à la différence entre le R^2 conditionnel et le R^2 marginal et les résidus égaux à 1 moins le R^2 conditionnel. Les p-valeurs associées ainsi que l'estimation des paramètres seront également identifiées.

Enfin, le modèle permet également de regrouper des espèces selon leur croissance à l'aide de la fonction *emtrends*. Cette fonction va estimer les pentes pour chaque espèce, c'est-à-dire la vitesse de croissance, puis va les comparer deux à deux afin de tester si les espèces présentent des croissances significativement différentes.

Modèle de l'hétérogénéité de croissance

L'hétérogénéité de la croissance au sein d'une espèce est évaluée à partir du coefficient de variation par UG pour celles âgées de cinq ans. Cette analyse indique si une espèce est homogène au sein d'un site et entre sites afin d'évaluer sa régularité. Le coefficient de variation (Équation [3]) est le rapport entre l'écart type et la moyenne. Il mesure l'hétérogénéité de croissance au sein d'une UG. En effet, si celui-ci augmente alors l'hétérogénéité augmente. Un *boxplot* est également réalisé dans le but de comparer les coefficients de variation des espèces.

$$CoefVar5 = \frac{\sigma}{\mu} \quad [3]$$

Le modèle du coefficient de variation à cinq ans (Équation [4]) prend en compte de l'espèce en effet fixe ainsi que du site en effet aléatoire.

$$CoefVar5 \sim Esp\grave{e}ce + (1 | Site) \quad [4]$$

L'analyse de l'effet du site sur la croissance

L'objectif est d'analyser de façon approfondie l'effet du site sur la croissance d'une espèce. Pour cela, un modèle est réalisé seulement pour les espèces avec assez de répétitions.

Le modèle est appliqué par espèce, et la variable dépendante est l'accroissement. L'accroissement annuel se calcule en divisant la hauteur à trois ans par trois ans comme l'Équation [5] en supposant une relation linéaire (cf. 4.4.1). L'ensemble des hauteurs à trois ans sont retenues pour l'analyse, d'une part, car les deux espèces sont plantées sur plus de sites lorsqu'elles ont trois ans par rapport à cinq ans et, d'autre part, étant donné que la plantation influence moins la hauteur à trois ans qu'à un an.

$$\Delta H = \frac{H3}{3} \quad [5]$$

L'effet du site sur la croissance est testé à l'aide du modèle de l'Équation [6]. Le site est donc une variable fixe tandis que l'UG est une variable aléatoire.

$$\Delta H \sim Site + (1 | Code\ UG) \quad [6]$$

Ensuite, afin d'identifier quel site diffère significativement de quel site, la fonction *emmeans* estime les moyennes ajustées permettant au test de *Tukey* de faire des comparaisons multiples, c'est-à-dire comparer deux à deux les sites afin de tester si ceux-ci présentent des croissances significativement différentes. Cela permet d'identifier des groupes de sites à croissance similaire.

Afin de mieux explorer l'effet du site sur la croissance, une analyse qualitative est effectuée. Celle-ci consiste à comparer les données stationnelles et les descriptions individuelles de chaque site afin de comprendre d'où proviennent les différences de croissance entre site. Pour cela, un parallèle avec l'écologie des espèces et des *boxplots* sont réalisés.

Un modèle de croissance a également été réalisé afin de tester les variables du site en effet fixe (altitude, niveau hydrique, niveau trophique et l'exposition). L'altitude est retenue par rapport à la zone bioclimatique car l'altitude est plus simple à implémenter dans le modèle et est un bon indicateur du climat. L'altitude a été calculée sur la base des coordonnées GPS. En effet, celles-ci ont été encodées dans WalOnMap afin d'obtenir l'altitude précise du site (*WalOnMap / Géoportail de la Wallonie*, s. d.). Cependant, comme le nombre de sites est faible et que la variabilité est élevée au sein de chaque site, aucune variable n'a été significative.

4.4.2. Taux de survie

Une analyse approfondie du taux de survie peut être réalisée. L'analyse se porte uniquement sur les UG plantées en 2019-2020 (Annexe M). Comme mentionné précédemment, les arbres d'une UG sont comptabilisés dans différentes catégories de statut : sain, atteint, absent ou mort. Le taux de survie annuel se calcule donc via l'Équation [7]. Il se calcule comme la somme

du nombre d'arbres sains et atteints, en divisant cette somme par le nombre total d'arbres de la placette permanente d'une UG. Ce calcul correspond à un taux de survie cumulé, c'est-à-dire qu'un arbre mort une année donnée est comptabilisé chaque année comme mort. Les taux de survie sont calculés par UG, puis sont représentés dans une figure via des moyennes annuelles par espèce.

$$\text{Taux de survie} = \frac{\text{Sains} + \text{Atteints}}{\text{Total}} \times 100 \quad [7]$$

4.4.3. Conformation

La conformation (et l'état sanitaire au point suivant) est étudiée uniquement de façon qualitative. Dans cette perspective, les données observées sont analysées et comparées graphiquement, par espèce.

Concernant la figure sur la conformation, seule la dernière année du suivi (2024) est retenue, peu importe l'âge de la plantation. Pour chaque UG, le nombre total d'arbres est similaire à celui utilisé pour le calcul de la survie. Lors des suivis, les volontaires comptabilisent, par UG, le nombre d'arbres présentant une inclinaison et/ou une fourche. Les proportions d'arbres présentant ces défauts sont ensuite calculées par espèce en rapportant le nombre d'arbres concernés au nombre total d'arbres, toutes UG confondues.

4.4.4. État sanitaire

La répartition des différents statuts sera également représentée. Pour cela, le nombre d'arbres de chaque statut (sain, atteint, absent et mort) est additionné pour l'ensemble des UG. Ceci est réalisé pour chaque espèce et pour chaque année du suivi. La part de chaque statut est calculée en divisant le nombre d'un statut par le nombre total d'arbres d'une espèce et d'une année donnée.

En ce qui concerne l'analyse de l'état sanitaire, deux années contrastées sont étudiées afin de se rendre compte de l'effet du climat sur les symptômes et les problèmes des espèces. Les deux années choisies sont l'année sèche 2022 et l'année humide 2024, prenant en compte de tous les âges de plantation. La distribution des différents problèmes (maladies connues et identifiables) s'effectue parmi la part des arbres atteints. En effet, la part de chaque problème se calcule en multipliant la part d'arbres atteints d'une espèce d'une année (issue du calcul du statut du paragraphe précédent) par le nombre d'arbres atteints d'un problème à une année, le tout divisé par le nombre total d'arbres atteints d'une espèce d'une année tous problèmes confondus.

La distribution des symptômes (maladies inconnues codifiées) suit la même logique. En effet, la part de chaque symptôme se calcule en divisant le nombre d'arbres touchés par un symptôme par le nombre total d'arbres atteints. Ceci est réalisé pour chaque espèce et pour chaque année du suivi. Parallèlement, les symptômes sont également distingués selon l'organe touché (la feuille, la tige, le tronc), exprimé également en proportion.

5. Résultats

La partie Résultats présentée ci-dessous est obtenue selon la méthodologie expliquée précédemment et se compose de cinq grandes parties. Tout d'abord, l'étude sur les valeurs aberrantes est présentée montrant la problématique des *outliers* ainsi que leur proportion dans la base de données. Ensuite, les résultats concernant la croissance sont exposés. Ils concernent notamment le choix du modèle de croissance retenue, les groupes d'espèces à croissance similaire, l'analyse de l'hétérogénéité de croissance ainsi que l'effet du site sur la croissance de *Quercus pubescens* et *Cedrus atlantica*. Enfin, les résultats du taux de survie, de la conformation ainsi que de l'état sanitaire sont illustrés.

5.1. Les valeurs aberrantes

Afin d'avoir un aperçu du jeu de données, une analyse des trajectoires individuelles a été effectuée pour plusieurs sites. La Figure 16 et la Figure 17 montrent les courbes d'évolution des hauteurs (en centimètres) de chaque individu d'une UG en fonction de l'âge pour deux espèces différentes. Par exemple, Hamoir a été suivi de façon rigoureuse, ce qui permet d'avoir des évolutions probables de hauteur en fonction de l'âge (Figure 16 a.). En effet, quasi chaque individu voit leur hauteur augmenter chaque année. Après la correction des valeurs aberrantes, les trajectoires individuelles changent très légèrement (Figure 16 b.). En effet, quelques mesures ont été supprimées, notamment à l'âge de cinq ans.

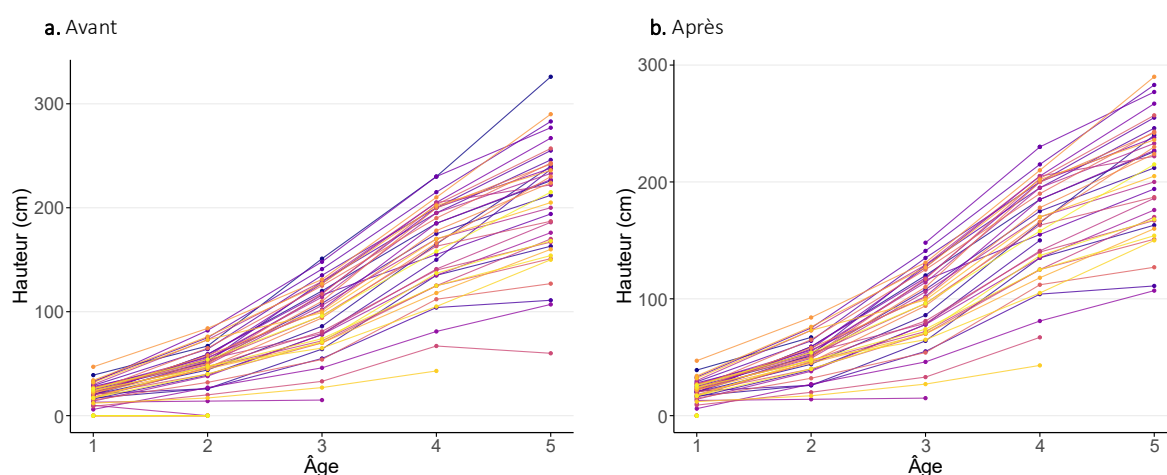


Figure 16 : Courbes d'évolution des hauteurs (en cm) de chaque individu d'une UG en fonction de l'âge pour *Cedrus atlantica* dans le site de Hamoir a. Avant la correction des valeurs aberrants b. Après la correction

En revanche, Postel possède une plantation en cellules de chênes pubescents (Figure 17). Les trajectoires apparaissent plus entremêlées, notamment en raison du type de plantation. En effet, l'identification de l'individu est plus complexe surtout si les étiquettes ont été enlevées. Cela peut induire des baisses de hauteurs dans les trajectoires individuelles (Figure 17 a.). Après

la correction (Figure 17 b.), les modifications apportées pour cette UG sont plus importantes que celles observées chez *C. atlantica*.

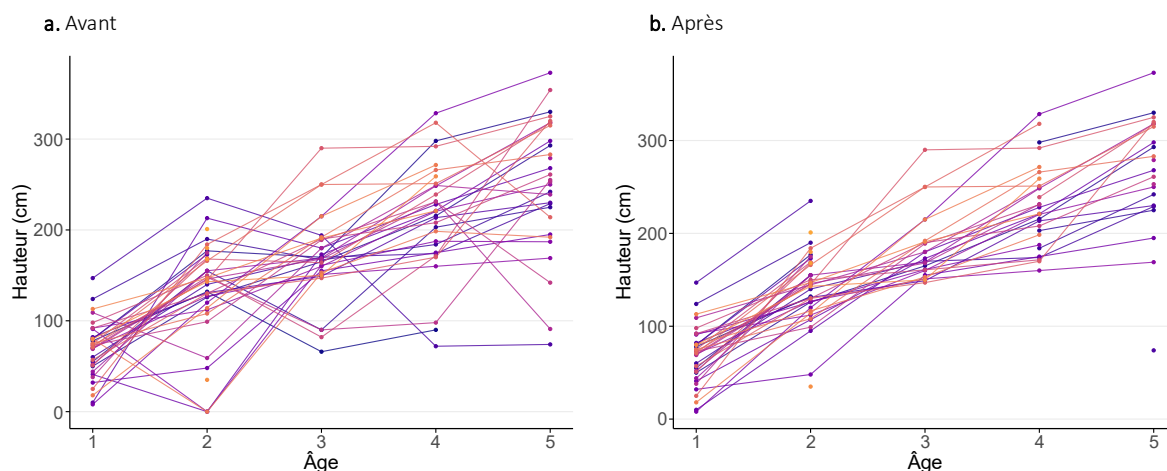


Figure 17 : Courbes d'évolution des hauteurs (en cm) de chaque individu d'une UG en fonction de l'âge pour *Quercus pubescens* dans le site de Postel a. Avant la correction des valeurs aberrants b. Après la correction

Après avoir effectué les corrections, il est possible de comptabiliser le nombre de données totales et de les classer selon leur type (données certaines et corrigées et *outliers* certains, incertains, nuls et élevés). Cette comptabilisation se trouve en Annexe N. La Figure 18 permet de visualiser la proportion de ces valeurs par espèce. La définition précise des types de données se retrouve dans le Tableau 4 (cf. 4.3.2). Plusieurs éléments peuvent être observés. D'abord, *C. decurrens*, les trois *Pinus* et *C. atlantica* sont les espèces avec le plus de données certaines, comparées aux autres espèces, dont le pourcentage de données certaines est respectivement de 92,9 %, entre 91,6 % et 94,6 % pour les *Pinus* et 90,9 %. En opposition, les quatre feuillus (les *Quercus* et *T. cordata*) ainsi que *P. menziesii* possèdent le moins de données certaines. En effet, il y a plus d'*outliers* certains, compris entre 9,53 et 10,9 %.

Ensuite, la part de chaque type de données dépend de l'espèce. En effet, selon l'espèce, la proportion de données certaines et corrigées et le type d'*outliers* sont différents. Cependant, le nombre de données certaines est systématiquement plus élevé, suivi principalement par les *outliers* certains. La part des données corrigées arrive en dernière position avec la plus petite part, pour la plupart des espèces.

Il est également possible de représenter ces proportions par « âge » afin de se rendre compte des différences, toutes espèces confondues. La Figure 19 permet de l'illustrer en montrant les parts de chaque type de données selon l'intervalle de croissance annuelle en hauteur considérée. Par exemple, le bâtonnet ΔH 1-2 représente les ΔH entre 1 et 2 ans. Le nombre de données certaines augmente globalement avec le temps. En effet, la part de données certaines pour le premier accroissement est de 80,2 % contrairement au dernier qui en possède 92,7 %. De plus, les *outliers* certains sont les types d'*outliers* qui dominent la part totale d'*outliers*, compris entre 3,42 et 7,87 % selon l'intervalle considéré. Enfin, quel que soit l'intervalle de croissance considéré, les différents types de données conservent systématiquement le même

ordre de répartition, à l'exception du premier intervalle. En effet, il y a plus de données certaines, que d'*outliers* certains que d'*outliers* élevés, etc.

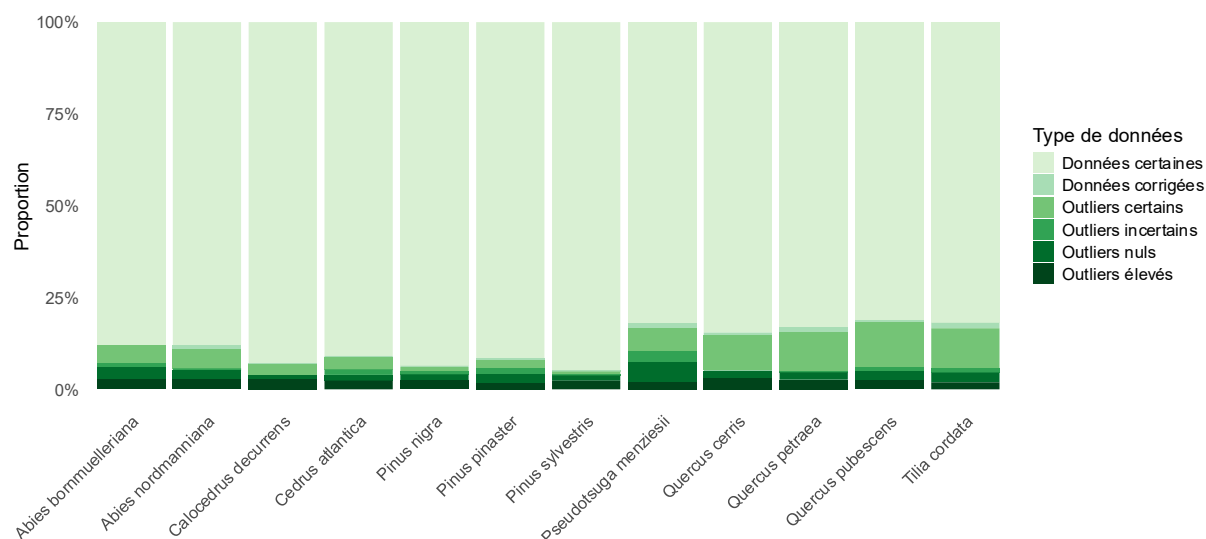


Figure 18 : Répartition du type de données selon l'espèce (Données certaines = $\Delta H > 0$; Données corrigées = données considérées comme *outlier* qui n'est, après traitement, pas un *outlier* ; *Outliers* certains = $\Delta H < 0$ pour laquelle une hauteur ne chute pas à 0 ; *Outliers* incertains = $\Delta H < 0$ pour laquelle une hauteur chute à 0 ; *Outliers* nuls = $\Delta H = 0$; *Outliers* élevés = ΔH très élevés)

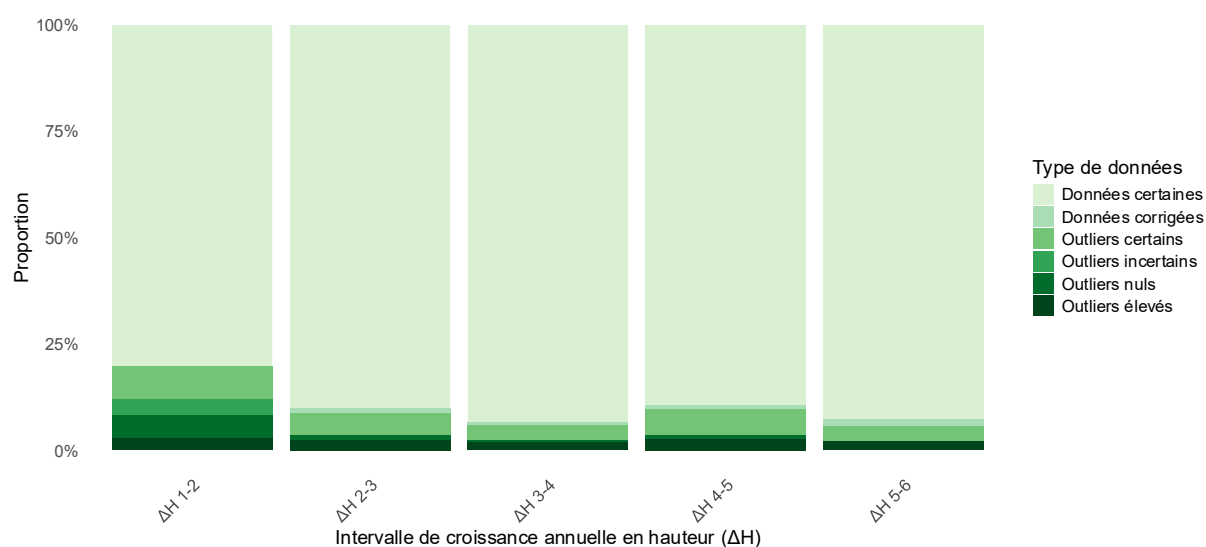


Figure 19 : Répartition du type de données selon l'intervalle de croissance annuelle en hauteur considérée (en cm.an^{-1}) (Données certaines = $\Delta H > 0$; Données corrigées = données considérées comme *outlier* qui n'est, après traitement, pas un *outlier* ; *Outliers* certains = $\Delta H < 0$ pour laquelle une hauteur ne chute pas à 0 ; *Outliers* incertains = $\Delta H < 0$ pour laquelle une hauteur chute à 0 ; *Outliers* nuls = $\Delta H = 0$; *Outliers* élevés = ΔH très élevés)

5.2. Croissance en hauteur

5.2.1. Tendances générales observées

Après la correction des *outliers*, la base de données est corrigée ce qui permet de représenter de façon fiable la hauteur moyenne en centimètres par espèce en fonction de l'âge (Figure 20). La hauteur moyenne par âge et par espèce se calcule en prenant la moyenne de tous les arbres de toutes les UG d'une espèce donnée. Un tableau du nombre d'UG que comptabilisent chaque espèce pour chaque âge, se trouve en Annexe O.

La Figure 20 permet de mettre en évidence une relation positive entre la hauteur et l'âge ainsi que des évolutions différentes de la hauteur selon l'espèce. En effet, les trois espèces de *Pinus* voient leur hauteur plus élevée à cinq ans en opposition aux deux *Abies* ayant une croissance plus lente. Parmi les trois *Pinus*, *P. pinaster* affiche la croissance la plus élevée après cinq ans avec une hauteur moyenne de 396 cm, suivi de *P. sylvestris* avec 284 cm puis *P. nigra* avec 264 cm. Ils sont suivis par les *Quercus*, dont *Q. pubescens* mesure en moyenne 258 cm à cinq ans, suivi de *Q. petraea* avec 249 cm suivi de *Q. cerris* avec 241 cm. *P. menziesii* se retrouve à l'intermédiaire avec une hauteur de 205 cm à cinq ans, suivi de *C. atlantica* et de *T. cordata* qui atteignent en moyenne respectivement 183 et 179 cm. Les deux espèces d'*Abies* occupent la dernière place avec des hauteurs n'atteignant que 105 et 86 cm pour *A. bornmuelleriana* et *A. nordmanniana*.

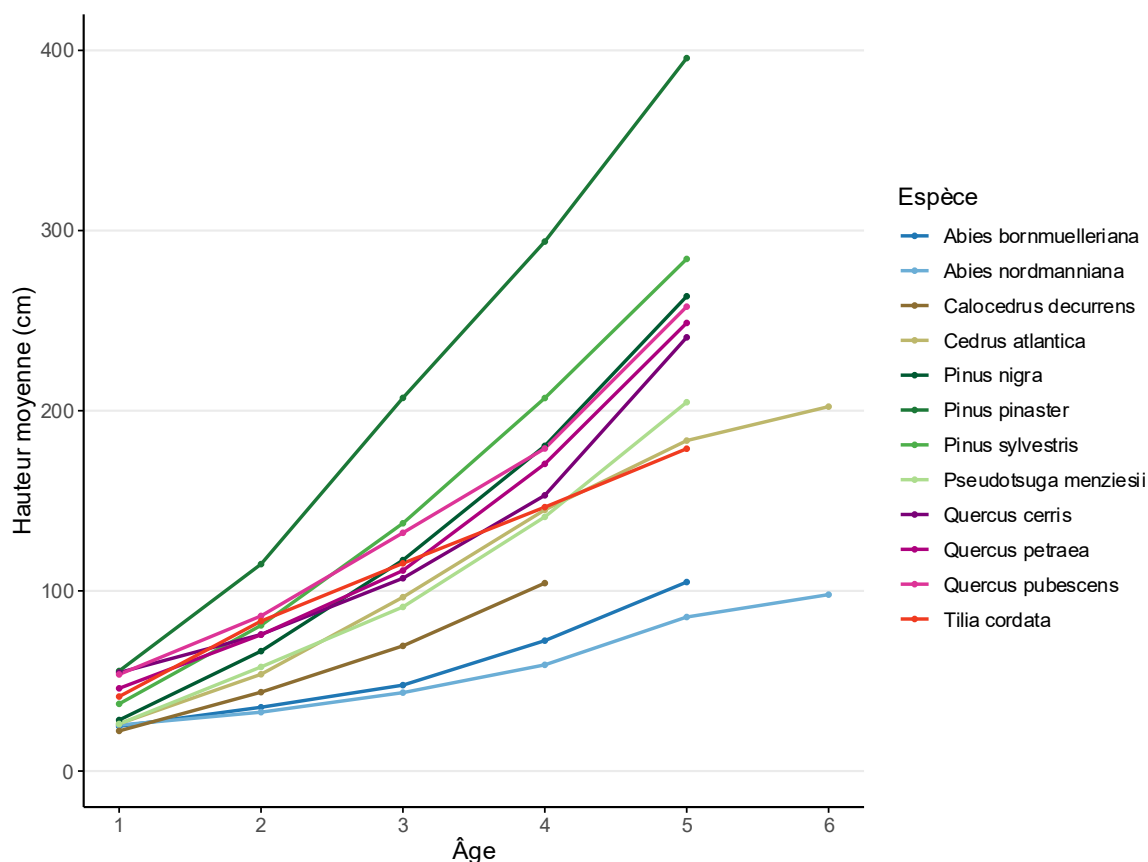


Figure 20 : Évolution de la hauteur moyenne (en cm) par espèce en fonction de l'âge

En plus de l'étude de la hauteur moyenne, les écarts types relatifs à chaque âge et chaque espèce peuvent être analysés. Pour cela, la moyenne et l'écart type sont calculés par espèce et par âge, toutes UG confondues. La Figure 21 permet de montrer l'évolution de la hauteur moyenne ainsi que des écart types par espèce en fonction de l'âge. La Figure 21 indique que les écarts types augmentent avec l'âge, peu importe l'espèce.

Cependant, la variabilité de l'écart type dépend de l'espèce. Par exemple, pour les trois espèces de *Pinus*, *P. pinaster* est plus hétérogène que les deux autres *Pinus*. Pour les *Quercus*, c'est *Q. pubescens* qui est plus hétérogène que les deux autres. *T. cordata* possède quant à lui la hauteur la plus hétérogène. Pour finir, les deux espèces du genre *Abies* proposent des hétérogénéités similaires.

Bien que chaque évolution de la hauteur augmente de façon soutenue, *A. nordmanniana* et *C. atlantica* stagnent à six ans. En effet, cela forme une courbe sigmoïde.

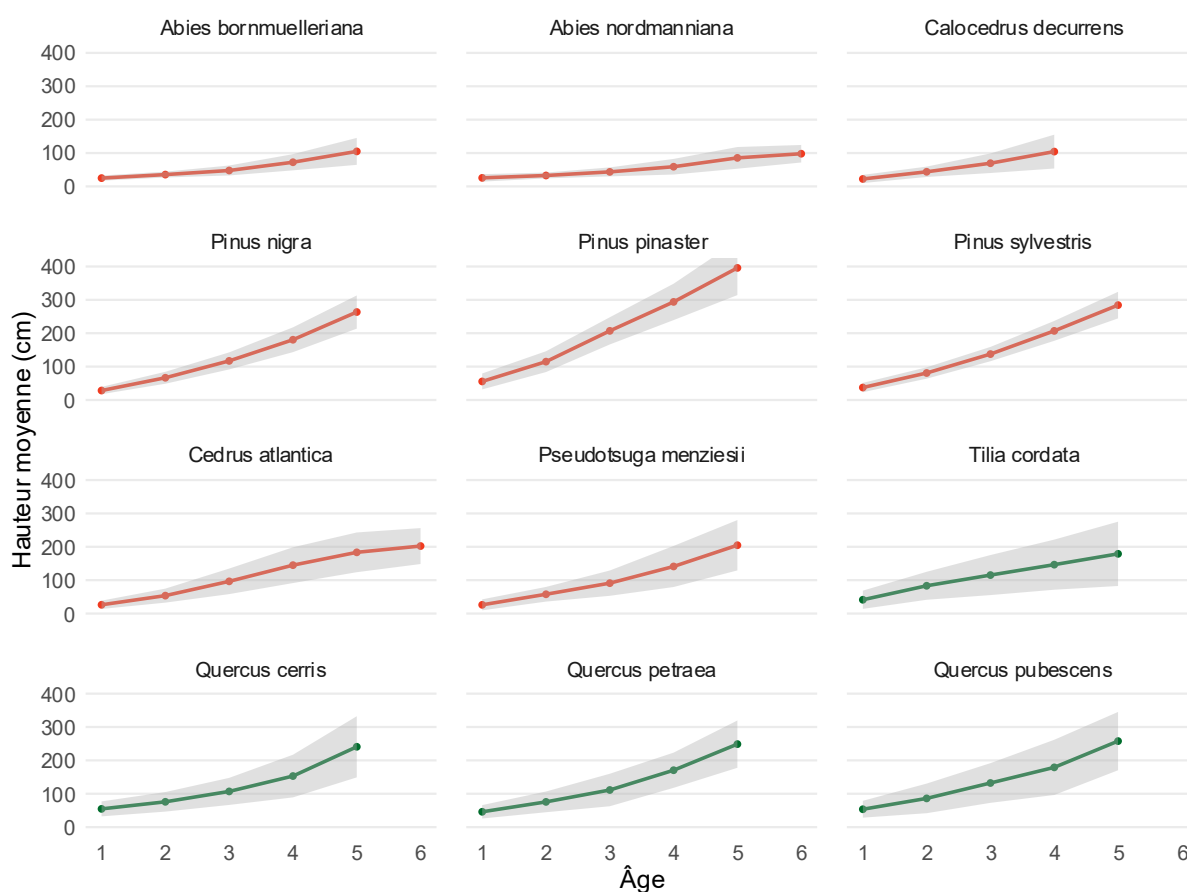


Figure 21 : Évolution de la hauteur moyenne (en cm) et de l'écart type (en gris) par espèce en fonction de l'âge. Les résineux sont en rouge et les feuillus sont en vert.

5.2.2. Sélection du modèle global de croissance

Choix du modèle global

Le modèle global retenu est le modèle 7b (Équation [8]), supposant une relation linéaire entre la hauteur (H) en centimètres et plusieurs effets fixes et aléatoires. Les effets fixes prennent compte de l'effet *Age* et *Espèce* en y incluant leur interaction.

En ce qui concerne les effets aléatoires, entre parenthèses, un intercept aléatoire est assigné à chaque année de plantation et à chaque UG imbriquée dans le *Site*. De plus, une pente et un intercept aléatoire sont attribués pour chaque arbre (*tree_id*) visant à modéliser des courbes de croissance. La variable *tree_id* est construite à la base du Code UG et du numéro de l'arbre au sein de cette UG. Par exemple, l'arbre numéro un de l'UG BoiVieCatCat aura comme *tree_id* BoiVieCatCat.1.

$$H \sim \text{Age} * \text{Espèce} + (1 | \text{année_plantation}) + (1 | \text{Site/Code_UG}) + (\text{Age} | \text{tree_id}) \quad [8]$$

Grâce au modèle retenu (Équation [8]), les variances de chaque effet ont été reprises dans le Tableau 6 dont le R^2 marginal et le R^2 conditionnel sont respectivement de 0,677 et 0,946. Les effets fixes expliquent 67,7 % de la variabilité totale de la croissance, suivi des effets aléatoires expliquant 26,9 % de la variabilité en finissant par la variance résiduelle qui est de 5,4 %. Le résumé des statistiques du modèle est repris en Annexe P.

Tableau 6 : Valeurs des variances associées à chaque effet du modèle de l'Équation [8]

Variance des effets fixes	Variance des effets aléatoires	Variance résiduelle
0,677	0,269	0,054

Le modèle 7b est conservé en raison de son AIC plus faible comparé aux autres modèles présentés en Annexe L. Cependant, le modèle 7b et 7 ne diffèrent que très peu en termes d'AIC. En effet, le modèle M7b possède un AIC plus faible que M7, avec seulement une différence de trois (Annexe L).

Influence des facteurs du modèle global

Grâce au modèle retenu (Équation [8]), les facteurs du modèle peuvent plus ou moins influencer la croissance en hauteur. D'abord, la somme des carrés et la statistique F de chaque effet sont comparées. Pour les effets fixes, l'âge influence le plus le modèle, car la somme des carrés et la statistique F sont plus élevées, qui est suivi par l'interaction entre l'âge et l'espèce puis par l'espèce. Donc, la hauteur augmente systématiquement avec l'âge et certaines espèces poussent plus vite que d'autres.

Pour les effets aléatoires, les variances de chaque effet sont comparées. L'effet ayant la variance la plus élevée est l'identifiant de l'arbre (*tree_id*) suivi de l'UG, du site et enfin de l'année de plantation. Cela signifie que l'individu en tant que tel influence fortement la croissance tandis que l'année de plantation influence de façon moindre le modèle.

Visualisation du modèle et groupes d'espèces

Après avoir réalisé le modèle (Équation [8]), il est possible de représenter les hauteurs prédites par le modèle selon l'âge. La Figure 22 permet de reprendre l'évolution de la hauteur prédite en centimètres en fonction de l'âge, par espèce. Les tendances sont similaires à celles observées à la Figure 20. L'Annexe Q reprend également les hauteurs observées en fonction de la hauteur prédite par le modèle.

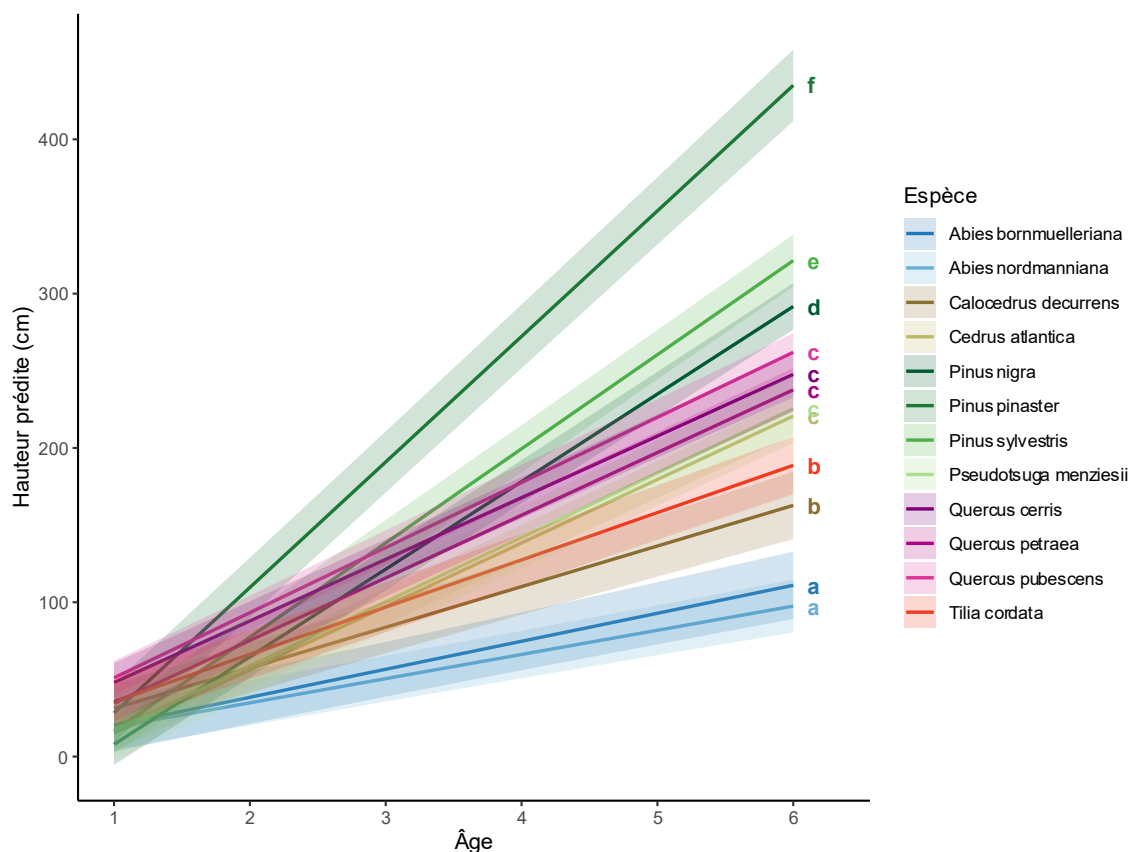


Figure 22 : Évolution de la hauteur prédite (en cm) en fonction de l'âge par espèce dont les lettres signifient les différents groupes de croissance auxquels appartiennent les espèces

Le modèle (Équation [8]) permet également d'identifier les groupes d'espèces ayant une croissance similaire. Ils sont six (lettres *a* à *f*) comme le montre le Tableau 7. Cela signifie que les espèces du groupe *a* ne diffèrent pas significativement entre eux, et sont par conséquent différents avec les autres groupes. En analysant le Tableau 7 qui reprend les valeurs des accroissements en hauteur (en cm.an^{-1}) et du groupe par espèce, la lettre *a* signifie également une croissance plus lente contrairement à la lettre *f* qui reprend le groupe avec la croissance la plus rapide. Les deux espèces du genre *Abies* appartiennent ainsi au groupe *a* dont l'accroissement est compris entre 15,7 et 18,1 cm.an^{-1} . *C. decurrens* et *T. cordata* appartiennent au groupe *b* avec, respectivement, un accroissement de 26,3 et 30,6 cm.an^{-1} .

Ensuite, les trois espèces du genre *Quercus* ainsi que *P. menziesii* sont dans le groupe *c*. Le chêne ayant l'accroissement le plus élevé est *Q. pubescens* avec un accroissement de 42,2 cm.an^{-1} , suivi de *Q. petraea* avec 40,6 cm.an^{-1} et de *Q. cerris* avec 39,9 cm.an^{-1} .

Enfin, les trois espèces du genre *Pinus* sont dans trois groupes différents soit *d*, *e* et *f*. *P. pinaster* révèle la croissance la plus rapide avec 81,4 cm.an⁻¹, suivi de *P. sylvestris*, tandis que *P. nigra* indique la croissance la plus faible.

Tableau 7 : Valeurs des accroissements en hauteur (en cm.an⁻¹) et du groupe par espèce

Espèce	Accroissement (cm.an ⁻¹)	Groupe
<i>Abies nordmanniana</i>	15,7	<i>a</i>
<i>Abies bornmuelleriana</i>	18,1	<i>a</i>
<i>Calocedrus decurrens</i>	26,3	<i>b</i>
<i>Tilia cordata</i>	30,6	<i>b</i>
<i>Quercus cerris</i>	39,9	<i>c</i>
<i>Quercus petraea</i>	40,6	<i>c</i>
<i>Cedrus atlantica</i>	41,1	<i>c</i>
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	41,7	<i>c</i>
<i>Quercus pubescens</i>	42,2	<i>c</i>
<i>Pinus nigra</i>	56,8	<i>d</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	61,0	<i>e</i>
<i>Pinus pinaster</i>	81,4	<i>f</i>

5.2.3. Analyse de l'hétérogénéité de croissance

Au-delà des groupes modélisés, il existe cependant des écarts entre UG au sein d'une même espèce. En effet, le modèle montrant la relation entre le coefficient de variation à cinq ans et l'espèce (Équation [4]) permet de relever que le coefficient de variation dépend significativement de l'espèce (ANOVA, $p < 0,05$). Le résumé des statistiques du modèle est repris en Annexe P.

Afin de comparer les coefficients de variation des espèces, la Figure 23 reprend l'analyse par *boxplots* du coefficient de variation (en pourcentage) à cinq ans. Plusieurs observations peuvent être identifiées sur cette figure. En parallèle, l'Annexe R reprend les données des *boxplots* telles que la médiane, les quartiles, les écarts interquartiles ainsi que les coefficients de variation minima et maxima de chaque espèce.

Tout d'abord, il est possible de comparer les *boxplots* entre elles. En effet, les espèces avec un coefficient de variation plus faible se traduit par une croissance plus homogène au sein d'une même UG, par rapport aux autres espèces. En revanche, un coefficient de variation plus élevé révèle une croissance plus hétérogène au sein d'une même UG. Par exemple, *P. sylvestris* et *P. nigra* ont respectivement un coefficient de variation médian égal à 11,1 et 14,6 %, correspondant aux valeurs les plus faibles observées. Cela signifie donc que ces deux espèces montrent une plus grande homogénéité de croissance au sein d'une même UG. En revanche, *T. cordata* et *A. bornmuelleriana* se caractérisent par des coefficients de variation plus élevés ce qui implique une croissance hétérogène au sein d'une même UG. En effet, leur coefficient médian s'élève à 39,5 % pour *T. cordata* et 31,9 % pour *A. bornmuelleriana*.

Ensuite, la Figure 23 renseigne également sur les variations entre UG pour une même espèce grâce à l'amplitude des *boxplots*. En effet, une *boxplot* large se traduit par une variabilité élevée entre UG d'une même espèce. Par exemple, *P. pinaster* et *T. cordata* possèdent un écart interquartile égal à 11,6 et 10,3 respectivement. Cela induit donc une hétérogénéité dans la croissance entre UG. À l'inverse, *P. nigra* n'atteint qu'un écart interquartile de 2,62 ce qui révèle une homogénéité en termes de croissance entre UG.

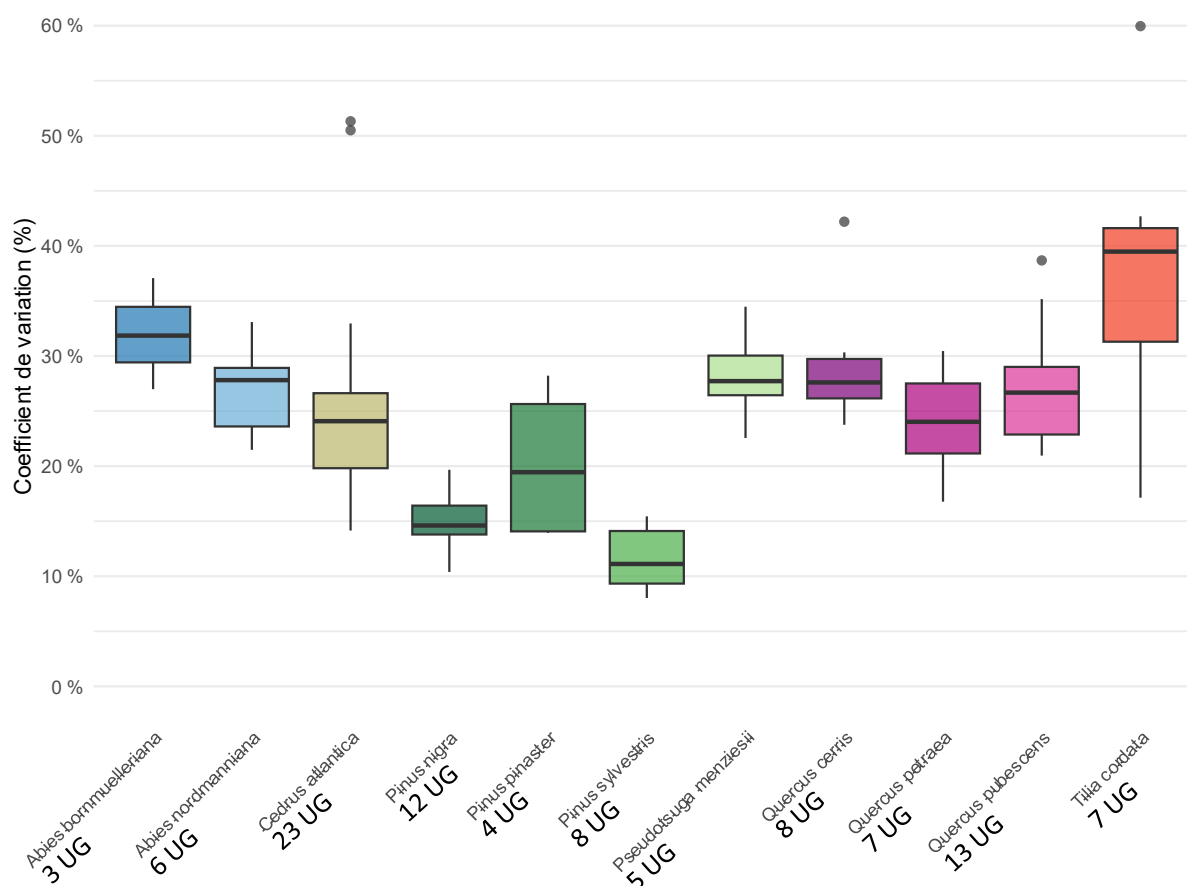


Figure 23 : Boxplots des coefficients de variation (en %) à cinq ans par espèce

Les groupes d'espèces peuvent également être comparés entre eux. D'abord, pour les deux espèces du genre *Abies*, il ressort que *A. nordmanniana* a un coefficient de variation plus faible que *A. bornmuelleriana* tandis que leur écart interquartile est globalement identique (5,32 et 5,04 respectivement). *A. nordmanniana* a donc une croissance plus homogène au sein d'une même UG.

Ensuite, les trois espèces du genre *Pinus* montrent des tendances différentes. *P. nigra* présente un coefficient de variation médian de 14,6 % lié à un écart interquartile de 2,62. *P. pinaster* montre un coefficient plus élevé égal à 19,5 % associé également à un plus grand écart interquartile de 11,6. Enfin, *P. sylvestris* possède le plus petit coefficient, de 11,1 % avec un écart interquartile intermédiaire de 4,77. Par conséquent, *P. sylvestris* indique une croissance plus homogène au sein d'une même UG tandis que *P. pinaster* montre une variabilité élevée entre UG.

Enfin, les chênes indiquent quelques différences en termes de coefficient de variation. En effet, *Q. cerris* possède le coefficient de variation médian le plus important, égal à 27,6 %, suivi de *Q. pubescens* et *Q. petraea* qui ont respectivement des coefficients égaux à 26,7 et 24,0 %. Leur écart interquartile s'élève à 3,58 pour *Q. cerris*, 6,36 pour *Q. petraea* et 6,14 pour *Q. pubescens*. Donc, *Q. petraea* indique une croissance plus homogène au sein d'une même UG tandis que *Q. petraea* montre une variabilité élevée entre UG.

L'analyse des coefficients de variation peut être mise en relation avec le nombre d'UG, le nombre d'individus moyen par UG, le nombre minimum et maximum d'individus dans une UG par espèce (Tableau 8). Le nombre d'UG et les autres caractéristiques des effectifs sont différentes en fonction de l'espèce. Par conséquent, le nombre d'UG (et d'arbres) utilisés pour le calcul du coefficient de variation n'est pas le même.

Pour conclure, l'espèce a un effet important sur l'hétérogénéité de croissance entre UG et au sein d'une même UG.

Tableau 8 : Caractéristiques des effectifs par espèce à cinq ans

Espèce	Nombre d'UG	Nombre moyen d'individus	Nombre minimum d'individus	Nombre maximum d'individus
<i>Abies bornmuelleriana</i>	3	42	36	48
<i>Abies nordmanniana</i>	6	42	38	48
<i>Cedrus atlantica</i>	23	38	19	49
<i>Pinus nigra</i>	12	41	13	48
<i>Pinus pinaster</i>	4	29	27	31
<i>Pinus sylvestris</i>	8	42	31	49
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	5	35	19	39
<i>Quercus cerris</i>	8	36	9	47
<i>Quercus petraea</i>	7	30	8	45
<i>Quercus pubescens</i>	13	26	12	41
<i>Tilia cordata</i>	7	31	25	42

5.2.4. Analyse de l'effet du site sur la croissance

Une analyse approfondie a été réalisée afin de comprendre quel facteur influence la croissance chez certaines espèces. Les deux espèces retenues sont *Quercus pubescens* et *Cedrus atlantica*. En effet, ces espèces possèdent le plus de données par rapport aux autres espèces dans le cadre du mémoire ce qui permet d'avoir assez de répétitions pour comparer et analyser l'effet du site. Par exemple, *Q. pubescens* est planté sur 21 UG réparties dans dix sites tandis que *C. atlantica* est planté sur 26 UG réparties sur dix sites également, à l'âge de trois ans.

L'analyse de l'effet du site a été réalisée grâce au modèle (Équation [6]) afin de modéliser la croissance annuelle par espèce. Les résultats montrent un effet significatif du site sur la croissance (ANOVA, $p < 0,05$). Le résumé des statistiques du modèle est repris en Annexe P.

Le site influence donc les dynamiques de croissance pour les deux espèces étudiées. Les prochaines analyses seront présentées par espèce, d'abord pour *Q. pubescens* puis pour *C. atlantica*.

Étude de *Quercus pubescens*

Les croissances annuelles en centimètres par an du chêne pubescent sont illustrées par site à l'aide de *boxplots*. La Figure 24 permet de visualiser l'évolution des croissances annuelles, par *boxplots*, en fonction de différents sites pour lesquels *Q. pubescens* est planté. Les lettres au-dessus de chaque boîte représentent les résultats du test de regroupement par lettres afin d'identifier des groupes homogènes de sites ayant des croissances annuelles similaires. Seuls les sites sans lettre commune sont significativement différents l'un de l'autre.

Les caractéristiques des croissances annuelles par site, telles que les statistiques et les groupes de significativité, sont présentés dans le Tableau 9 tandis que les données stationnelles (année de plantation, type de sol, altitude, etc.) sont disponibles en Annexe S.

En observant la Figure 24, trois groupes de croissance simplifiés peuvent être distingués. Premièrement, le groupe ayant une croissance lente concerne les groupes *a* et *ab*. Les sites qui appartiennent à ce groupe sont Ouffet, Bois de l'Or et Ciergnon. Ceux-ci indiquent respectivement une croissance annuelle médiane de 15,3 cm.an⁻¹, 21,7 cm.an⁻¹ et 25,2 cm.an⁻¹.

Deuxièmement, le groupe *abc* révèle une croissance intermédiaire. Les sites qui appartiennent à ce groupe sont Gomery et Hamoir. Leur croissance annuelle médiane est de 33,3 cm.an⁻¹ et 38,3 cm.an⁻¹ respectivement.

Enfin, les groupes *bc* et *c* possèdent la croissance la plus rapide. Les sites qui appartiennent à ce groupe sont Rumilies, Saint-Léger, Jenneret, Ohey et Postel. Leur croissance annuelle médiane varie entre 53,5 et 56,7 cm.an⁻¹.

Les *boxplots* de la Figure 24 révèlent également une variabilité importante au sein de certains sites, comme Ohey dont l'écart interquartile est de 24,2 cm.an⁻¹. À l'inverse, le site Ouffet montre une distribution plus étroite dont l'écart interquartile n'est que de 6,17 cm.an⁻¹. La majorité des sites indiquent également quelques *outliers* (points isolés sur la figure).

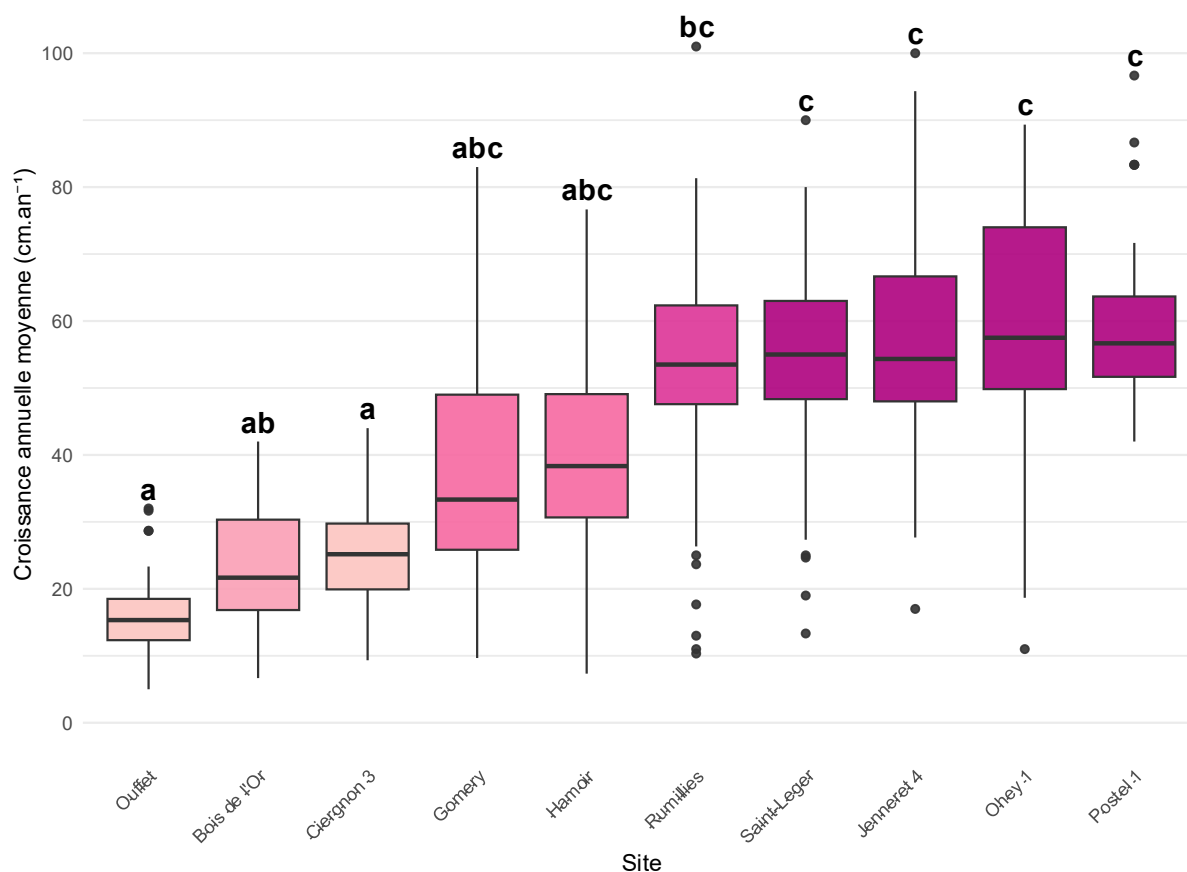


Figure 24 : Comparaison des croissances annuelles (en cm.an^{-1}), par *boxplots*, en fonction de différents sites pour lesquels *Quercus pubescens* est planté

Tableau 9 : Caractéristiques de la croissance annuelle par site (statistiques et groupes de significativité) pour *Quercus pubescens*

Site	Croissance annuelle moyenne estimée (cm.an^{-1})	Écart type (cm.an^{-1})	Intervalle de confiance	Groupe de significativité
Ouffet	17,2	4,72	6,95-27,5	a
Bois de l'Or	22,7	6,31	8,60-36,8	ab
Ciergnon 3	24,4	4,00	15,8-33,0	a
Gomery	36,7	4,49	26,7-46,8	abc
Hamoir	38,7	3,66	30,6-46,9	abc
Rumillies	53,3	4,47	43,3-63,3	bc
Saint-Léger	54,9	4,45	45,0-64,9	c
Jenneret 4	57,0	4,48	47,0-67,0	c
Ohey 1	58,4	4,54	48,3-68,4	c
Postel 1	60,4	4,84	50,0-70,8	c

Dans le but d'évaluer l'efficacité du type de plant, une étude a été réalisée pour le chêne pubescent en ne prenant en compte que les sites pour lesquels les deux types de plant sont testés. Les résultats ne montrent pas un effet significatif du type de plant sur la croissance (ANOVA, $p < 0,05$) bien qu'une différence visuelle soit observée sur la Figure 25. En effet, cela

s'explique probablement par le faible nombre de sites sélectionnés pour cette étude (seulement Hamoir et Postel). Néanmoins, la Figure 25 montre une différence de croissance annuelle selon le type de plant chez *Quercus pubescens* dans les sites présentant les deux types de plant. En effet, le godet indique une croissance annuelle plus élevée que les racines nues.

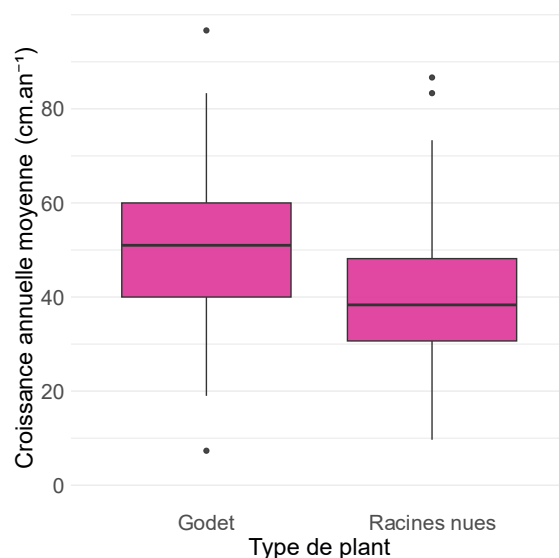


Figure 25 : Comparaison de la croissance annuelle (en cm.an^{-1}) selon le type de plant chez *Quercus pubescens* pour les sites présentant les deux types de plant

Étude de *Cedrus atlantica*

Les croissances annuelles en centimètres par an du cèdre sont illustrées par site à l'aide de *boxplots*. La Figure 26 permet de visualiser l'évolution des croissances annuelles, par *boxplots*, en fonction de différents sites pour lesquels *C. atlantica* est planté. Les lettres au-dessus de chaque boîte représentent les résultats du test de regroupement par lettres.

Les caractéristiques des croissances annuelles par site sont présentées dans le Tableau 10 tandis que les données stationnelles sont disponibles en Annexe S.

En observant la Figure 26, trois groupes de croissance simplifiés peuvent être distingués. Premièrement, les groupes ayant une croissance lente concernent les groupes *a* et *ab*. Les sites qui appartiennent à ce groupe sont Vierves-sur-Viroin, Tintange et Lierneux. Ceux-ci indiquent respectivement une croissance annuelle médiane de $20,3 \text{ cm.an}^{-1}$, $20,0 \text{ cm.an}^{-1}$ et $22,7 \text{ cm.an}^{-1}$.

Deuxièmement, les groupes *abc*, *abcde*, *bcd* et *cde* révèlent une croissance intermédiaire. Les sites qui appartiennent à ce groupe sont Porcheresse, Roly, Château Regnault, Hamoir et Poppel. Leur croissance annuelle médiane se situe entre $27,3$ et $36,7 \text{ cm.an}^{-1}$.

Enfin, les groupes *de* et *e* possèdent la croissance la plus rapide. Les sites qui appartiennent à ce groupe sont Postel et Stoumont. Leur croissance annuelle médiane s'élève à $45,3$ et $47,0 \text{ cm.an}^{-1}$ respectivement.

Les *boxplots* de la Figure 26 montrent également une variabilité importante au sein de certains sites, comme Postel dont l'écart interquartile est de $19,7 \text{ cm.an}^{-1}$. À l'inverse, le site Vierves-

sur-Viroin montre une distribution plus étroite dont l'écart interquartile n'est que de 8,33 cm.an⁻¹. Une partie des sites indique également quelques *outliers*.

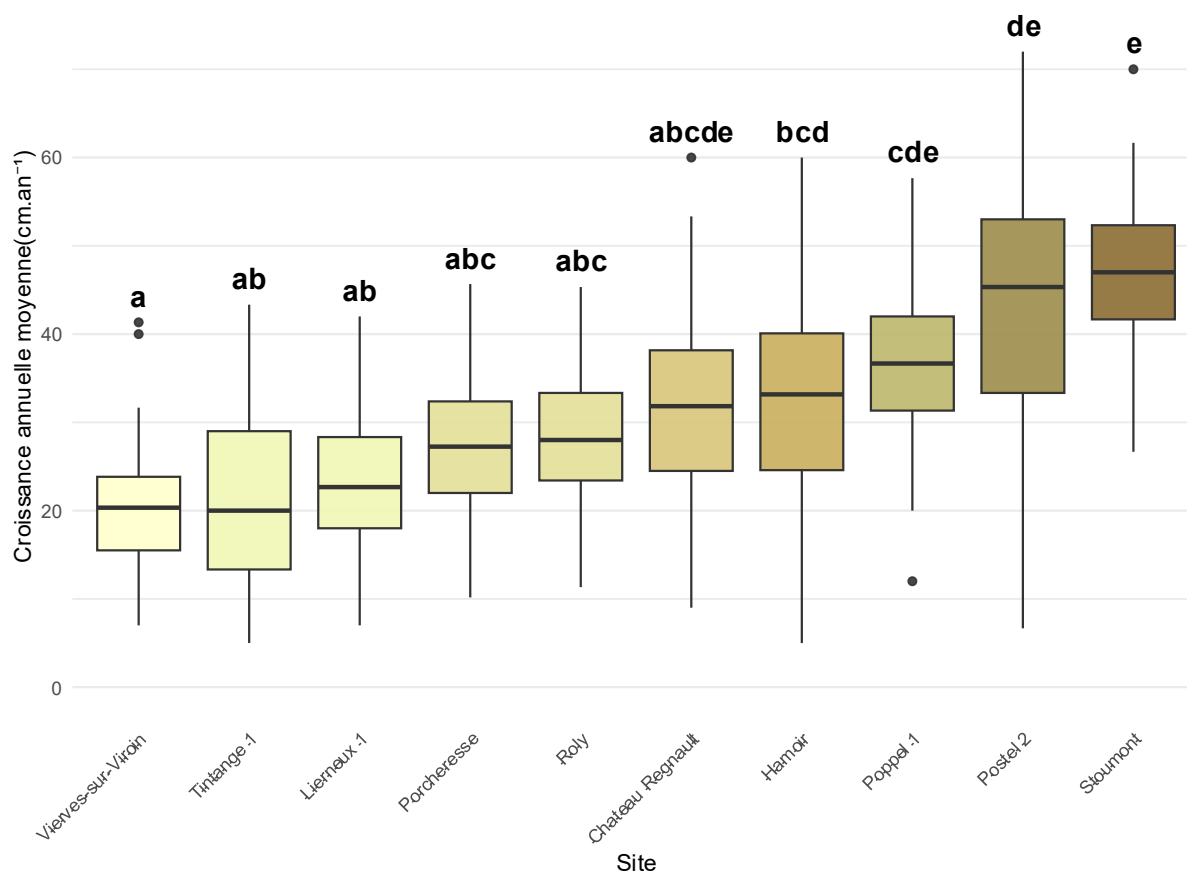


Figure 26 : Comparaison des croissances annuelles (en cm.an⁻¹), par *boxplots*, en fonction de différents sites pour lesquels *Cedrus atlantica* est planté

Tableau 10 : Caractéristiques de la croissance annuelle par site (statistiques et groupes de significativité) pour *Cedrus atlantica*

Site	Croissance annuelle moyenne estimée (cm.an ⁻¹)	Écart type (cm.an ⁻¹)	Intervalle de confiance	Groupe de significativité
Vierves-sur-Viroin	20,0	2,19	15,4-24,6	a
Tintange 1	20,6	2,65	15,0-26,2	ab
Lierneux 1	23,5	2,14	19,0-28,1	ab
Porcheresse	26,8	2,66	21,1-32,4	abc
Roly	28,5	2,15	24,0-33,1	abc
Château Regnault	31,4	3,73	23,5-39,3	abcde
Hamoir	32,4	2,17	27,8-37,0	bcd
Poppel 1	36,5	2,14	31,9-41,0	cde
Postel 2	42,7	2,14	38,2-47,3	de
Stoumont	47,0	2,14	42,4-51,5	e

5.3. Taux de survie

L'analyse du taux de survie se porte uniquement sur les UG plantées en 2019-2020 (Annexe M). En effet, cela permet à chaque espèce d'avoir le même âge pour chaque année du suivi. La Figure 27 montre l'évolution du taux de survie moyen (en pourcentage) en fonction des années du suivi, par espèce pour les UG plantées en 2019-2020. Plusieurs tendances sont à observer. Tout d'abord, des évolutions aberrantes sont identifiées. En effet, le taux de survie moyen diminue puis augmente à nouveau. Ensuite, les taux de survie montrent une tendance générale à la baisse pour l'année qui suit la plantation, à l'exception de *P. sylvestris*.

La plupart des espèces montrent des taux de survie moyens systématiquement supérieurs à 80 % pour l'ensemble des années du suivi. En effet, le taux de survie ne chute que de 2 à 8 % (selon l'espèce) entre la première et la dernière année du suivi pour les deux espèces du genre *Abies*, *C. atlantica*, *P. nigra*, *P. sylvestris* et *Q. cerris*. En revanche, *P. menziesii* présente des taux de survie majoritairement inférieurs à ceux des autres espèces, n'atteignant pas 80 % dans la majeure partie du temps.

Ensuite, *Pinus pinaster* présente la chute la plus prononcée par rapport aux autres espèces. En effet, son taux de survie moyen passe de 93,0 % en 2020 à 59,5 % en 2024 ce qui représente une chute de 33,5 % en cinq ans.

De plus, quelques chutes importantes sont identifiées en 2024. En effet, le taux de survie moyen entre 2023 et 2024 de *P. pinaster* passe de 68,5 % à 59,5 %, celui de *T. cordata* chute de 13,8 % tandis que *Q. pubescens* et *Q. petraea* chutent respectivement de 8,70 % et 7,90 %.

Les informations concernant les UG ayant un taux de survie sous 80 % en 2024 sont reprises en Annexe T.

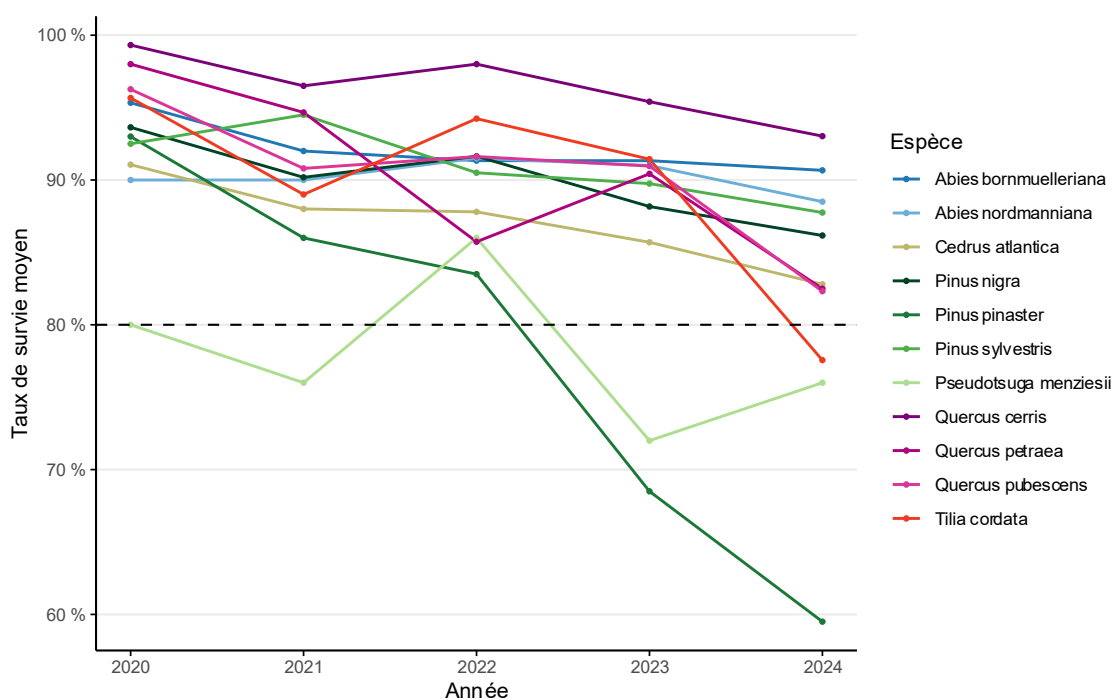


Figure 27 : Évolution du taux de survie moyen (en %) en fonction des années, par espèce pour les UG plantées en 2019-2020

Enfin, en complément à la figure précédente, il est possible de représenter graphiquement la distribution des taux de survie selon l'espèce grâce à des *boxplots*. La Figure 28 représente les évolutions du taux de survie (en pourcentage) en fonction des années, par espèce pour les UG plantées en 2019-2020. Cette figure permet d'apporter des informations complémentaires sur l'hétérogénéité des UG au sein d'une espèce.

D'abord, les deux espèces du genre *Abies* présentent tous les deux une faible variabilité entre UG. En effet, leur écart interquartile (entre 12,0 et 14,0 %) reste constant en fonction du temps. En revanche, les *Pinus* présentent des hétérogénéités différentes. En effet, *P. nigra* et *P. sylvestris* semblent avoir peu de différences de survie entre UG en raison de leur faible dispersion en opposition à *P. pinaster*. Celui-ci présente une grande variabilité entre UG en 2022, dont l'écart interquartile vaut 32,5 %.

De plus, *P. menziesii* montre également des différences entre UG et entre année. En effet, de grandes variabilités entre UG sont observées pour l'année 2020, 2021 et 2023, dont les écarts interquartiles sont respectivement de 26,0 %, 28,0 % et 31,0 %. De même, *T. cordata* montre une plus grande hétérogénéité entre UG en 2024.

Ensuite, les trois espèces du genre *Quercus* montrent des variabilités entre UG plus ou moins similaires. En effet, la variabilité augmente avec le temps bien que *Q. petraea* présente des variabilités plus élevées par rapport aux deux autres chênes.

Enfin, quelques *outliers* sont identifiés chez la majorité des espèces, à l'exception des deux espèces du genre *Abies* et de *T. cordata*. Ces valeurs se situent systématiquement en dessous des médianes.

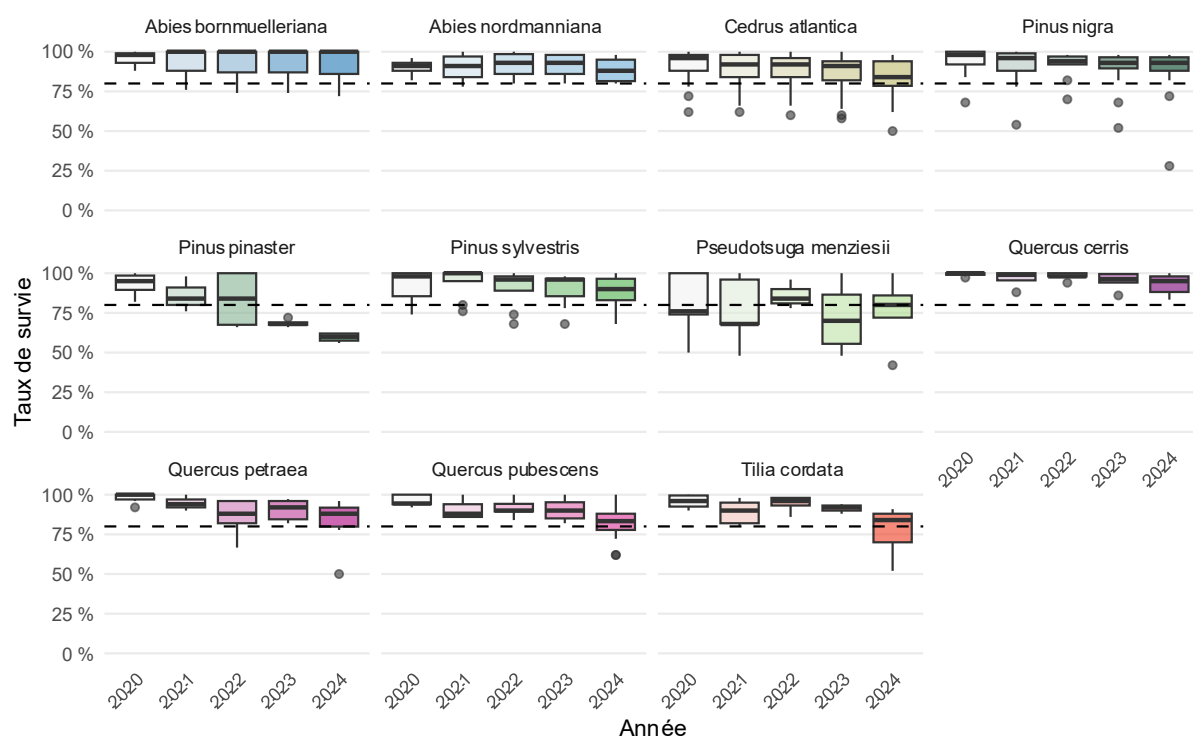


Figure 28 : *Boxplots* représentant les évolutions du taux de survie (en %) en fonction des années, par espèce pour les UG plantées en 2019-2020

5.4. Conformation

La conformation des espèces a également été analysée. La Figure 29 reprend la part des arbres touchée par des fourches et/ou par une inclinaison, en pourcentage, par espèce pour la dernière année du suivi en 2024. Les espèces les plus touchées par les fourches sont *T. Cordata* avec 34,9 % d'arbres touchés, *C. atlantica* avec 29,0 % et enfin *P. nigra* avec 19,8 %. De plus, *A. bornmuelleriana* révèle plus de fourches que *A. nordmanniana*.

En revanche, les espèces possédant des inclinaisons sont l'ensemble des feuillus dont *Q. pubescens* a 4,89 % d'arbres inclinés, *Q. cerris* avec 2,78 % et enfin *T. cordata* et *Q. petraea* avec chacun 2,33 % et 2,45 %.

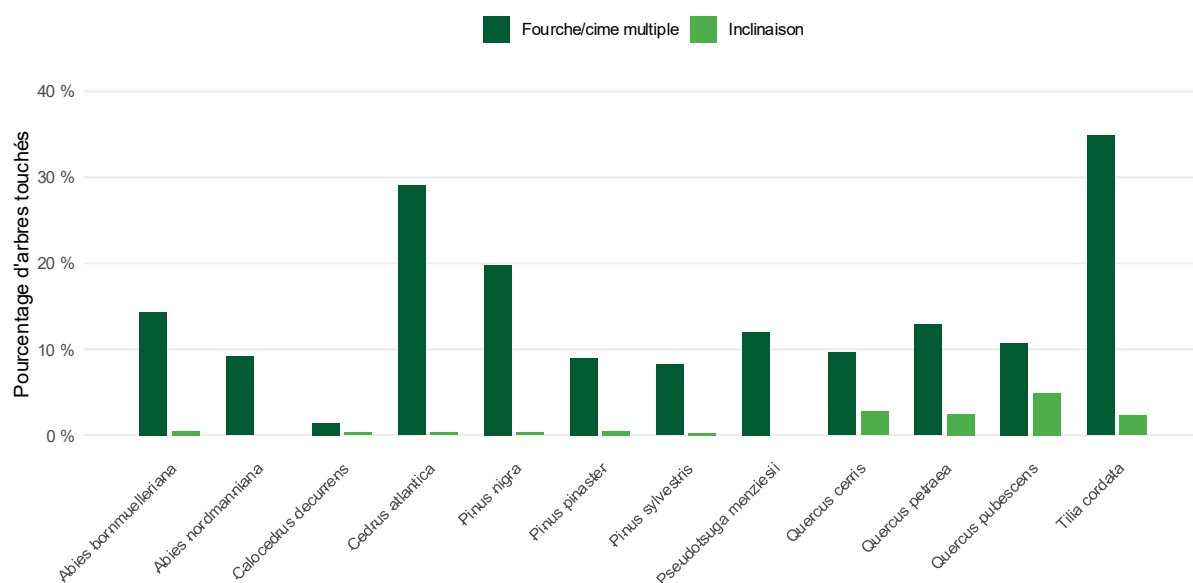


Figure 29 : Part des arbres touchés par des fourches et/ou par une inclinaison (en %), par espèce

5.5. État sanitaire

Afin d'analyser l'état sanitaire des espèces par année, l'évolution des proportions des différents statuts en fonction de l'année, par espèce, a été représentée à la Figure 30. Le nombre d'UG concerné par année et par espèce ainsi que le nombre total d'arbres repris pour l'ensemble des UG concernées est repris en Annexe U.

La Figure 30 montre que la part des différents statuts (sain, atteint, mort et absent) varie en fonction de l'espèce et de l'année. D'abord, les deux espèces du genre *Abies* présentent des proportions similaires entre elles au cours du temps, avec un nombre d'arbres atteints plus importants en 2022. Ensuite, parmi les trois *Pinus*, *P. nigra* et *P. sylvestris* révèlent une majorité d'arbres sains en opposition à *P. pinaster* présentant moins de 50 % d'arbres sains les trois dernières années. Enfin, ce sont les trois chênes qui présentent le plus d'arbres atteints au fil des années. Parmi eux, les *Q. petraea* et *Q. pubescens* atteints montrent des parts plus élevées que *Q. cerris*.

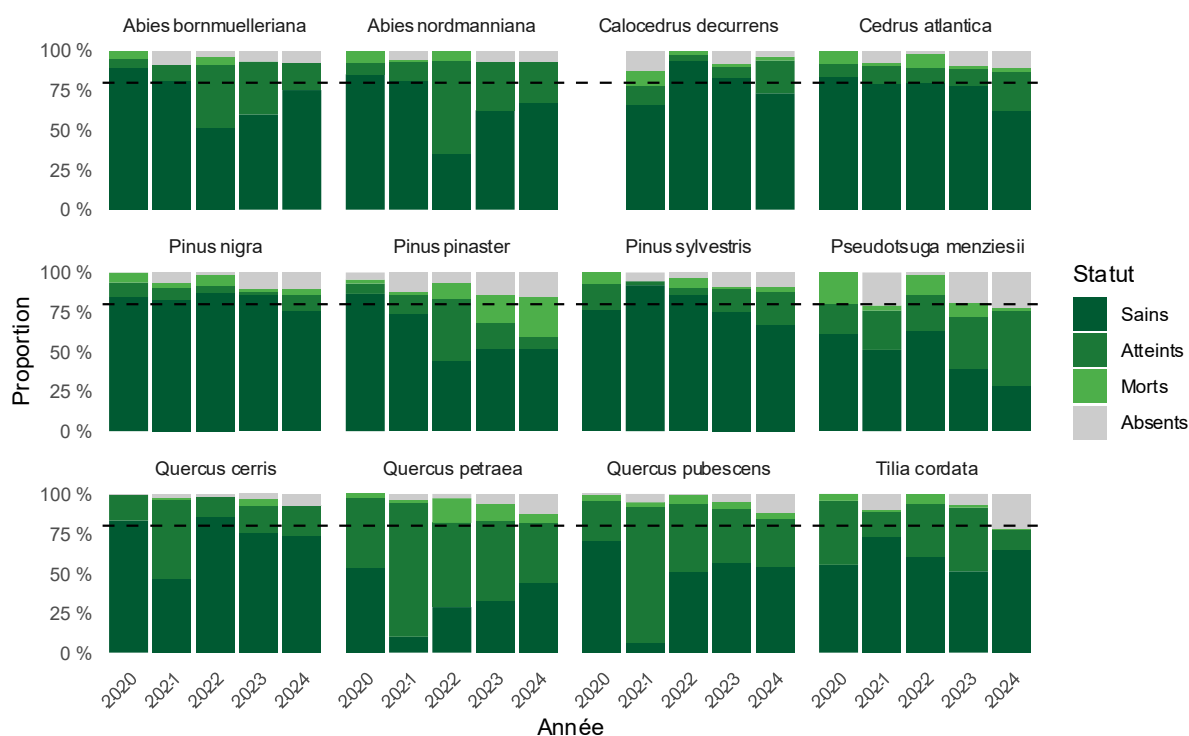


Figure 30 : Évolution des proportions des différents statuts en fonction de l'année, par espèce (en %)

Afin de mieux comprendre pourquoi les arbres sont atteints, la répartition des problèmes par espèce a été comparée entre 2022 (année sèche) et 2024 (année humide). La Figure 31 et la Figure 32 détaillent, pour la même part d'arbres atteints déjà présentée en Figure 30, la part attribuable à chaque type de problème. Il apparaît que la part d'arbres atteints par le problème « Inconnu » est majoritaire pour l'ensemble des espèces et pour les deux années. Cette part sera étudiée plus en détail par la suite.

Pour la suite de l'analyse, les espèces du même genre seront comparées entre elles et entre année. D'abord, les deux espèces du genre *Abies* présentent des parts plus importantes de dégâts de gel en 2022 qu'en 2024. En 2022, *A. nordmanniana* montre davantage de dégâts de gel qu'*A. bornmuelleriana*, alors qu'en 2024, la tendance s'inverse.

Ensuite, les trois espèces du genre *Pinus* développent des problèmes différents. En effet, *P. pinaster* est faiblement touché par la lyde du pin tandis que *P. sylvestris* montre des signes de frottis d'animal en 2024.

De plus, tous les chênes présentent des symptômes d'oïdium en 2022 et en 2024. En revanche, l'année joue un rôle quant à la part d'atteints par ce problème. En effet, *Q. cerris* et *Q. pubescens* sont d'autant plus atteints par l'oïdium en année humide tandis que *Q. petraea* montre des proportions identiques.

Enfin, pour les quatre dernières espèces, la part de chaque problème identifié est différente selon l'espèce. *C. decurrens* est majoritairement touché par la sécheresse en 2022 tandis que celui-ci montre des problèmes de gel en 2024. *C. atlantica* montre également des dégâts de gel en 2024. En revanche, *P. menziesii* est majoritairement touché par la cécidomyie en 2024 tandis que *T. cordata* ne montre que des dégâts liés aux travaux sylvicoles et aux animaux en 2024.

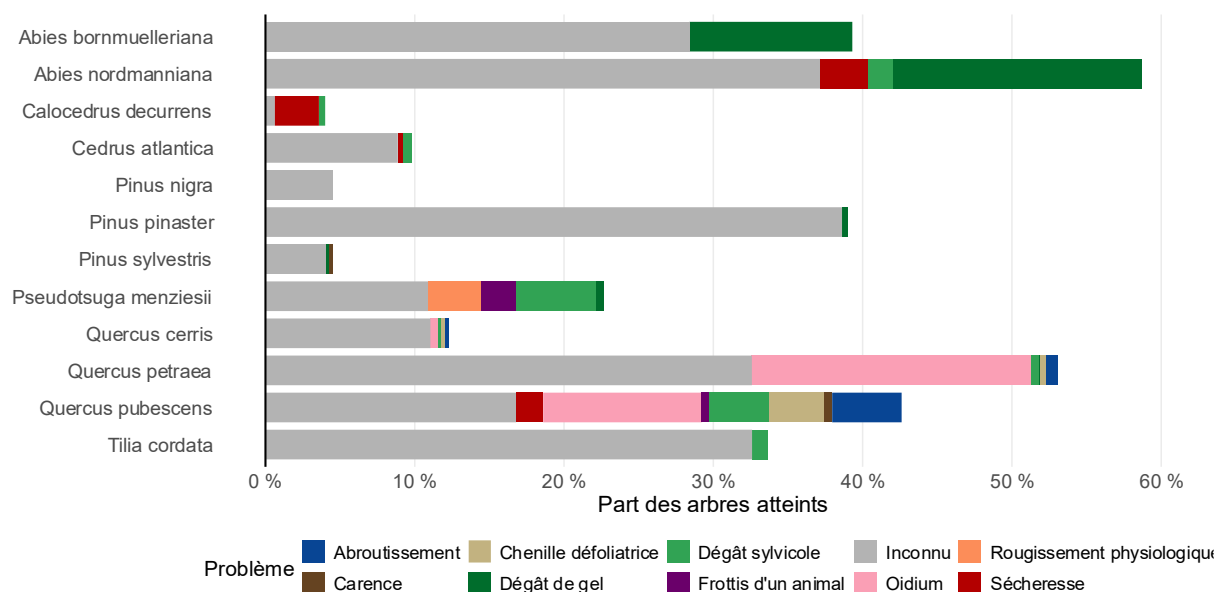


Figure 31 : Part des arbres atteints par un problème selon les espèces pour l'année 2022 (année sèche)

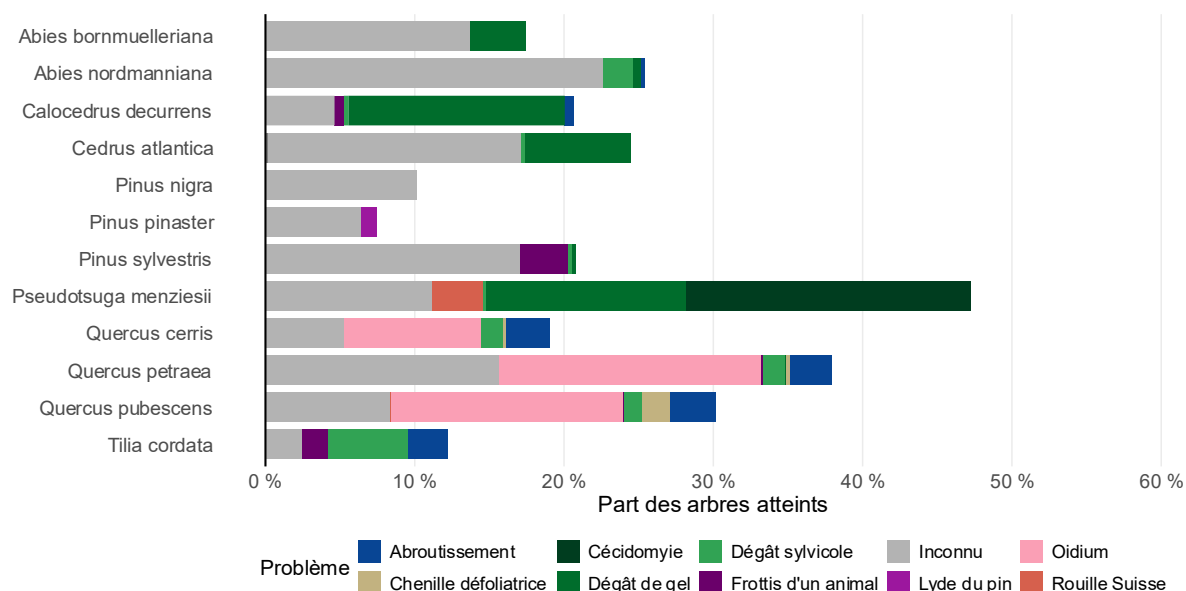
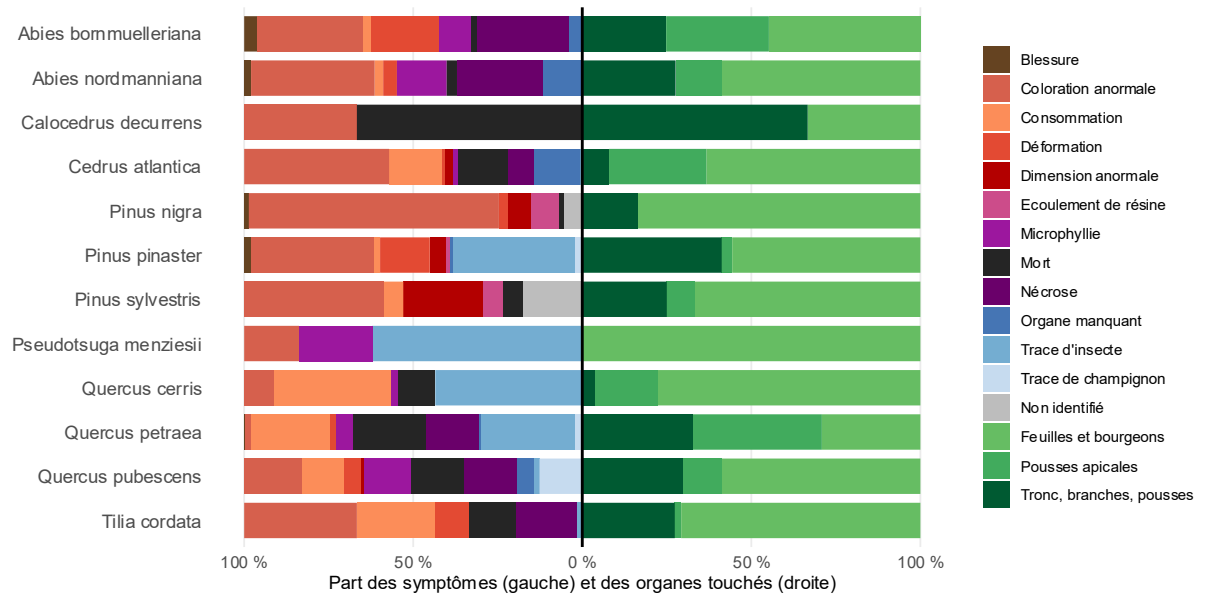


Figure 32 : Part des arbres atteints par un problème selon les espèces pour l'année 2024 (année humide)

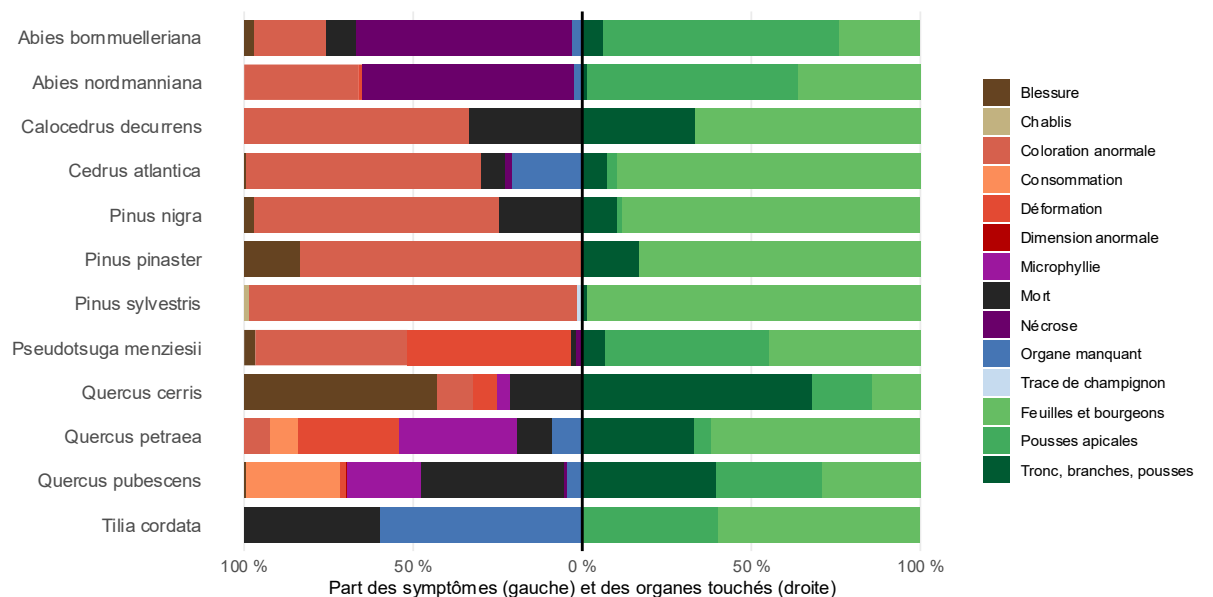
Comme expliqué ci-dessus, la part d'arbres atteints par le problème « Inconnu » est majoritaire (Figure 31 et Figure 32). Afin de mieux comprendre ce dont ces arbres sont atteints, la répartition des symptômes par espèce a été comparée entre 2022 et 2024. La Figure 33 et Figure 34 détaillent, pour la part d'arbres atteints du problème « Inconnu » déjà présentée en Figure 31 et Figure 32, la part attribuable à chaque type de symptômes et la part de chaque organe touché par ces symptômes.

Selon la Figure 33 représentant 2022, la coloration anormale est dans une large mesure présente chez l'ensemble des résineux. En revanche, les feuillus montrent principalement des traces de consommation et d'insectes. Les organes touchés sont principalement les feuilles et bourgeons bien que le tronc représente en moyenne 20 % des organes touchés. En revanche,

les organes touchés de *C. decurrens* sont majoritairement le tronc tandis que ceux de *Q. petraea* sont les feuilles, les pousses apicales et le tronc, dans des proportions équivalentes.



Selon la Figure 34 représentant 2024, le symptôme majoritairement observé chez l'ensemble des espèces est la coloration anormale. Néanmoins, des nécroses sont également observées chez les deux *Abies*, des blessures au tronc sont essentiellement présentes chez *Q. cerris* tandis que *Q. petraea* et *Q. pubescens* montrent des problèmes de microphyllie. Les organes touchés sont également principalement les feuilles et les bourgeons, excepté pour les deux espèces du genre *Abies* dont les pousses apicales sont les plus touchées, tandis que l'organe le plus touché de *Q. cerris* est le tronc.



6. Discussion

La section ci-dessous propose la discussion en lien avec les résultats. Comme mentionné précédemment (cf. 4.2) un tableau détaillé a été élaboré dans le cadre de ce mémoire, à partir de plusieurs sources (Annexe K) (Aussenac, 2002; Centre National de la Propriété Forestière, s. d., 2023; *Climate-Vegetation Atlas of North America*, s. d.; *Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.; *Fichier écologique des essences*, s. d.; *Graines et plants forestiers*, 2025; H. H. Cochard et al., 2016; Dancart, 2023; Dumé et al., 2018; Fady & Scotti-Saintagne, 2023; Fauconnier, 2009; Nageleisen et al., 2010; Société Royale Forestière de Belgique, s. d.-a). La sensibilité à différentes contraintes, les besoins en eau, en lumière et en températures y sont répertoriés. Il constitue une base pour l'interprétation des résultats présentés car l'écologie des espèces explique certains des résultats. La majorité des informations concerne l'écologie générale des espèces. Or, l'étude porte sur le stade juvénile : les interprétations doivent donc être faites avec prudence, les jeunes plants pouvant être plus sensibles que les adultes.

6.1. Les valeurs aberrantes

6.1.1. Les causes liées aux valeurs aberrantes

L'étude de l'évolution de la hauteur au cours du temps a permis de révéler une proportion de valeurs aberrantes dans la base de données. En effet, comme expliqué dans le Tableau 4, une perte de hauteur entre deux années consécutives n'est biologiquement pas possible et plusieurs causes sont possibles. D'abord, les mesures de hauteur peuvent être imprécises en raison de la méthode de mesure. Par exemple, la mesure n'est pas toujours prise au bourgeon apical ou bien le mètre est légèrement incliné, pouvant induire des différences de hauteurs négatives entre deux années consécutives.

Ensuite, l'encodage dans *EpiCollect* peut également constituer une source d'erreur. Celles-ci proviennent, par exemple, du mauvais encodage d'un chiffre ou de l'omission d'une ligne provoquant un décalage des données ultérieures.

De plus, l'identification du statut de l'arbre contribue à expliquer la présence de valeurs aberrantes. Par exemple, si un arbre n'est pas présent, il sera identifié comme absent et ne sera, par conséquent, pas mesuré. Cependant, si celui-ci est caché sous la ronce, il peut vraisemblablement être vivant. Donc, si des dégagements ont lieu l'année d'après, l'arbre sera identifié comme vivant et sera mesuré, ce qui engendrera un ΔH négatif. Identifier l'arbre comme mort suit la même logique. En effet, si l'arbre est identifié comme mort car il n'a plus de feuilles ou que celui-ci a eu des dégâts sylvicoles, il ne sera pas mesuré. Or, si l'écorce est grattée et que la moelle est verte, cela signifie qu'il est vivant. Si cette étape n'est pas réalisée lors des mesures, alors l'arbre est considéré comme mort alors que celui-ci reprendra sa croissance l'année suivante. Par conséquent, ces mesures erronées engendrent des ΔH négatifs.

6.1.2. Les limites de la méthodologie

La méthode présente des limites. En effet, l'ensemble de ces pertes de hauteur ne sont pas systématiquement des valeurs aberrantes. Par exemple, elles peuvent être liées à des causes connues qui sont soit biotiques, notamment des dégâts liés au gibier ou de la compétition avec la végétation concurrente, soit des causes abiotiques, notamment des dégâts de gel et sylvicoles. De plus, les ΔH anormalement élevés peuvent être effectivement liés à une croissance exceptionnellement vigoureuse. Le nombre de valeurs aberrantes a donc été surestimé.

Enfin, comme le projet se base sur la science participative pour la collecte de données, il y aura toujours des valeurs aberrantes présentes dans la base de données. En effet, la science participative contient des risques méthodologiques liés notamment à la qualité des données (Houllier et al., 2017).

6.1.3. Les tendances observées

L'analyse des valeurs aberrantes met en évidence deux tendances : une plus grande fiabilité pour les données des résineux et pour celles effectuées à cinq ans (Figure 18 et Figure 19). En effet, la formation des volontaires s'est progressivement améliorée au cours du temps. Les formations ont permis de mettre des points d'attention sur certaines mesures à prendre et d'expliquer comment prendre les mesures de façon standardisée. Par exemple, une erreur fréquente est la prise de hauteur lorsque l'arbre est incliné. Cependant, certaines mesures de hauteur ont été mesurées en « redressant » l'arbre lorsque celui-ci était incliné. Donc, si, une année, l'arbre incliné est redressé afin d'y mesurer la hauteur et que l'année suivante celui-ci est mesuré correctement sans le redresser, alors le ΔH est négatif ce qui peut entraîner une valeur aberrante. Ces erreurs ont donc été expliquées lors des journées de formation permettant de diminuer le nombre d'erreurs au cours du temps.

De plus, la croissance des arbres est une autre cause probable de cette tendance. En effet, à l'âge de cinq ans, les arbres sont plus grands qu'à un an leur permettant d'être plus visibles même si la végétation est présente.

Néanmoins, le nombre total de données diffère selon l'espèce et selon le ΔH . Par exemple, *C. atlantica* possède plus de données toutes années confondues qu'*A. bornmuelleriana* (Annexe N). Cette disproportion impacte l'analyse de la répartition des valeurs aberrantes. En effet, plus le nombre de données est réduit, plus les résultats sont sensibles aux variations aléatoires. L'analyse devient donc moins fiable.

6.2. Croissance en hauteur

6.2.1. Les tendances générales observées

Afin d'identifier les tendances générales de hauteur, l'évolution de la hauteur en fonction de l'âge a été représentée (Figure 20 et Figure 21). Les résultats montrent trois constats. Premièrement, la hauteur évolue positivement en fonction de l'âge. Ces observations rejoignent plusieurs observations et études (Dagnelie et al., 1999).

Deuxièmement, la croissance en hauteur est différente en fonction de l'espèce. Comme le soulignent les *Fiches espèces de ClimEssences* (s. d.), les espèces proposent des croissances initiales différentes, comprises entre moins de 20 et plus de 80 cm.an⁻¹.

Troisièmement, la variabilité de la hauteur est fonction de l'espèce et de l'âge (Figure 21). En effet, les écarts types sont plus élevés à cinq ans par rapport à un an car, comme les arbres grandissent au cours du temps, des différences marquées peuvent apparaître dues à la compétition entre les arbres. Ceci crée de l'hétérogénéité en hauteur. Par exemple, les deux espèces du genre *Abies* présentent une faible hétérogénéité car elles sont peu sensibles à la concurrence, étant toutes les deux sciaphiles au stade juvénile (*Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.; Société Royale Forestière de Belgique, s. d.-a). *Q. pubescens* quant à lui est plus hétérogène que les autres *Quercus*. En effet, il est héliophile contrairement à *Q. cerris* et *Q. petraea* au stade juvénile (Centre National de la Propriété Forestière, s. d., 2023; *Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.; *Fichier écologique des essences*, s. d.; *Graines et plants forestiers*, 2025). Néanmoins, le besoin en lumière n'explique pas l'ensemble de ces tendances. En effet, *T. cordata*, bien qu'elle soit une espèce de demi-ombre (*Fichier écologique des essences*, s. d.), présente une grande variabilité de hauteur. Cela peut s'expliquer par d'autres facteurs tels que la présence de gibier qui endommagerait les plantations et donc qui ralentirait la croissance.

Enfin, bien que chaque évolution de la hauteur augmente de façon soutenue, *A. nordmanniana* et *C. atlantica* stagnent à six ans formant une courbe sigmoïde. En effet, le seul site ayant six ans, planté en 2018-2019, est Lierneux possédant une altitude assez élevée. Comme *C. atlantica* n'est pas en optimum en Ardenne (*Fichier écologique des essences*, s. d.), il est donc logique d'avoir la hauteur moyenne stagnante à six ans car les hauteurs sur ce site sont plus faibles en moyenne. *A. nordmanniana* présente des dégâts de gel sur ce site expliquant une croissance plus lente car cette espèce est un peu sensible aux gelées tardives (*Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.).

6.2.2. Les groupements d'espèces

Le modèle de croissance a permis de montrer que l'espèce avait un effet significatif sur la croissance. Afin d'évaluer la cohérence des résultats obtenus, l'évolution de la hauteur prédite en fonction de l'espèce (Figure 22) et les accroissements en hauteur par espèce ont été analysés (Tableau 7).

L'accroissement des deux espèces du genre *Abies* était compris entre 15,7 et 18,1 cm.an⁻¹. Ceux de *C. decurrens* et *T. cordata* étaient de 26,3 et 30,6 cm.an⁻¹. Ensuite, les trois espèces du genre *Quercus*, *P. menziesii* et *C. atlantica* montraient des accroissements compris entre 39,9 et 42,2 cm.an⁻¹. Enfin, en ce qui concerne les espèces du genre *Pinus*, *P. pinaster* révèle la croissance la plus rapide avec 81,4 cm.an⁻¹, suivi de *P. sylvestris* avec 61,0 cm.an⁻¹, tandis que *P. nigra* indique la croissance la plus faible avec 56,8 cm.an⁻¹.

Dans un premier temps, ces résultats peuvent être confrontés directement aux tendances identifiées par leur écologie (Annexe K). D'abord, les deux espèces du genre *Abies* et *C. decurrens* présentent des croissances tardives selon leur écologie (*Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.) tandis que les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire montrent également une croissance plus lente dans les cinq premières années. Ensuite, les résultats obtenus ont mis en évidence des croissances plus précoces chez les espèces *Q. cerris*, *Q. petraea*, *Q. pubescens*, *C. atlantica* et *P. menziesii*, ce qui est confirmé par les croissances obtenues leur écologie (*Fichier écologique des essences*, s. d.; *Graines et plants forestiers*, 2025; Société Royale Forestière de Belgique, s. d.-a). Enfin, *P. pinaster* présente une croissance rapide selon son écologie (*Graines et plants forestiers*, 2025), de même que les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire. La hauteur prédite à cinq ans pour *P. pinaster* peut être extrapolée et comparée aux tables de production, fournissant des valeurs à partir de douze ans : la hauteur prédite tendrait vers les hauteurs de référence (Lemoine, 1969).

En revanche, certaines espèces montrent des vitesses de croissance différentes de la littérature. Par exemple, *T. cordata* présente ici une croissance plutôt tardive de 30,6 cm.an⁻¹ alors que le *Fichier écologique des essences* (s. d.) lui accorde une croissance plus précoce. Pour *P. nigra* et *P. sylvestris*, le *Fichier écologique des essences* (s. d.) mentionne respectivement une croissance moyennement précoce et précoce. Or, les résultats obtenus ont montré des croissances relativement élevées de 56,8 et 61,0 cm.an⁻¹, ce qui suggère un comportement plus précoce pour les deux.

Ces divergences de résultats pourraient s'expliquer par plusieurs causes biotiques et abiotiques. Par exemple, une modification de l'accès à la lumière des différents plants, des apports en eau ou encore des températures peuvent favoriser ou freiner la croissance de façon locale. Une UG possédant un climat défavorable pourrait baisser l'accroissement d'une espèce. La génétique des plants, les conditions de plantation, les dégâts liés au gibier ou encore la concurrence avec la végétation peuvent également favoriser ou freiner la croissance d'une UG donnée, causant un biais dans le calcul de l'accroissement d'une espèce. Enfin, il est utile de préciser que le modèle repose sur l'hypothèse d'une croissance linéaire.

Dans un second temps, le modèle a permis d'identifier les groupes d'espèces ayant une croissance similaire. Plusieurs causes sont à l'origine de ces groupes. En effet, certaines espèces se regroupent entre elles selon leur écologie et leur aptitude. Tout d'abord, les espèces sciaphiles et de demi-ombre se rassemblent dans les groupes à croissance plus faible, c'est-à-dire les groupes *a* et *b*, tandis que les espèces héliophiles montrent principalement des croissances plus élevées (Klooster et al., 2007), à l'exception de *C. decurrens* (Annexe K).

Les trois genres *Pinus* montrent également des croissances plus élevées, notamment grâce à leur large gamme hydrique (*Fichier écologique des essences*, s. d.; *Graines et plants forestiers*, 2025) leur permettant de s'adapter sur différents types de sol. Parallèlement, les espèces présentes dans un groupe donné montrent occasionnellement des amplitudes trophique et hydrique pratiquement similaires, comme les deux espèces du genre *Abies* qui montrent toutes les deux un niveau hydrique compris entre -2 et 2 (*Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.).

De plus, les espèces *A. nordmanniana*, *A. bornmuelleriana* et *C. decurrens* disposent d'une croissance faible ce qui pourrait résulter de leur sensibilité à l'argile compact (Fauconnier, 2009; *Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.) bien que cela ne soit pas généralisé à toutes les espèces. En effet, certaines sensibles à l'argile compact ne montrent pas d'office une croissance plus faible.

Enfin, les deux espèces du genre *Abies* bénéficient également de la même résistance à la sécheresse (Ducrey, 1998; *Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.) ainsi que la même sensibilité aux stations à faible réserve en eau (Aussenac, 2002; *Graines et plants forestiers*, 2025), ce qui pourrait expliquer pourquoi elles appartiennent au même groupe.

6.2.3. Validation et limites du modèle

Le modèle de l'Équation [8] a permis de fournir des résultats mais celui-ci présente quelques limites. En effet, à la suite de la réalisation de ce modèle, plusieurs questions peuvent se poser : est-ce que la prédiction est fiable pour chaque espèce, chaque âge et chaque site ? Afin de répondre à ces questions, les figures de l'Annexe Q montrent les évolutions des hauteurs moyennes observées en fonction de la hauteur prédite selon l'espèce et l'âge (Annexe Q.1) et montrent également, par espèce, l'évolution des hauteurs observées en fonction de la hauteur prédite par site et par âge (Annexe Q.2). Il convient de souligner qu'il y a une certaine variabilité autour de chaque point de ces figures.

D'abord, la proximité des points à la bissectrice montre que les hauteurs prédites coïncident globalement avec les hauteurs réellement observées. En effet, plus le point est proche de la bissectrice, plus la prédiction est fidèle à la réalité. Cependant, les hauteurs observées à cinq ans sont supérieures aux hauteurs prédites. Cela signifie que, à partir de cinq ans, le modèle devient moins valide car il sous-estime la hauteur réellement observée.

Donc, la prédiction est fiable pour chaque espèce et pour chaque site tandis que le modèle tend à sous-estimer les hauteurs à l'âge de cinq ans. En effet, le modèle repose sur l'hypothèse d'une croissance linéaire. Or, la croissance n'est plus linéaire à partir d'un certain âge. En effet, les courbes de croissance sont souvent représentées par une courbe sigmoïde (Salas-Eljatib et al., 2021). Cela signifie que, à partir d'un certain âge, l'arbre va avoir une croissance de type exponentielle. Les données à cinq ans sont donc à prendre avec précaution.

Enfin, il pourrait être pertinent de réaliser d'autres modèles montrant des relations non linéaires pour les arbres de plus de cinq ans afin de représenter le changement croissance.

6.2.4. Hétérogénéité de la croissance à cinq ans selon l'espèce

Afin d'évaluer la régularité des espèces, l'hétérogénéité de la croissance a été étudiée à travers le coefficient de variation à cinq ans. Des différences de croissance entre individus d'une même espèce âgés de cinq ans sont observées (Figure 23). En effet, la croissance d'une espèce est variable au sein d'une même UG et entre UG. Ces variations peuvent s'expliquer par l'effet de l'espèce, une analyse des données et des fiches de terrain récoltées.

Tout d'abord, *P. pinaster* présentait une grande variabilité entre UG. En effet, *P. pinaster* comptabilise seulement quatre UG à cinq ans dont l'une d'entre elles est fortement touchée par l'armillaire. Par conséquent, la croissance est ralentie dans cette UG par rapport aux autres UG ce qui peut entraîner des disparités de croissance entre les quatre UG.

De plus, *T. cordata* suit la même tendance que *P. pinaster*. En effet, *T. cordata* a été planté dans sept UG il y a cinq ans, dont l'une d'elles possède des plants qui n'ont été protégés qu'à moitié (un plant sur deux a été protégé). Or, *T. cordata* est moyennement sensible aux dégâts liés au gibier (*Fichier écologique des essences*, s. d.). En raison de cela, des mortalités importantes et des ralentissements de croissance ont eu lieu à cause des dégâts liés au gibier. Ensuite, une autre UG a subi des dégâts liés aux vaches. Par conséquent, une majorité de plants a été couchée provoquant des hétérogénéités au sein de l'UG. Donc, pour ces raisons, il y a des hétérogénéités entre UG et au sein d'une même UG.

Ensuite, *A. bornmuelleriana* montrait une hétérogénéité de croissance au sein d'une même UG. En effet, certaines UG ont montré des problèmes pouvant causer cette hétérogénéité. *A. bornmuelleriana* est planté sur trois UG différentes, une à Hamoir (PelOufAboBos), à Lierneux (ChaLieAboBos) et à Tintange (OrtTinAboBos). Selon les fiches de terrain, il y a eu des dégâts de dégagement en 2020 et 2021 et des dégâts de gel en 2020 à Hamoir. Par conséquent, leur croissance peut être compromise et retardée ce qui peut causer des croissances différentes entre arbres d'une même UG. À Lierneux, l'UG se situe dans un couloir venteux causant des dégâts de gel tardif bien que cette espèce est peu sensible aux dégâts de gel (*Graines et plants forestiers*, 2025). Par conséquent, les croissances ont également été retardées chez certains arbres. En revanche, à Tintange, aucune particularité n'a été identifiée par le propriétaire. De plus, cette UG possède le coefficient de variation le plus faible montrant donc une plus grande homogénéité au sein de cette UG.

Enfin, certaines valeurs aberrantes (points noirs sur la Figure 23) peuvent s'expliquer par un nombre faible d'individus dans une UG. Par exemple, l'UG duPOveQceFra contenant du *Q. cerris* à Overijse ne possède plus que neuf individus. En raison du faible nombre d'échantillons, la variabilité peut artificiellement augmenter.

Ces hétérogénéités pourraient s'expliquer par plusieurs causes, déjà mentionnées dans la section précédente. Par exemple, l'accès à la lumière, les apports en eau, les températures, les dégâts liés au gibier (Overijse, Roly, Postel sont touchés, en particulier) ou encore la concurrence avec la végétation peuvent freiner la croissance d'une UG donnée, causant des hétérogénéités entre UG et au sein d'une même UG.

L'analyse de la Figure 23 présente une limite. *A. bornmuelleriana* présente un coefficient de variation plus élevé que *C. atlantica* alors que, sur le terrain, la tendance semble s'inverser : les cèdres paraissent plus hétérogènes que les sapins de Bornmüller. Cette tendance peut s'expliquer par leur hauteur. En effet, à dispersion identique, les cèdres paraissent plus hétérogènes car ils sont plus grands. Or, le coefficient de variation rapporte une variabilité relative, égale à σ divisé par μ (Équation [3]). Par exemple, le coefficient de variation de trois arbres d'*A. bornmuelleriana* mesurant 60, 80 et 100 cm sera de 25 % tandis que trois arbres de *C. atlantica* mesurant 160, 200 et 240 cm auront un coefficient de variation égal à 20 %. Donc, observer une plus grande différence sur le terrain ne signifie pas que l'UG est plus hétérogène.

6.2.5. L'influence du site sur la croissance

L'étude de l'influence du site sur la croissance de *Q. pubescens* et *C. atlantica* a montré que le site influence significativement la croissance de ces espèces. Afin de comprendre pourquoi des différences sont observées entre sites, une analyse de comparaison est réalisée en se basant sur l'Annexe S reprenant les données stationnelles ainsi que l'écologie présentée en Annexe K.

Étude de *Quercus pubescens*

Trois groupes simplifiés ont été identifiés : la croissance lente pour les sites d'Ouffet, Bois de l'Or et Ciergnon, une croissance intermédiaire pour Gomery et Hamoir et enfin la croissance rapide pour les sites de Rumillies, Saint-Léger, Jenneret, Ohey et Postel.

Tout d'abord, la zone bioclimatique joue un rôle sur la croissance du chêne. En effet, les sites à croissance lente se situent plutôt en Ardenne tandis que les sites à croissance intermédiaire et rapide se retrouvent en Campine, Plaines et vallées Scaldisiennes et Condroz. Cela s'explique par le fait que les températures sont plus douces et que la saison de végétation est plus longue. De plus, comme *Q. pubescens* est sensible aux grands froids et aux gelées tardives (Centre National de la Propriété Forestière, 2023; *Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.), l'Ardenne ne lui convient pas. Cependant, aucune tendance n'est identifiée pour l'altitude bien que celle-ci soit liée à la zone bioclimatique.

Ensuite, *Q. pubescens* est en optimum/tolérance lorsque le niveau trophique est compris entre -2 et 2 (Dumé et al., 2018). Selon l'Annexe S, l'ensemble des sites se situe dans cette gamme-là. Plus spécifiquement, les sites présentant un niveau trophique optimale, entre 0 et 2, se retrouvent dans le groupe de croissance rapide (Rumillies et Saint-Léger). Seul Ouffet est l'exception dont celle-ci sera abordée plus loin.

En ce qui concerne le niveau hydrique, *Q. pubescens* est en optimum/tolérance lorsqu'il est compris entre -2 et 4 (Dumé et al., 2018). Cependant, selon les données stationnelles, les sols très secs (NH égal à 4) montrent des croissances plus faibles. Le chêne pubescent pourrait donc être plus sensible aux sols secs au stade juvénile.

De plus, les sites Gomery et Rumillies possèdent un niveau hydrique alternatif de -2. Or, *Q. pubescens* est sensible à l'engorgement du sol (Centre National de la Propriété Forestière, 2023). Le niveau hydrique n'explique donc pas la croissance intermédiaire de ces sites.

Afin d'approfondir l'analyse du site, le pourcentage d'arbres touchés par des fourches a été calculé de la même manière qu'au point 4.4.3 mais par site. Les sites avec une croissance plus rapide montrent des pourcentages de fourche moins importants, compris entre 0 et 2,78 % d'arbres touchés. La présence de fourches pourrait s'expliquer par des dégâts de gel, liés au gibier ou sylvicoles, selon les fiches de terrain des différents sites. En effet, les sites non touchés montrent des croissances plus élevées.

De plus, aucune tendance n'est identifiée pour l'exposition et la position du site. Or, *Q. pubescens* est une espèce héliophile qui préférera les sites à secteur chaud (Centre National de la Propriété Forestière, 2023). Donc, ces facteurs n'expliquent pas la différence de croissance.

Enfin, les données stationnelles ont montré que la compaction du sol n'impacte pas la croissance du chêne. Cependant, le seul site ayant un sol meuble et ayant une charge caillouteuse inférieure à 5 % est Postel, ce qui pourrait expliquer une croissance plus rapide sur ce site.

Cependant, un des dix sites, Ouffet, montre des tendances opposées. Bien que le chêne pubescent soit en optimum/tolérance sur ce site, sa croissance n'est que de 17,2 cm.an⁻¹. En effet, la plantation de chênes pubescents à Ouffet se situe en prairie, soumise à des vents d'est provoquant des assèchements et des gelées. Sensible aux gelées tardives (*Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.), *Q. pubescens* voit sa croissance ralentie sur ce site. La présence de lièvre et de chevreuil sur ce site, mentionnées dans les fiches de terrain, contribuent également au ralentissement de la croissance du chêne.

Pour conclure cette analyse, une étude a été réalisée afin de tester l'efficacité du type de plant chez le chêne pubescent en ne prenant en compte que les sites pour lesquels les deux types de plant sont testés. Les résultats ne montrent pas un effet significatif du type de plant sur la croissance bien qu'une différence visuelle soit observée sur la Figure 25. En effet, le godet présentait une meilleure croissance que les racines nues. Ce résultat coïncide avec les observations rapportées dans le milieu forestier, notamment en pépinière (Centre Technique Du Génie Rural Des Eaux Et Forêts, 1975). En effet, bien qu'ils coûtent plus chers que les racines nues, le godet présente une meilleure croissance, ce qui peut justifier leur utilisation.

Étude de *Cedrus atlantica*

Trois groupes simplifiés ont été identifiés : la croissance lente pour les sites Vierves-sur-Viroin, Tintange et Lierneux, une croissance intermédiaire pour Porcheresse, Roly, Château Regnault, Hamoir et Poppel et enfin la croissance rapide pour les sites de Postel et Stoumont.

Tout d'abord, le site de Stoumont montre des tendances surprenantes. En effet, malgré sa croissance qui s'élève à 47,0 cm.an⁻¹, les conditions stationnelles de ce site ne sont pas optimales pour le cèdre. Le cèdre est censé être en tolérance en Ardenne, sensible sur les sols compacts et il présente un risque faible lorsqu'il est planté sur un secteur froid, en versant nord (*Fichier écologique des essences*, s. d.). Aucune explication, à ce jour, ne permet d'expliquer cette tendance.

La zone bioclimatique joue un rôle sur la croissance du cèdre. En effet, les sites à croissance lente se situent en Ardenne tandis que les sites à croissance rapide se retrouvent dans le centre du pays et en Campine. En effet, selon le *Fichier écologique des essences* (s. d.), le cèdre se trouve en optimum en Plaines et Vallées Scaldisiennes, Hesbino-brabançon, Sambre-et-Meuse et Condroz et en Lorraine, en tolérance en Fagne, Famenne et Basse et moyenne Ardenne, et en exclusion en Ardenne et Haute Ardenne.

Ensuite, le cèdre est en optimum lorsque le niveau trophique est compris entre -2 et 1 et est en tolérance pour des niveaux de -3 et 2, selon le *Fichier écologique des essences* (s. d.). Selon l'Annexe S, l'ensemble des sites se situe dans la gamme optimale ce qui signifie que ce n'est pas le niveau trophique qui explique des différences de croissance. Cependant, le cèdre est uniquement en tolérance pour le niveau trophique à Poppel ce qui pourrait expliquer sa croissance intermédiaire bien qu'il soit sur un secteur neutre, favorable à sa croissance.

En ce qui concerne le niveau hydrique, le cèdre est en optimum lorsqu'il est compris entre 0 et 3 et est en tolérance pour des niveaux de -1, 4 et 5, selon le *Fichier écologique des essences* (s. d.). Selon les données stationnelles, la grande majorité des sites se situe dans la gamme d'optimum sauf pour les sites Château Regnault et Postel possédant une croissance intermédiaire et rapide respectivement. Le niveau hydrique ne semble donc pas influencer la croissance.

De plus, les données stationnelles indiquent que l'exposition et la texture du sol influencent la croissance. En effet, les sites à exposition froide montrent des croissances plus faibles que ceux à exposition neutre, pouvant s'expliquer par le comportement thermophile de l'espèce (*Fichier écologique des essences*, s. d.). Par ailleurs, un gradient de croissance est observé selon la texture avec des valeurs croissantes du limon au sable. Cette tendance pourrait s'expliquer par le système racinaire pivotant et profond du cèdre, préférant les sols avec une bonne structure afin de favoriser une meilleure pénétration racinaire (*Fichier écologique des essences*, s. d.).

Afin d'approfondir l'analyse du site, le pourcentage d'arbres touchés par des fourches a été calculé de la même manière qu'au point 4.4.3 mais par site. Ces résultats montrent que les sites en Campine possèdent des croissances plus rapides avec un pourcentage de fourches moins importants, compris entre 0 et 9,33 %. En revanche, les sites ayant des arbres plus fourchés montrent des croissances plus faibles. En effet, le cèdre est sensible aux gelées (*Fichier écologique des essences*, s. d.) pouvant induire des dégâts de gel et donc des fourches par la suite.

Enfin, les données stationnelles ont montré que la compaction du sol n'impacte pas la croissance du cèdre. Or, le cèdre est sensible aux sols compacts (*Fichier écologique des essences*, s. d.). Cela ne se démontre pas dans ces résultats bien que les sols meubles des sites de Poppel et Postel montrent une croissance plus rapide.

Limites de l'étude de l'effet du site

Une des limites principales de cette étude est le faible nombre de sites considérés car certaines tendances n'ont pas été observées. Le nombre de variables par site étant nombreuses, l'analyse devient alors complexe à réaliser.

6.3. Taux de survie

Après avoir analysé la croissance en hauteur en détail, il convient d'étudier le taux de survie, qui constitue un facteur clé. En effet, une espèce avec une croissance rapide en hauteur ne signifie pas systématiquement un taux de survie acceptable. Les résultats précédents (cf. 5.3) mettent en évidence des tendances différentes de taux de survie en fonction de l'espèce et de l'année considérée. Cette section vise donc à identifier les potentiels facteurs qui influencent le taux de survie.

Tout d'abord, le taux de survie diminue systématiquement l'année qui suit la plantation, à l'exception de *P. sylvestris*. En effet, selon Ivetić et al. (2026), il existe plusieurs facteurs causant cette diminution notamment les facteurs extrinsèques (stress environnementaux) et intrinsèques (la génétique) dont les facteurs extrinsèques peuvent être biotiques ou abiotiques. Par exemple, des facteurs biotiques peuvent être la forte concurrence avec la végétation et l'abrouissement par le gibier tandis que des facteurs abiotiques peuvent être les dégâts de gel et de sécheresse ainsi que la qualité des opérations de plantation. Pour ce dernier, si les plants ne sont pas manipulés de façon correcte, cela peut les blesser et les affaiblir favorisant la mortalité des plants (Ivetić et al., 2026).

Ensuite, *P. menziesii* possède des taux de survie globalement inférieurs à 80 %. Le site d'Yvoir, un des sites sur lequel *P. menziesii* est planté, est endommagé par le sanglier depuis 2020, ce qui fait légèrement chuter le taux de survie car il est sensible aux dégâts liés au gibier (*Fichier écologique des essences*, s. d.). Cependant, le site faisant le plus chuter les taux de survie est Vierves-sur-Viroin bien qu'aucune explication puisse expliquer ces taux faibles.

De plus, *P. pinaster* montre une chute du taux de survie moyen de 33,5 % en cinq ans. Selon l'Annexe T présentant les UG concernés par des taux de survie inférieurs à 80 % en 2024, l'ensemble des UG de *P. pinaster* sont concernées par cette baisse : il s'agit des sites d'Helchteren, de Postel et de Poppel. Cette tendance pourrait s'expliquer par l'armillaire.

L'armillaire (*Armillaria sp.*) est présente sur le site d'Helchteren et de Postel provoquant donc un grand nombre de mortalités dans ces UG. En effet, le pin maritime est une espèce sensible à ce champignon pathogène entraînant une mortalité importante (Husson, 2025; Lung-Escarmant & Guyon, 2004). De plus, l'ensemble des plantations de *P. pinaster* ont été réalisées après des résineux, ce qui aurait permis à l'armillaire de persister dans les souches et les racines pouvant entraîner la contamination de la plantation des pins maritimes (Epidemiology of Armillaria Root Disease in Plantations, 2001; Lung-Escarmant & Guyon, 2004). Néanmoins, l'armillaire n'a pas été officiellement identifiée sur le site de Poppel. Il est toutefois possible qu'elle y soit présente sans avoir été détectée, ce qui pourrait expliquer la chute du taux de survie dans ce site-là.

Puis, des chutes ont été observées entre 2023 et 2024 chez certaines espèces. Le taux de survie de *P. pinaster* chute de 9 %, celui de *T. cordata* chute de 13,8 % tandis que *Q. pubescens* et *Q. petraea* chutent respectivement de 8,70 % et 7,90 %. Toutefois, l'étude de chaque UG concernée par un taux de survie inférieur à 80 % montre des trajectoires individuelles probables, sans chute brutale à une année donnée. En effet, selon les caractéristiques de

chaque UG reprises en Annexe T, plusieurs causes pourraient être à l'origine de ces chutes. Dans un premier temps, les plantations dans les sites d'Overijse, de Roly et de Postel sont endommagées par le sanglier tandis que celles d'Overijse sont touchées par le chevreuil. Les plants peuvent donc être piétinés, frottés ou encore abroutis ce qui pourrait expliquer les chutes du taux de survie, étant donné que seulement cinq UG sur les treize ayant un taux de survie inférieur à 80 % en 2024 sont protégées par une clôture ou de façon individuelle. En effet, *P. pinaster*, *T. cordata* et *Q. petraea* montrent une certaine sensibilité aux dégâts liés au gibier (*Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.; *Fichier écologique des essences*, s. d.).

En parallèle, les conditions de plantation pourraient également influencer le taux de survie. En effet, pour les UG ayant un taux de survie inférieur à 80 % en 2024 (Annexe T), la totalité de ces UG montre la présence de végétation au sein de la plantation dont celle-ci est concurrente chez neuf sur les treize UG.

Néanmoins, l'engorgement permanent ou temporaire des sites ne semble pas expliquer les chutes du taux de survie observées dans les UG ayant un taux de survie inférieur à 80 % en 2024. En effet, aucune de ces UG ne se situe en fond de vallée. Par ailleurs, le site d'Helchteren présente un niveau hydrique de -1 RHA, mais *P. pinaster* tolère un faible engorgement (*Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.; *Graines et plants forestiers*, 2025). Cette variable ne paraît donc pas être l'origine des chutes observées.

Une dernière hypothèse concerne l'effet du climat sur les taux de survie. Selon les lettres d'information de l'OWSF (Direction du Milieu forestier, 2022), une sécheresse est survenue en 2022 ce qui pourrait être la cause de ces baisses de taux de survie. En effet, les sécheresses qui ont lieu au printemps ou au début de l'été en 2022 ont un impact plus important sur la vitalité des arbres (Direction du Milieu forestier, 2022; Vitasse et al., 2023).

La Figure 27 montrait également des évolutions aberrantes du taux de survie moyen par espèce au cours du temps. En effet, le taux de survie moyen diminuait puis augmentait à nouveau s'expliquant par des erreurs de recensement des statuts. En effet, ces erreurs suivent la même logique que celle présentée dans les causes liées aux valeurs aberrantes (cf. 6.1.1). Par exemple, des individus considérés comme morts ou absents une année donnée en raison de l'abondance de la ronce ou de dégâts sylvicoles peuvent être identifiés comme vivants l'année suivante, ce qui augmente le taux de survie alors que l'arbre a toujours été en vie.

6.4. Conformation

L'analyse de la conformation a permis de mettre en évidence plusieurs points (Figure 29). Tout d'abord, 29,0 % des cèdres sont fourchés pouvant s'expliquer par sa sensibilité aux gelées tardives (*Fichier écologique des essences*, s. d.).

Ensuite, 19,8 % des *P. nigra* montrent des problèmes de fourches. Cependant, *P. nigra* est peu sensible aux gelées précoces donc il est possible qu'il ne fourche pas à cause des dégâts de gel, comme *C. atlantica* (*Fichier écologique des essences*, s. d.).

De plus, *A. bornmuelleriana* montre plus de fourches que *A. nordmanniana*. Cependant, comme *A. bornmuelleriana* est plus résistant aux gelées tardives que *A. nordmanniana* (*Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.), il est censé moins fourcher que *A. nordmanniana*. Cette contradiction semble davantage liée au fait qu'une UG d'*A. bornmuelleriana* se situe dans un couloir venteux. En effet, selon les fiches de terrain de Lierneux en 2023, l'UG ChaLieAboBos se trouve dans un couloir venteux pouvant exposer l'UG à des refroidissements, causant des dégâts de gel tardif chez 66 % des plants de cette UG. Le propriétaire a également notifié que 42 % des plants sont fourchus ou ont des cimes multiples dans cette UG.

Enfin, les inclinaisons observées chez les feuillus pourraient s'expliquer par l'emprisonnement des jeunes plants dans la ronce, induisant des tiges inclinées lorsque ces arbres sortiront de la ronce après dégagement. De plus, les résineux montrent quasi peu d'arbres inclinés en raison de leur dominance apicale qui leur confère une croissance à port droit.

6.5. État sanitaire

L'état sanitaire constitue également un élément important dans l'analyse. Des différences sanitaires sont observées entre les espèces et entre les années (Figure 31 à 34). Seule l'analyse des problèmes sera discutée, contrairement à celle des symptômes à cause de la variabilité de ceux-ci ainsi que de l'absence de tendance observable et interprétable.

Tout d'abord, les résultats mettent en évidence une sensibilité aux gels tardifs chez les espèces du genre *Abies* en 2022 et en 2024, chez *C. decurrens* et *C. atlantica* en 2024. En effet, des gelées tardives ont eu lieu ces deux années (Direction du Milieu forestier, 2022, 2024). Les observations obtenues pour le cèdre sont cohérentes avec le *Fichier écologique des essences* (s. d.) tandis que ce n'est pas le cas pour les espèces d'*Abies* et *C. decurrens*. En effet, les deux espèces du genre *Abies* sont peu sensibles aux gels tardifs (*Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.) tandis que la sensibilité de *C. decurrens* n'a pas été documentée. Il se pourrait donc que *C. decurrens* soit sensible aux gelées tardives au stade juvénile.

Ensuite, l'analyse sanitaire révèle une résistance à la sécheresse chez *C. decurrens*. En effet, celui-ci a montré de faibles parts d'arbres atteints par la sécheresse malgré une année 2022 sèche, confirmant sa résistance à la sécheresse (*Fiches espèces / ClimEssences*, s. d.).

De plus, les résultats montrent des sensibilités différentes à certains problèmes selon l'espèce, notamment l'oïdium (*Erysiphe alphitoides*) et la cécidomyie. La première sensibilité, l'oïdium, est observée chez les chênes en 2022 et en 2024. L'oïdium est en effet une maladie courante chez les chênes (Soutrenon, 1992). En revanche, l'année joue un rôle quant à la part d'atteints par ce problème. En effet, *Q. cerris* et *Q. pubescens* sont d'autant plus atteints par l'oïdium en année humide tandis que *Q. petraea* montre des proportions identiques. Cela signifie que *Q. petraea* est plus sensible à l'oïdium, contrairement aux deux autres espèces de chênes. En effet, *Q. cerris* et *Q. pubescens* ne sont atteints par l'oïdium que durant l'année humide ce qui pourrait signifier que ces deux espèces seraient plus sensibles uniquement dans des conditions humides. Ces résultats coïncident avec l'article de Marçais & Desprez-Loustau (2014) qui stipule que *Q. petraea* est plus sensible à l'oïdium tandis que *Q. cerris* est plus résistant. L'article ajoute

également que « La synchronisation phénologique entre la croissance de l'hôte et la production d'ascospores s'est avérée être un facteur important expliquant la gravité de la maladie chez *Q. petraea* ».

La seconde, la cécidomyie, est principalement observée chez *P. menziesii* en 2024, présente sur les sites Yvoir et Lierneux en 2021, 2023 et 2024. Ce sont en effet les mêmes sites et des équipes de volontaires différentes qui sont concernées, justifiant le fait que ce n'est pas une erreur d'observation. Or, ces résultats ne coïncident pas avec ceux de l'OWSF (Direction du Milieu forestier, 2024). En effet, les attaques de cécidomyie ont chuté de 85 % en trois ans, atteignant un niveau minimum en hiver 2024.

Enfin, les résultats mettent en évidence une faible sensibilité aux dégâts liés au gibier chez *P. sylvestris*. Il est en effet moyennement sensible au frottis (*Fichier écologique des essences*, s. d.).

Cependant, l'analyse des problèmes doit être interprétée avec prudence. En effet, la majorité des mesures ont été réalisées par les volontaires et non par un Correspondant-Observateur³. Bien que les volontaires aient bénéficié d'une formation sur l'identification des problèmes, certains problèmes enregistrés peuvent avoir été erronés. Il est donc primordial d'interpréter ces résultats avec prudence. Afin d'analyser plus solidement l'état sanitaire, il serait judicieux de le relever par le réseau de Correspondants-Observateurs.

Le choix des deux années (2022 et 2024) présente également une limite. En effet, il est sous-entendu que les symptômes seront directement observables l'année même de l'occurrence d'un événement. Or, un temps de latence peut avoir lieu pour l'observation de certains problèmes.

L'analyse de l'état sanitaire s'est effectuée par espèce, sans différencier les sites. Or, certains sites sont plus exposés que d'autres à certains types de risques. Par exemple, certains sites comme Lierneux se situent dans un couloir venteux provoquant plus de dégâts de gel qu'une autre UG, ou bien certains sites comme Overijse sont soumis à une pression du gibier entraînant des dégâts sur les plants. Une étude plus fine par site serait pertinente afin d'évaluer de façon plus détaillée l'état sanitaire.

³ Les Correspondants-Observateurs sont chargés de surveiller et de signaler les problèmes sanitaires en forêt (SPW, s. d.-b).

7. Conclusion et perspectives

Ce mémoire s'inscrit dans un contexte où les forêts belges sont peu diversifiées et dominées par des espèces sensibles aux changements climatiques, constituant une préoccupation majeure quant à l'adaptation des forêts. Dans ce cadre, le projet *Trees for Future*, mis en place par la Société Royale Forestière de Belgique, vise à identifier des espèces et des provenances forestières contribuant à l'adaptation des forêts aux changements climatiques.

L'objectif principal de ce mémoire était, à travers les données collectées, d'analyser et de comparer les comportements et les besoins des espèces testées dans le cadre de ce projet, à leur stade juvénile, en Belgique. Au total, douze espèces ont été étudiées. Plus précisément, il s'agissait d'évaluer la croissance et le taux de survie, d'identifier les facteurs influençant la croissance, l'homogénéité de croissance pour une espèce et le taux de survie. Enfin, il s'agissait de déterminer les facteurs du site expliquant l'évolution de la croissance d'une espèce.

Les analyses de ce mémoire permettent de répondre aux sous-questions posées. Tout d'abord, les résultats montrent que l'espèce a un effet significatif sur la croissance des arbres permettant l'identification de plusieurs groupes de croissance. Les espèces *A. bornmuelleriana* et *A. nordmanniana* (groupe *a*), *C. decurrens* et *T. cordata* (groupe *b*) montrent des croissances plus faibles (15,7-30,6 cm.an⁻¹), *Q. cerris*, *Q. petraea*, *C. atlantica*, *P. menziesii* et *Q. pubescens* (groupe *c*) montrent des croissances intermédiaires (39,9-42,2 cm.an⁻¹) tandis que *P. nigra* (groupe *d*), *P. sylvestris* (groupe *e*) et *P. pinaster* (groupe *f*) montrent des croissances plus élevées (56,8-81,4 cm.an⁻¹). Ces regroupements peuvent notamment être expliqués par leur aptitude écologique similaire.

Au-delà de la description de la hauteur selon l'âge, le modèle de croissance permet d'identifier les facteurs influençant la croissance. En effet, grâce à l'analyse du test ANOVA et des variances du modèle, les résultats montrent que les effets fixes expliquent 67,7 % de la variabilité totale, les effets aléatoires expliquent 26,9 % tandis que la variance résiduelle est de 5,4 %. Pour les effets fixes, cette analyse permet de conclure que l'âge influence le plus le modèle, qui est suivi par l'interaction entre l'âge et l'espèce puis par l'espèce. Pour les effets aléatoires, l'effet ayant le plus d'influence est l'identifiant de l'arbre suivi de l'UG, du site et de l'année de plantation.

Ensuite, l'analyse de l'hétérogénéité de croissance montre que le coefficient de variation (CV) dépend significativement de l'espèce. Dans cette étude, les espèces les plus homogènes (CV faible) sont *P. nigra* et *P. sylvestris*, l'espèce la plus hétérogène est *T. cordata* (CV élevé) tandis que les autres espèces se situent entre ces deux cas. L'hétérogénéité de croissance peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Par exemple, *T. cordata* montre des ralentissements de croissance de certains arbres liés à des dégâts liés au gibier.

Par la suite, l'étude de l'influence du site sur la croissance de *Q. pubescens* et *C. atlantica* montre que le site influence significativement la croissance de ces espèces. Les facteurs expliquant les différences de croissance entre les sites reposent principalement sur l'écologie des espèces. Par exemple, comme ces espèces sont sensibles aux gelées tardives, la croissance de *Q. pubescens* et *C. atlantica* est ralentie dans les zones bioclimatiques plus froides car les

gelées tardives y sont plus fréquentes. Les sites touchés par des dégâts de gel montrent également des proportions plus importantes d'arbres fourchus, ralentissant leur croissance.

Enfin, les résultats mettent en évidence des tendances différentes de taux de survie en fonction de l'espèce et de l'année considérée. Plusieurs facteurs sont à l'origine des diminutions du taux de survie. Le premier est le stress après la plantation, causé par des stress environnementaux et par la génétique. Le deuxième est le facteur biotique, englobant la végétation concurrente, la pression du gibier ainsi que la sensibilité de certaines espèces aux pathogènes. Le facteur abiotique peut également causer des diminutions du taux de survie notamment liées à des dégâts de gel, de sécheresse ou encore de la qualité des travaux de plantation. Cependant, les résultats montrent que le taux de survie fluctue, alors que celui-ci est censé ne jamais augmenter. Cela est engendré par des erreurs de recensement.

Le choix des espèces pour le gestionnaire dépendra de plusieurs aspects. D'abord, le choix de l'espèce repose sur un compromis entre une croissance élevée, permettant un cycle sylvicole plus court, et un taux de survie élevé tel que les trois *Quercus*, *C. atlantica*, *P. nigra* et *P. sylvestris*. Au contraire, bien que *P. pinaster* possède la croissance la plus rapide, son taux de survie est faible, accompagné d'une sensibilité à l'armillaire le rendant moins durable dans le temps. Les autres espèces (*Abies*, *T. cordata* et *C. decurrens*) ne sont cependant pas à abandonner car le choix doit être remis dans son contexte : par exemple, la sensibilité de *T. cordata* aux dégâts liés au gibier peut être levée grâce à un investissement dans des protections.

Ensuite, lors du choix de l'espèce, il est recommandé de confronter l'écologie d'une espèce aux données stationnelles du site afin de choisir celle la plus adaptée. Par exemple, comme le montrent les résultats, *Q. pubescens* et *C. atlantica* seraient à éviter en Ardenne, en raison du climat plus froid.

Enfin, il est conseillé d'utiliser des protections contre le gibier, bien que cela soit coûteux, afin de limiter les dégâts liés au gibier. Les pertes sont également inévitables lorsque les plants, de petite taille, poussent dans une végétation concurrente dynamique. Néanmoins, l'impact peut être atténué notamment en mettant en évidence les plants à l'aide de bambous et en préférant intervenir deux fois sur la saison plutôt qu'une seule fois en fin de saison.

Cette étude présente plusieurs limites liées au dispositif et à la méthodologie. D'abord, le dispositif ne s'étend pour l'instant que sur cinq ans, ne laissant que peu de recul sur le comportement et les besoins des espèces à long terme. Réaliser à nouveau cette étude dans plusieurs années permettrait une meilleure évaluation à long terme.

De plus, concernant l'étude sur l'effet du site, certaines tendances n'ont pas été observées en raison du faible nombre de sites considérés par rapport au nombre de variables par site. Il est donc difficile d'isoler l'impact d'une seule variable. Si le dispositif devait être répliqué, les sites sur lesquels une espèce donnée est plantée devraient être homogènes ne différant que par deux ou trois variables, bien que cela soit complexe à mettre en place.

Ensuite, le protocole de mesure peut contenir certaines failles. Par exemple, il y a des imprécisions lors de la prise de mesure en hauteur provoquant des accroissements négatifs.

Des erreurs de recensement de la survie sont aussi parfois identifiées car les arbres peuvent être comptabilisés comme morts alors que ceux-ci sont vivants, cachés sous la ronce ou coupés lors de dégagement. Le recensement de l'état sanitaire montre également une proportion importante de problèmes inconnus, ne permettant pas de connaître précisément la cause du problème. Ces quelques limites peuvent être facilement évitées en améliorant la formation des volontaires, une démarche déjà initiée chaque année par la responsable du projet.

Enfin, les résultats montrent qu'il existe des facteurs externes à l'écologie de l'espèce qui perturbent leur croissance, de façon localisée par UG. Comme mentionné précédemment, les dégâts liés au gibier, sylvicoles et liés aux pathogènes provoquent des ralentissements de croissance et des mortalités. Afin d'éviter ces bruits méthodologiques, il serait judicieux, par exemple, de sensibiliser les propriétaires quant à l'importance de la protection contre le gibier.

Des limites se rapportent à la méthodologie utilisée dans ce mémoire. Tout d'abord, le nombre de valeurs aberrantes a été surestimé car la méthode considère une chute de hauteur comme *outlier* alors que de réelles chutes peuvent être observées lors de dégâts liés au gibier ou sylvicoles, par exemple.

Ensuite, la prédiction du modèle de croissance n'est plus fiable à partir de cinq ans. En effet, le modèle repose sur l'hypothèse que la croissance des espèces est linéaire. Or, la croissance n'est plus linéaire à partir d'un certain âge. Il pourrait être pertinent de réaliser d'autres modèles montrant des relations non linéaires pour les arbres de plus de cinq ans afin de représenter le changement de croissance.

Les résultats de l'hétérogénéité montrent également que le coefficient de variation de la hauteur à cinq ans peut être biaisé pour les espèces naturellement plus grandes, donnant une impression d'hétérogénéité.

De plus, le choix des deux années lors de l'étude de l'état sanitaire présente une limite. En effet, il est sous-entendu que les symptômes seront directement observables l'année même de l'occurrence d'un événement. Or, un temps de latence peut avoir lieu pour l'observation de certains problèmes. Il serait judicieux de choisir d'autres années en tenant compte de ce temps de latence.

Enfin, la base de données contient un ensemble de variables n'ayant pas été toutes étudiées. Par exemple, l'étude de la provenance, du type de plantation, de la relation entre la hauteur et le diamètre pourraient être effectuées. Il serait également intéressant de vérifier si les parcelles plantées à la houe hache ou à la tarière ont un impact sur la reprise des plants.

Pour conclure, une piste de recherche a été discutée avec la responsable du projet *Trees for Future*. Il s'agit de la mise en place d'un nouveau protocole de suivi. En effet, la hauteur des arbres dépasse celle de la perche utilisée lors des mesures, le taux de survie est faible dans certaines UG et les critères d'observation ne sont plus adaptés. Ce nouveau protocole permettrait d'adapter les méthodes de mesure, de ne se concentrer que sur les UG avec un taux de survie acceptable et d'améliorer les critères d'observation afin de mieux guider les travaux sylvicoles. Les résultats de ce mémoire pourraient contribuer à améliorer la méthodologie de ce futur protocole.

Références

- ACRVF, SPW ARNE, ELIE-UCL, GxABT-ULg, & FORÊT.NATURE. (s. d.-a). *Fichier écologique des essences—Épicéa commun (Picea abies)*. Consulté 4 mars 2026, à l'adresse <https://www.fichierecologique.be/#!/>
- ACRVF, SPW ARNE, ELIE-UCL, GxABT-ULg, & FORÊT.NATURE. (s. d.-b). *Fichier écologique des essences—Hêtre (Fagus sylvatica)*. Consulté 4 mars 2026, à l'adresse <https://www.fichierecologique.be/#!/>
- Aussenac, G. (2002). Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean fir in the context of climate change. *Annals of Forest Science*, 59(8), 823-832. <https://doi.org/10.1051/forest:2002080>
- Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., & Le Bas, C. (2010). Climate change and the biogeography of French tree species : First results and perspectives. In *Forests, Carbon Cycle and Climate Change* (Lucastu J., p. 231-252).
- Bauhus, J., Forrester, D. I., & Pretzsch, H. (2017). From Observations to Evidence About Effects of Mixed-Species Stands. In *Mixed-Species Forests: Ecology and Management* (p. 27-71). https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9_2
- Bello, P. J., Nicolas, L., & Sardin, T. (2022). Synthèse des résultats de la littérature scientifique sur les peuplements mélangés. *Rendez-vous Techniques de l'ONF, Rendez-vous Techniques de l'ONF*, (76), 4-17.
- Bertin, S., Balandier, P., Becquey, J., Bonal, D., Nathalie, B., Perrier, C., Riou-Nivert, P., & Sevrin, É. (2016). *Le bilan hydrique des peuplements forestiers. Etat des connaissances scientifiques et techniques—Implications pour la gestion*.
- Biologie végétale*. (s. d.). *Biologie végétale*. Consulté 27 mars 2026, à l'adresse <https://biologievegetale.be/>
- Bower, A. D., Frerker, K. L., Pike, C. C., Labonte, N. R., Palik, B. J., Royo, A. A., Anderson, S. M., Ferreira, A. R., & Brandt, L. A. (2024). A practical framework for applied forestry assisted migration. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 16. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1454329>

- Bréda, N. (1999). L'Indice foliaire des couverts forestiers : Mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue forestière française*, 51(2), 135-150. <https://doi.org/10.4267/2042/5426>
- Bréda, N., Granier, A., & Aussenac, G. (2004). La Sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : Analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue forestière française*, 56(2), 109-131. <https://doi.org/10.4267/2042/5081>
- Brendel, O., & Cochard, H. (2011). *Comment les espèces végétales s'adaptent au stress hydrique*.
- Centre de Recherche sur la Biodiversité et l'Environnement. (s. d.). *Sciences participatives*. CRBE - CNRS. Consulté 14 février 2026, à l'adresse <https://crbe.cnrs.fr/sciences-participatives/>
- Centre National de la Propriété Forestière. (s. d.). *L'autécologie du chêne pubescent*. Consulté 21 avril 2026, à l'adresse <https://www.cnpf.fr/nos-actions-nos-outils/focus-sur-quelques-projets/chene-pubescent-projet-conqueth>
- Centre National de la Propriété Forestière. (2023). *Synthèse du Réseau Régional d'Expérimentation et de Démonstration Hauts-de-France sur le chêne pubescent. Retour des premières années d'installation* (p. 70). Centre National de la Propriété Forestière - Délégation Hauts-de-France Normandie. <https://hautsdefrance-normandie.cnpf.fr/sites/hautsdefrance-normandie/files/2024-02/synth%C3%A8se%20ch%C3%AAne%20pubescent%202023.pdf>
- Centre National de la Propriété Forestière, & Office National des Forêts. (2025). *Catalogue d'Initiatives Sylvicoles Face aux Évolutions climatiques* (p. 299).
- Centre Technique Du Génie Rural Des Eaux Et Forêts. (1975). Reboisement en Pin laricio dans les Alpes sèches. Comparaison du comportement de plants en godets (étui d'aluminium) et de plants à racines nues (plants repiqués). *Revue Forestière Française*, 27(4), 304-306. <https://doi.org/10.4267/2042/20950>
- Climate-Vegetation Atlas of North America*. (s. d.). Consulté 22 avril 2026, à l'adresse <https://pubs.usgs.gov/pp/p1650-a/>
- Cochard, H., & Granier, A. (1999). Fonctionnement hydraulique des arbres forestiers. *Revue forestière française*, 51(2), 121-134. <https://doi.org/10.4267/2042/5425>

- Cochard, H. H., Badel, E., Herbette, S., Barigah, T. S., Souchal, R., & Conchon, P. (2016). *L'embolie et la vulnérabilité des arbres à la sécheresse* (Journées Portes Ouvertes INRA Crouel) [Journées Portes Ouvertes INRA Crouel].
- Conseil, E.-T., Amelung, B., Biernaux, M., Cauchy, A., Céron, J.-P., Cornélis, P., Dubois, G., Frisson, G., Henrard, S., Joveneau, A., Mahy, G., Monty, A., Mouazan, E., Pouria, X., Speybroeck, N., & van Ypersele, J.-P. (2011). *L'adaptation au changement climatique en région wallonne* (p. 170). Agence Wallonne de l'air et du climat.
- Courbet, F., Doussan, C., Limousin, J.-M., Martin-StPaul, N., & Simioni, G. (2022). *Forêts et changement climatique—Comprendre et modéliser le fonctionnement hydrique des arbres* (Éditions Quae, Éd.). <https://www.quae-open.com/produit/188/9782759234585/forets-et-changement-climatique>
- Cruiziat, P., Améglio, T., & Cochard, H. (2001). La cavitation : Un mécanisme perturbant la circulation de l'eau chez les végétaux. *Mécanique & Industries*, 2(4), 289-298.
- Dagnelie, P., Palm, R., Rondeux, J., & Thill, A. (1999). Tables de cubage des arbres et des peuplements forestiers. In XF2006253556.
- Dancart, D. (2023). Comment adapter les forêts aux changements climatiques ? *Société Royale Forestière de Belgique, Silva Belgica*, 2023(4), 55.
- Dănescu, A., Kohnle, U., Bauhus, J., Sohn, J., & Albrecht, A. T. (2018). Stability of tree increment in relation to episodic drought in uneven-structured, mixed stands in southwestern Germany. *Forest Ecology and Management*, 415-416, 148-159. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.030>
- Decocq, G. (2021). *L'introduction d'essences exotiques en forêt* (Société botanique de France, Éd.).
- Delzon, S., Urli, M., Samalens, J.-C., Lamy, J.-B., Lischke, H., Sin, F., Zimmermann, N. E., & Porté, A. J. (2013). Field Evidence of Colonisation by Holm Oak, at the Northern Margin of Its Distribution Range, during the Anthropocene Period. *PLOS ONE*, 8(11), 8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080443>

Déqué, M. (2005). *Le changement climatique 2000-2100 en France métropolitaine*.

Détection et gestion des outliers. (s. d.). Consulté 16 février 2026, à l'adresse
<https://datacraft.ovh/sections-analyse/detection-et-gestion-des-outliers/>

Direction du Milieu forestier. (2019). *La lettre d'info de l'OWSF 07 (Données 2019)* (N° 7; La lettre d'info de l'OWSF, p. 47). <https://example.com/la-lettre-d-info-de-l-owsf-07-donnees-2019-135410>

Direction du Milieu forestier. (2020). *La lettre d'info de l'OWSF 08 (Données 2020)* (N° 8; La lettre d'info de l'OWSF, p. 43). <https://example.com/la-lettre-d-info-de-l-owsf-08-donnees-2020-135411>

Direction du Milieu forestier. (2021). *La lettre d'info de l'OWSF 09 (Données 2021)* (N° 9; La lettre d'info de l'OWSF, p. 55). <https://example.com/la-lettre-d-info-de-l-owsf-09-donnees-2021-135412>

Direction du Milieu forestier. (2022). *La lettre d'info de l'OWSF 10 (Données 2022)* (N° 10; La lettre d'info de l'OWSF, p. 60). <https://example.com/la-lettre-d-info-de-l-owsf-10-donnees-2022-135413>

Direction du Milieu forestier. (2023). *La lettre d'info de l'OWSF 11 (Données 2023)* (N° 11; La lettre d'info de l'OWSF, p. 84). <https://example.com/la-lettre-d-info-de-l-owsf-11-donnees-2023-135414>

Direction du Milieu forestier. (2024). *La lettre d'info de l'OWSF 12 (Données 2024)* (N° 12; La lettre d'info de l'OWSF, p. 110). <https://example.com/la-lettre-d-info-de-l-owsf-12-donnees-2024-135415>

Ducouso, A., & Musch, B. (2024). La migration assistée des essences : Processus évolutifs et enjeux. *Rendez vous Techniques de l'ONF*, (80), 19-22.

Ducrey, M. (1998). Aspects écophysiologiques de la réponse et de l'adaptation des sapins méditerranéens aux extrêmes climatiques : Gelées printanières et sécheresse estivale. *Forêt Méditerranéenne*, XIX(2), 105-116.

Dumé, G., Gauberville, C., & Mansion, D. (2018). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. 1, Plaines et collines* (Nouvelle édition). Institut pour le développement forestier. <https://ils.bib.uclouvain.be/global/documents/2023809>

Eamus, D., Boulain, N., Cleverly, J., & Breshears, D. D. (2013). Global change-type drought-induced tree mortality : Vapor pressure deficit is more important than temperature per se in causing decline in tree health. *Ecology and Evolution*, 3(8), 2711-2729. <https://doi.org/10.1002/ece3.664>

eFlore. (s. d.). *Tela Botanica*. Consulté 27 mars 2026, à l'adresse <https://www.tela-botanica.org/eflore/>

Epidemiology of armillaria root disease in plantations (Newsletter N° 6; p. 2). (2001). Frontline Express.

European Environment Agency. (2022). *Projected changes in annual and seasonal precipitation*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/projected-changes-in-annual-and-6>

Fady, B., & Scotti-Saintagne, C. (2023). *Potentiel adaptatif du sapin de Bornmüller en France* (p. 22). INRAE. <https://hal.inrae.fr/hal-04266113>

Fang, Y., & Xiong, L. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 72, 673-689. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>

Fauconnier, T. (2009). Le Calocèdre. Essais de provenances en climat méditerranéen : Premiers résultats. *Forêt Méditerranéenne*, XXX(1), 21-30.

Fiches espèces / ClimEssences. (s. d.). Consulté 10 avril 2026, à l'adresse <https://climessences.fr/fiches-especes/fiches-especes>

Fichier écologique des essences. (s. d.). Consulté 30 mars 2026, à l'adresse <https://www.fichierecologique.be/#!/>

Filière Bois Wallonie. (2024). *PanoraBois*. <https://www.filiereboiswallonie.be/la-filiere/panorabois>

Graines et plants forestiers : Conseils d'utilisation des ressources génétiques forestières. (2025). Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire. <https://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-conseils-dutilisation-des-ressources-genetiques-forestieres>

Hanewinkel, M., Cullmann, D., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., & Zimmermann, N. E. (2013). Climate change may cause severe loss in economic value of European forestland. *Nature Climate Change*, 3, 203-207. <https://doi.org/10.1038/nclimate1687>

- Houllier, F., Joly, P.-B., & Merilhou-Goudard, J.-B. (2017). Dossier : Des recherches participatives dans la production des savoirs liés à l'environnement – Les sciences participatives : une dynamique à conforter. *Natures Sciences Sociétés*, 25(4), 418-423. <https://doi.org/10.1051/nss/2018005>
- Husson, C. (2025). *Mortalités de jeunes plants de pin maritime dans le nord-est de la France associées à la présence d'armillaire obscure (Armillaria ostoyae)*. Département de la santé des forêts. <https://agriculture.gouv.fr/mortalites-de-jeunes-plants-de-pin-maritime-dans-le-nord-est-de-la-france-associees-la-presence>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2000). *Emissions Scenarios* (p. 27). <https://www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate change 2014 : Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023 : Synthesis Report* (First, p. 42). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- IRM - *Tendances observées en Belgique*. (s.d.). Consulté 2 mars 2026, à l'adresse <https://www.meteo.be/fr/climat/changement-climatique-en-belgique/en-belgique>
- Ivetić, V., Chiatante, D., & Morcillo, L. (2026). Chapter 8—Assessment and monitoring of early tree planting success. In *Guidelines for Climate Adaptive Forest Restoration and Reforestation Projects* (p. 275-304). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-34086-4.00008-6>
- Klooster, S. H. J.-T., Thomas, E. J. P., & Sterck, F. J. (2007). Explaining Interspecific Differences in Sapling Growth and Shade Tolerance in Temperate Forests. *Journal of Ecology*, 95(6), 1250-1260.
- Lanly, J.-P. (2024). *Les forêts du monde : Quelles surfaces et quelle diversité ?* (p. 4). <https://hal.science/hal-05288876/>
- Lemoine, B. (1969). Tables de production pour le pin maritime dans le sud-ouest de la France. *Revue forestière française*, 21(1), 5-16. <https://doi.org/10.4267/2042/20235>

- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., de Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science*, 320(5884), 1768-1771. <https://doi.org/10.1126/science.1156831>
- Lousteau, D. L. (2001). *Projet CARBOFOR : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles – GICC* (p. 5). INRA. <http://www.gip-ecofofor.org/gicc/?p=592>
- Lung-Escarmant, B., & Guyon, D. (2004). Temporal and spatial dynamics of primary and secondary infection by *Armillaria ostoyae* in a *Pinus pinaster* plantation. *Phytopathology*, 94(2), 125-131. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.2.125>
- Marçais, B., & Desprez-Loustau, M.-L. (2014). European oak powdery mildew : Impact on trees, effects of environmental factors, and potential effects of climate change. *Annals of Forest Science*, 71(6), 633-642. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0252-x>
- Maury, P., Langlade, N., Grieu, P., Rengel, D., Sarrafi, A., Debaeke, P. P., & Vincourt, P. P. (2011). Ecophysiologie et génétique de la tolérance à la sécheresse chez le tournesol. *Innovations Agronomiques*, (14), 123-138. <https://doi.org/10.17180/skwf-hy79>
- Mitra, J. (2001). Genetics and genetic improvement of drought resistance in crop plants. *Current Science*, 80(6), 758-763.
- Nageleisen, L.-M., Piou, D., Saintonge, F.-X., & Riou-Nivert, P. (2010). *La santé des forêts : Maladies, insectes, accidents climatiques... : Diagnostic et prévention* (Institut pour le développement forestier).
- Norby, R. J., Loader, N. J., Mayoral, C., Ullah, S., Curioni, G., Smith, A. R., Reay, M. K., van Wijngaarden, K., Muhammad Shoaib Amjad, Brettle, D., Crockatt, M. E., Denny, G., Grzesik, R. T., Hamilton, R. L., Hart, K. M., Hartley, I. P., Jones, A. G., Kourmouli, A., Larsen, J., ... MacKenzie, R. (2024). Enhanced woody biomass production in a mature temperate forest under elevated CO₂. *Nature Climate Change*, 14, 983-988. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02090-3>

- Office National des Forêts (Éd.). (2007). Rendez-vous techniques de l'ONF - hors-série n° 3. *RenDez-Vous techniques, RenDez-Vous techniques*, (hors-série n°3), 102.
- Office National des Forêts (Éd.). (2008). Rendez-vous techniques de l'ONF - hors-série n° 4. *RenDez-Vous techniques, RenDez-Vous techniques*, (hors-série n°4), 178.
- Office National des Forêts (Éd.). (2022). Rendez-vous techniques de l'ONF - n°76. *Office national des forêts, RenDez-Vous techniques*, (76), 36.
- Polle, A., Chen, S. L., Eckert, C., & Harfouche, A. (2019). Engineering Drought Resistance in Forest Trees. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01875>
- Poquet, J., Dubreuil, V., & Bouriau, E. (2019). *Vulnérabilités et atouts du bassin rennais : Quelle adaptation face au changement climatique ?* (Notes de l'AUDIAR, p. 17). Agence d'Urbanisme Rennes Bretagne.
- Qu'est-ce que l'AIC (Akaike Information Criterion). (s. d.). *LEARN STATISTICS EASILY*. Consulté 20 mai 2026, à l'adresse <https://fr.statisticseasily.com/glossaire/quel-est-le-crit%C3%A8re-d%27information-aic-akaike/>
- Ricciardi, A., & Simberloff, D. (2009). Assisted colonization is not a viable conservation strategy. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(5), 248-253. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.12.006>
- Salas-Eljatib, C., Mehtätalo, L., Gregoire, TimothyG., Soto, DanielP., & Vargas-Gaete, R. (2021). Growth Equations in Forest Research : Mathematical Basis and Model Similarities. *Current Forestry Reports*, 7, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00145-8>
- Saleh, D., Chen, J., Leplé, J.-C., Leroy, T., Truffaut, L., Dencausse, B., Lalanne, C., Labadie, K., Lesur, I., Bert, D., Lagane, F., Morneau, F., Aury, J.-M., Plomion, C., Lascoux, M., & Kremer, A. (2022). Genome-wide evolutionary response of European oaks during the Anthropocene. *Evolution Letters*, 6(1), 4-20. <https://doi.org/10.1002/evl3.269>
- Schmitt, A., Trouvé, R., Perret, S., Calas, A., Seynave, I., & Lebourgeois, F. (2023). Une sylviculture dynamique des chênaies sessiliflores favorise la résilience des arbres après une forte

<https://doi.org/10.20870/revforfr.2023.7411>

Simler, A. B., Williamson, M. A., Schwartz, M. W., & Rizzo, D. M. (2018). Amplifying plant disease risk through assisted migration. *Conservation Letters*, 12(2). <https://doi.org/10.1111/conl.12605>

Société Royale Forestière de Belgique. (s. d.-a). *Essences d'avenir*. Trees for Future. Consulté 27 mars 2026, à l'adresse <https://www.treesforfuture.be/le-projet/essences-davenir/>

Société Royale Forestière de Belgique. (s. d.-b). *Trees for Future*. Trees for Future. Consulté 3 février 2026, à l'adresse <https://www.treesforfuture.be/>

Sohn, J. A., Saha, S., & Bauhus, J. (2016). Potential of forest thinning to mitigate drought stress : A meta-analysis. *Forest Ecology and Management, Special section: Drought and US Forests: Impacts and Potential Management Responses*, 380, 261-273. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.046>

Soutrenon, A. (1992). *La lutte chimique contre l'oïdium du chêne : Premier essai de définition de l'époque et de la fréquence des traitements* (p. 13). irstea. <https://hal.inrae.fr/hal-02575282>

SPW. (s. d.-a). *Changement climatique*. L'Environnement en Wallonie. Consulté 3 mars 2026, à l'adresse <https://environnement.wallonie.be/home/milieux/forets-et-nature/forets-wallonnes/changement-climatique-et-autres-risques/changement-climatique.html>

SPW. (s. d.-b). *Santé des forêts*. L'Environnement en Wallonie. Consulté 27 avril 2026, à l'adresse <https://environnement.wallonie.be/home/milieux/forets-et-nature/forets-wallonnes/comprendre-la-foret/sante-des-forets.html>

SPW. (s. d.-c). *Services culturels*. La biodiversité en Wallonie. Consulté 18 mai 2026, à l'adresse <https://biodiversite.wallonie.be/home/evaluation-biologique/services-ecosystemiques/typologie-des-se/services-culturels.html>

Ste-Marie, C., A. Nelson, E., Dabros, A., & Bonneau, M.-E. (2011). Assisted migration : Introduction to a multifaceted concept. *The Forestry Chronicle*, 87(6), 724-730. <https://doi.org/10.5558/tfc2011-089>

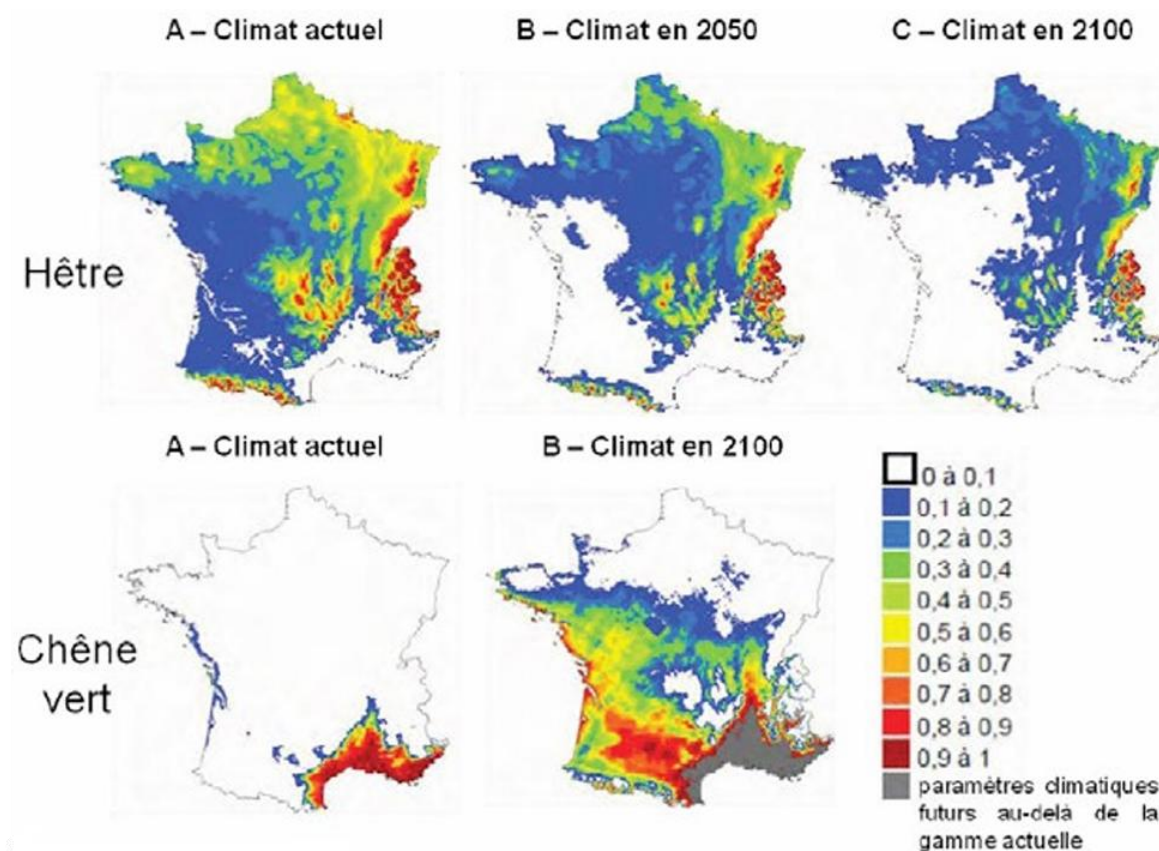
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T., & Prentice, I. C. (2005). *Climate change threats to plant diversity in Europe*. 102(23), 8245-8250. <https://doi.org/10.1073/pnas.0409902102>
- Twardek, W. M., Taylor, J. J., Rytwinski, T., Aitken, S. N., MacDonald, A. L., Van Bogaert, R., & Cooke, S. J. (2023). The application of assisted migration as a climate change adaptation tactic : An evidence map and synthesis. *Biological Conservation*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.109932>
- Van der Perre, R., Bythell, S., Bogaert, P., Claessens, H., Ridremont, F., Tricot, C., Vincke, C., & Ponette, Q. (2015). La carte bioclimatique de Wallonie : Un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières. *Forêt.Nature*, (135), 47-58.
- Vitasse, Y., Wohlgemuth, T., & Rigling, A. (2023). Les forêts face aux sécheresses et canicules : Causes de dépérissements, facteurs aggravants et différences de sensibilité entre les espèces. *Revue forestière française*, 74(2), 121-132. <https://doi.org/https://doi.org/10.20870/revforfr.2023.7586>
- Vitt, P., Havens, K., Kramer, A. T., Sollenberger, D., & Yates, E. (2010). Assisted migration of plants : Changes in latitudes, changes in attitudes. *Biological Conservation*, 143(1), 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.08.015>
- WalOnMap | Géoportail de la Wallonie. (s. d.). Consulté 6 mars 2026, à l'adresse <https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=-89761.12585725175,289652.1329692659,-32884.437134874286,145312.79425958853>
- Yue, B., Xue, W., Xiong, L., Yu, X., Luo, L., Cui, K., Jin, D., Xing, Y., & Zhang, Q. (2006). Genetic Basis of Drought Resistance at Reproductive Stage in Rice : Separation of Drought Tolerance From Drought Avoidance. *Genetics*, 172(2), 1213-1228. <https://doi.org/10.1534/genetics.105.045062>

Annexes

Remarque générale pour les Annexes M, O, R, U. Différentes tables (table des hauteurs, table de survie, etc.) liées entre elles sont utilisées pour comptabiliser le nombre d'UG, selon l'analyse effectuée (cf. Annexe H). Cependant, les tables peuvent ne pas être complètes (par exemple des données sont manquantes car la prise de mesures n'a pas été effectuée certaines années en raison d'une végétation trop abondante) ce qui peut modifier la comptabilisation du nombre d'UG, selon la table utilisée. De plus, la comptabilisation du nombre d'UG se fait parfois selon l'âge ou l'année du suivi. Cependant, les comptabilisations entre les deux sont différentes parce que, par exemple, toutes les UG en 2024 n'ont pas cinq ans.

Annexe A – Évolution des aires potentielles pour deux espèces, à titre d'exemple (d'après Poquet et al. (2019))

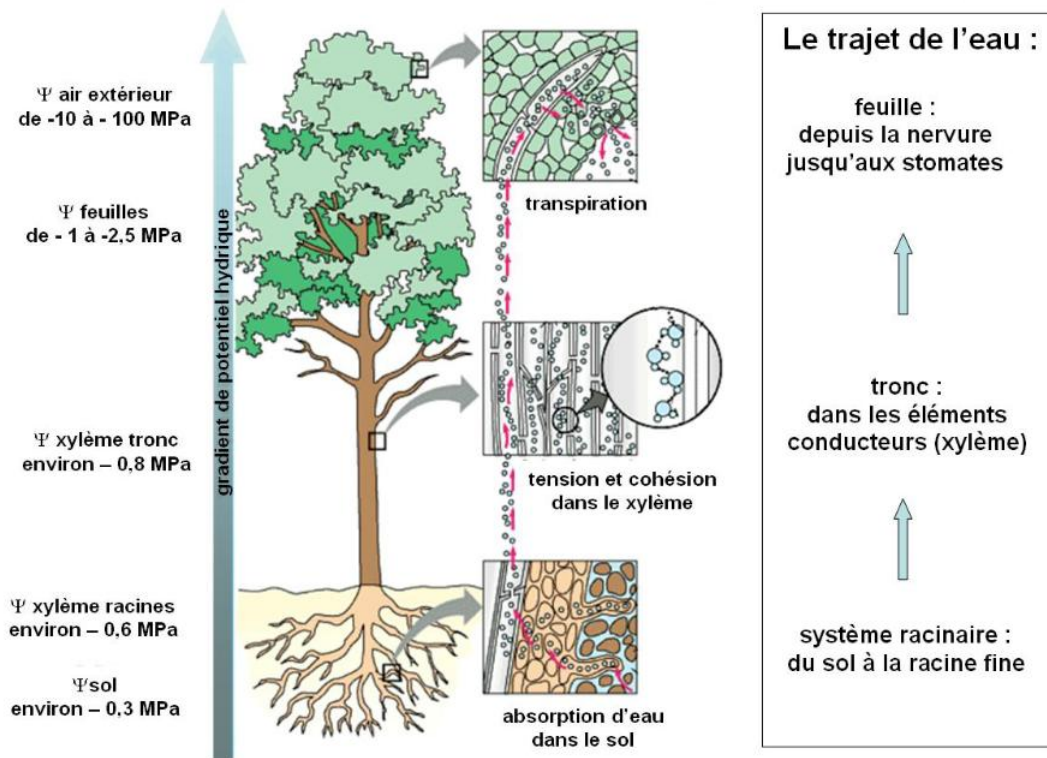
Le modèle utilisé est le modèle climatique ARPEGE avec un scénario climatique B2. La légende indique la probabilité de présence de l'espèce (en rouge : probabilité de présence élevée ; en bleu : probabilité de présence faible).



Annexe B – Santé des forêts en général en 2024 : liste des espèces avec leurs principaux problèmes sanitaires en Belgique en 2024 (Direction du Milieu forestier, 2024).

Espèce	Santé	Problèmes principaux	Niveau d'impact
Douglas	Moyenne	Rouille suisse (<i>Phaeocryptopus gaeumannii</i>)	Moyen
		Cécidomyie (<i>Contarinia pseudotsugae</i>)	Faible
		Maladies des pousses (<i>Sirococcus conigenus</i> , <i>Botrytis</i> ...)	Faible
Épicéa	Bonne	<i>Ips typographus</i>	Faible
		Chalcographe (<i>Pityogenes chalcographus</i>)	Faible
Mélèzes	Bonne	<i>Phytophthora ramorum</i>	Non présent sur le territoire
		<i>Ips cembrae</i> (attaques localisées)	Faible
		Pathogènes foliaires (<i>Mycosphaerella laricina</i>)	Moyen
Pins	Moyenne	Nématode du pin (<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>)	Non présent sur le territoire
		Processionnaire du pin (<i>Thaumetopoea pityocampa</i>) – uniquement des papillons	Faible
Sapins	Moyenne	Dépérissement	Moyen
Charme	Bonne	Dépérissement localisé en Fagne-Famenne-Calestienne	Moyen
Chêne	Bonne	Chenille processionnaire (<i>Thaumetopoea processionea</i>)	Faible
		Autres insectes défoliateurs	Moyen
		Oïdium (<i>Microsphaera alphitoides</i>)	Moyen
		Dépérissement avec écoulements et agrile (<i>Agrilus biguttatus</i>) en Fagne-Famenne-Calestienne et Haute-Lorraine	Fort
Érable	Moyenne	Maladie de la suie de l'érable (<i>Cryptostroma corticale</i>)	Moyen
		Dépérissement avec écoulements	Moyen
Frêne	Médiocre	Chalarose (<i>Hymenoscyphus fraxineus</i>)	Fort
Hêtre	Moyenne	Dépérissement	Moyen

Annexe C – La théorie de la tension-cohésion de Dixon (1896) © Pearson Education, Inc., Publishing as Benjamin Cummings



Annexe D – Fiche d'observation pour les suivis de printemps



Projet Arboretums Fiche d'observation : suivi de plantation 1^{ère} année - Notation de printemps

NOM ET PRENOM DE L'OBSERVATEUR			
CODE CO		DATE D'OBSERVATION	
			NUMÉRO DE FICHE

LOCALISATION	RELEVÉ AU GPS	OUI / NON ¹	RÉFÉRENTIEL
	X (LONGITUDE)	(EST)	Y (LATITUDE) (NORD)
	CANTONNEMENT/COMMUNE/LIEU-DIT		
	PROPRIÉTÉ	FORÊT DOMAINIALE / AUTRE FORÊT PUBLIQUE / FORÊT PRIVÉE OU AUTRE PROPRIÉTÉ ¹	
	NOM DU PROPRIÉTAIRE		

ESSENCE CONCERNÉE		PROVENANCE CONCERNÉE	
TYPE DE PLANTS	RACINE NUE / GODET / PLANÇON ¹	ECARTEMENT	M x M
PROTECTION	CLÔTURE / PROTECTION INDIVIDUELLE ¹ préciser :		

HISTORIQUE	ANNÉE D'EXPLOITATION		ESSENCE EXPLOITÉE	
	TRAVAUX PRÉPARATOIRES 1		TRAVAUX PRÉPARATOIRES 2	
	MOIS ET ANNÉE DE LA PLANTATION			
	TRAVAUX POST-PLANTATION 1		TRAVAUX POST-PLANTATION 2	

OBSERVATIONS COMPLÉMENTAIRES	TRAVAUX PRÉPARATOIRES	TRAVAUX POST-PLANTATION
	Rémanents : Andainage Incinération Broyage Autre méthode Souches : croc-souche Sol : Sous-solage Labour Travail superficiel Autre travail du sol Herbicide avant plant : Glyphosate Autre herbicide	Phytocide post-plantation : Fusillade forêt Autre phytocide Protection gibier Répulsif gibier Fongicide : Antrex, Antemi Systhane Autre fongicide Insecticide : Forester Autre insecticide SuXon Forest Merit Forest Karaté Forêt Paillage Dégagement : Manuel Mécanique Herbicide

Évaluation de la complétude, de la qualité de la plantation et suivi sanitaire

COMPLÉTUDE	MANQUE < 5% - MANQUE ENTRE 5 ET 15% - MANQUE > 15%
------------	--

		GRAPPE 1										GRAPPE 2										GRAPPE 3										GRAPPE 4										GRAPPE 5										TOTAL
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10											
Arbre	Verticalité insatisfaisante																																																			
	Profondeur plantation																																																			
Compactage	Excessif																																																			
	Insuffisant																																																			
Espacement	trop espacé																																																			
	trop serré																																																			
Etat	Indemne																																																			
	Atteint																																																			
	Mort																																																			
	Absent																																																			
Dégâts insecte	hylobe (<i>résineux</i>)																																																			
	chenille																																																			
Abroutissement mammifères																																																				
Environnement	gel																																																			
	sécheresse																																																			
Cause inexpliquée abiotique																																																				
Autre																																																				

Annexe E – Fiche d’observation pour les suivis d’automne



Projet Arboretums Fiche d’observation : suivi de plantation années 2 et suivantes

NOM ET PRENOM DE L'OBSERVATEUR			
DATE D'OBSERVATION		CODE UG	

ESSENCE CONCERNÉE	
-------------------	--

Végétation spontanée

TYPE DE VÉGÉTATION	HERBACÉES	FOUGÈRES	RONCES/FRAMBOISIERS	GENETS	LIGNEUSES
ABSENCE / PRÉSENCE ¹	0 / 1	0 / 1	0 / 1	0 / 1	0 / 1
CONCURRENCE A PLUS DE 2/3 DE LA TIGE	oui / non	oui / non	oui / non	oui / non	oui / non

Informations complémentaires à transmettre à la SFRB par mail

DATE DE DÉBOURREMENT	
----------------------	--

TRAVAUX 1 et MOIS/ANNÉE	
TRAVAUX 2 et MOIS/ANNÉE	
TRAVAUX 3 et MOIS/ANNÉE	
TRAVAUX 4 et MOIS/ANNÉE	

AUTRES OBSERVATIONS (désignation tiges, éclaircie, état général de la plantation, ...)	Dégagement nécessaire ? Taille de formation nécessaire ?
--	--

Pour compléter le tableau : indiquer A (atteint) ou M (mort) dans les colonnes problèmes et symptômes.

Ne pas oublier le plan de matérialisation, les codes symptômes et **d’actualiser le formulaire sur Epicollect5 AVANT d’aller sur le terrain** si vous utilisez smartphone/tablette.

UG	SOUS-TOTAL Atteint	Mort
1	1	0
2	1	0
3	1	0
4	1	0
5	1	0
6	1	0
7	1	0
8	1	0
9	1	0
10	1	0
11	1	0
12	1	0
13	1	0
14	1	0
15	1	0
16	1	0
17	1	0
18	1	0
19	1	0
20	1	0
21	1	0
22	1	0
23	1	0
24	1	0
25	1	0
26	1	0
27	1	0
28	1	0
29	1	0
30	1	0
31	1	0
32	1	0
33	1	0
34	1	0
35	1	0
36	1	0
37	1	0
38	1	0
39		

[illegible]

	SOUS-TOTAL Atteint
UG	Mort

[illegible]

Trees for Future – Problèmes principaux

Annexe F – Fiche des problèmes principaux

Problème spécifique aux feuillus ou au résineux

Problème Code	Observations	Essences concernées
Oidium [4] ERYSSPP	Sur les deux faces des feuilles : feutrage blanc caractéristique. Dessèchement-brunissement de feuilles, puis chute prématurée	Chênes
Cécidomyie [1] CONTPE	Galles sur les aiguilles de l'année : déformation et jaunissement puis brunissement des aiguilles à la base ou le milieu. Chute d'aiguilles de l'année en fin d'été	Douglas
Hylobe [2] HYLOABI	Morsures de l'écorce au collet des jeunes tiges, ou sur des rameaux bas par plages irrégulières plus ou moins coalescentes.	Résineux
Maladie des pousses [photo 8] MALAPOU	Pourriture molle, marron à brune, qui occasionne la courbure du rameau (le rameau pend) puis son dessèchement. Concerne surtout les jeunes pousses de l'année.	Résineux, principalement douglas
Lyde du pin [3] ACANSPP	Insecte ressemblant à une petite guêpe. Défoliation des pousses terminales avec présence systématique d'un fourreau rempli des déjections de la larve. Larves de mai à août.	Pins
Rouissement physiologique [6] ROUGPHY	<i>Le phénomène provient du fait que les pertes en eau de l'arbre par évapotranspiration ne sont pas compensées par l'absorption d'eau par les racines. Au cours de la période hivernale, les sols restent gelés ou froid ou au printemps en période de vent d'Est, le système racinaire de l'arbre ne parvient pas à compenser la demande évapotranspiratrice.</i>	Résineux, principalement douglas (4 à 12 ans)
Rouille Suisse du Douglas PHAEAE	Houpier très clair, chute d'aiguilles anciennes, fructifications noirâtres (petites billes noires) sur la face inférieure des aiguilles	Douglas



Problèmes biotiques généraux

Problème	Observations	Essences concernées
Abrouissement	Consommation des jeunes pousses par un animal	
Chenille défoliatrice [5]	Consommation partielle des feuilles de l'année	
Frottis d'un animal		
Puceron [6]		



Problème abiotique généraux

Problème	Observations	Essences concernées
Dégât gel [9 et 10]	Feuilles ou pousses flétries ou noircies suite à un gel printanier (gel tardif) Un gel précoce en automne provoque quant à lui des lésions cambiales au niveau du tronc.	Observé dans TFF sur : A. nordmanniana, C. atlantica, L. styraciflua, P. menziesii, Q. cerris, Q. petraea, Q. pubescens, T. cordata
Dégât sylvicole	Blessures faites par les travaux sylvicoles (dégagement principalement : blessures à l'écorce, perte de certains organes)	Toutes
Sécheresse		



Annexe G – Fiche des symptômes principaux

Feuilles, aiguilles, bourgeons			
Symptômes	Code 1	Précision sur le symptôme	Code 2
Totalement ou partiellement consommé	CONS	Trous (partiellement consommé ou manquant) Echancrures (bord du limbe touché)	PAR BOR
Totalement ou partiellement manquant (sans trace de consommation)	MANQ	Totalement consommé ou manquant	TOT
		Décapage	DEC
		Mines foliaires	MIN
		Chûte prématurée	CHU
Coloration vert clair à jaune	JAUN	Partout	TOT
Rougisement à brunissement (incluant les nœuds)	ROUG	Tâcheté, moucheté	TAC
Aspect cuivré, couleur bronze	BRON	Bord de limbe	BOR
Coloration blanchâtre	BLAN	En bande	BAN
Autres couleurs	COUL	Internevaire	INV
		Extrémité, apex	EXT
		Partiel	PAR
		Le long des nervures	NER
Microphyllie	!! MICROPH !!		
Taille, dimension anormale	ANORMAL		
Déformation	FORM	Frisé, début d'enroulement	FRI
		Courbé, coudé	COU
		Enroulement	ENR
		Pétiole courbé, tordu	PET
		Crispé, plié	PLI
		Galles	GAL
		Flétri	FLE
		Cloques	CLO
		Erinose	ERI
		Autres déformations	AUT
Trace d'insecte	ENTO	Miellat, fumagine (poudre noire sur les feuilles)	FUM
		Nid, tissage	NID
		Adulte	ADU
		Larve	LAR
		Nymphe	NYM
		Ponte	PON
Trace de champignon	MYCO	Feutrage blanc	BLA
		Mycélium	MYC
		Fructification de champignon	FRU

Tronc, branches, pousses

Symptômes	Code 1	Précision sur le symptôme	Code 2	Organe affecté	Code 3
Consummé	CONS	Pousses minées	MIN	Fût	TF
Manquant sans trace de consommation	MANQ	Décutation/Abscission	ABS	Totalité tronc	TT
Cassé	CASS	Chûte	CHU	Collet	CO
Mort ou mourant	MORT	Tronçonné, élagué, exploité	EXP	Racines	RA
		Totalement	TOT	Pousses terminales, apicales	PA
		Partiellement	PAR	Pousses de l'année	PN
Renversé, chablis		CHABLIS		Petites branches, rameaux (diam. < 2 cm)	BP
Gourmands, pousses épiphytiques		GOURMAN		Branches moyennes (diamètre < 10 cm)	BM
Blessure (écroçage, fente, ...)	!! BLES !!	Ecorçage, écorce déhiscence	ECO	Grosses branches (diamètre > 10 cm)	BG
		Fente	FEN	Branches de diamètre variable	BV
		Autres blessures	AUT	Partie de tronc dans le houppier, surbille	TS
Coloration anormale	COUL	En bande	BAN	Bois	XY
Nécrose (partie nécrosée)	!! NECR !!	Partout	TOT		
Ecoulement de résine	RESI	Par plage ou tâche	TAC		
Ecoulement visqueux ou gluant (sève)	ECO				
Pourriture	!! POUR !!				
Déformation	DEFORM	Flétrissement	FLE		
		Plié, brisé (attaché, pendu), courbé	PLI		
		Chancres	CHA		
		Tumeur	TUM		
		Excroissances longitudinales (gélivure, ...)	EXC		
		Balai de sorcière	BAL		
		Autres déformations	AUT		
Trace d'insecte	ENTO	Trous de forage (pénétration de sortie), sclure, ...	TRO		
		Galleries sous écorce	SCO		
		Galleries dans le bois	XYL		
		Nid, tissage	NID		
		Points ou feutrage blanc	POI		
		Adulte	ADU		
		Larve	LAR		
		Nympe	NYM		
		Ponte	PON		
Trace de champignon	MYCO	Vésicule jaune à orange	VES		
		Mycélium	MYC		
		Fructification de champignon	FRU		
Autres traces	TRAC	Trace de dent (rongeurs)	DEN		
		Coup de bec de pic	PIC		

Fruits, Fleurs

Symptômes	Code 1 + Code 2	Organe affecté	Code 3
Fructification anormalement abondante	FRUCTIF	Fleurs	FL
Floraison anormalement abondante	FLORAIS	Fruits	FR

Annexe H – Structure de la base de données

Annexe H.1 – Localisation et données administratives par site

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
Site	Alphabétique	OUI	Fixe	NON	
Lat	Numérique	OUI	Fixe	NON	Centre de la parcelle
Long	Numérique	OUI	Fixe	NON	Centre de la parcelle
Propriété Commune	Alphabétique	OUI	Fixe	NON	
Propriétaire Nom	Alphabétique	OUI	Semi-verrouillé	NON	
Propriétaire Prénom	Alphabétique	OUI	Semi-verrouillé	NON	
Contact Nom	Alphabétique	OUI	Semi-verrouillé	NON	
Contact Téléphone	Alphanumérique à cause du +	OUI	Semi-verrouillé	NON	
Contact Mail	Alphanumérique	OUI	Semi-verrouillé	NON	
Autre Contact	Alphanumérique	OUI	Semi-verrouillé	NON	
Commentaires	Texte	NON	Libre	NON	

Annexe H.2 – Historique du site

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
Site	Alphabétique	OUI	Fixe	NON	
Espèces exploitées	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	Liste OWSF
Année d'exploitation	Numérique	OUI	Fixe	NON	
Travaux préparatoires	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	Liste OWSF
Travaux préparatoires coûts	Alphabétique	NON	Fixe	NON	
Informations supplémentaires	Alphabétique	NON	Fixe	NON	

Annexe H.3 – Données initiales et lien avec le site à l'échelle de l'UG

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
Suivi	0 ou 1	OUI	Semi-verrouillé	NON	L'UG est-elle encore suivie ? 0 = non, 1 = oui
Année fin suivi	Alphabétique	NON	Libre	NON	Saison et année
Site	Alphabétique	OUI	Fixe	NON	
UG	Alphabétique	OUI	Fixe	NON	
Lat	Alphabétique	OUI	Fixe	NON	Piquet de départ – EN COURS
Long	Numérique	OUI	Fixe	NON	Piquet de départ – EN COURS
Espèce	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	Nom latin
Provenance	Alphanumérique	OUI	Fixe	OUI	Nom vulgarisé de la provenance si pas de code
Pépinière	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	
Type de plant	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	Godet, racines nues, motte
Nombre de plants	Numérique	OUI	Fixe	NON	
Âge des plants	Numérique	OUI	Fixe	NON	
Saison de plantation	Alphanumérique	OUI	Fixe	NON	
En ligne / <i>Klumps</i>	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	
Écartement	Alphanumérique	NON	Fixe	NON	
Nombre de plants/ <i>klumps</i>	Numérique	NON	Fixe	NON	
Protection gibier	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	
Commentaires	Texte	NON	Libre	NON	

Annexe H.4 – Station

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
État de l'analyse	Alphabétique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	Permet d'indiquer l'origine des données (terrain ou FEE) et si elles doivent faire l'objet d'analyse complémentaire
Site	Alphabétique	OUI	Fixe	NON	
Zone bioclimatique	Alphabétique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	

Niveau trophique	Numérique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	
Niveau hydrique	Alphanumérique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	
Position	Alphanumérique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	
Exposition	Alphanumérique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	
Type de sol (sigle)	Alphanumérique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	
Type d'humus	Alphabétique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	
Profondeur sondage (en cm)	Numérique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	
Substrat	Alphabétique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	
Texture	Alphabétique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	
Charge caillouteuse (en %)	Numérique	OUI	Semi-verrouillé	NON	
Profondeur d'apparition du pseudogley (en cm)	Numérique	OUI	Semi-verrouillé	NON	
Profondeur d'apparition du gley (en cm)	Numérique	OUI	Semi-verrouillé	NON	
RU	Numérique	OUI	Semi-verrouillé	NON	
Compaction	Alphanumérique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	
Homogénéité de la parcelle	Alphanumérique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	

Annexe H.5 – Réception Chantier à l'échelle de l'UG lors du suivi de printemps

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
UG	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	
Code CO principal	Alphanumérique	OUI	Semi-verrouillé	OUI	Liste de l'OWSF
Volontaire 2	Alphabétique	OUI	Libre	NON	
Volontaire 3	Alphanumérique	OUI	Libre	OUI	
Date du suivi	Alphabétique	OUI	Libre	NON	

Année du suivi	Numérique	OUI	Libre	NON	
Verticalité insatisfaisante	Numérique	OUI	Libre	NON	Nombre d'arbres concernés sur 50 observés
Plant trop haut	Numérique	OUI	Libre	NON	
Plant trop profond	Numérique	OUI	Libre	NON	
Compaction excessif	Numérique	OUI	Libre	NON	
Compaction insuffisant	Numérique	OUI	Libre	NON	
Espacement	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	Correct, Trop espacé, Trop serré
Sains	Numérique	OUI	Libre	NON	Nombre d'individus par classe de vitalité
Atteints	Numérique	OUI	Libre	NON	
Morts	Numérique	OUI	Libre	NON	
Absents	Numérique	OUI	Libre	NON	
Total	Numérique	OUI	Libre	NON	Nombre total de plants observés (sommés des 4 lignes précédentes)
Commentaires					

Annexe H.6 – Problèmes et symptômes à l'échelle de l'UG lors du suivi de printemps

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
UG	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	
Date du suivi	Alphabétique	OUI	Libre	NON	
Année du suivi	Numérique	OUI	Libre	NON	
Codes "problème"	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	
Codes "symptôme"	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	
Codes "organe"	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	
Nombre atteints	Numérique	OUI	Libre	NON	
Nombre morts	Numérique	OUI	Libre	NON	
Total	Numérique	OUI	Libre	NON	
Remarque / fiabilité	Alphabétique	NON	Libre	NON	

Annexe H.7 – Description de la placette permanente à l'échelle de l'UG

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
UG	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	
Site	Alphabétique	OUI	Fixe	NON	
Nombre positions totales	Numérique	OUI	Libre	NON	Égale au nombre de positions suivies OU Supérieur au nombre de positions suivies si beaucoup de mortalité l'année de plantation
Nombre positions suivies	Numérique	OUI	Libre	NON	

Annexe H.8 – Contexte à l'échelle de l'UG lors du suivi d'automne

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
UG	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	
CO	Alphanumérique	OUI	Libre	OUI	3 premières lettres du nom de famille, 2 premières lettres du prénom
Volontaire 2	Alphabétique	OUI	Libre	NON	
Date du suivi	Date 00/00/0000	NON	Libre	NON	
Année du suivi	Numérique	OUI	Libre	NON	
Végétation présente	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	Reprend toutes les espèces présentes
Végétation concurrente	Oui/Non	OUI	Libre	NON	Reprend la liste d'espèces concurrentes (>2/3 de la tige)
Fourche/cime multiple	Numérique	OUI	Libre	NON	Nombre de plants
Inclinaison	Numérique	OUI	Libre	NON	Nombre de plants
Sains	Numérique	OUI	Libre	NON	
Atteints	Numérique	OUI	Libre	NON	
Morts	Numérique	OUI	Libre	NON	
Absent	Numérique	OUI	Libre	NON	
Total	Numérique	OUI	Libre	NON	
Commentaires					

Annexe H.9 – Problèmes et symptômes à l'échelle de l'UG lors du suivi d'automne

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
UG	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	
Date du suivi	Date 00/00/0000	NON	Libre	NON	
Année du suivi	Numérique	OUI	Libre	NON	
Codes "problème"	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	
Codes "symptôme"	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	
Codes "organe"	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	
Atteints	Numérique	OUI	Libre	NON	Nombre d'arbres atteints
Morts	Numérique	OUI	Libre	NON	Nombre d'arbres morts
Commentaires	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	

Annexe H.10 – Mesures Individuelles des arbres de la placette permanente lors du suivi d'automne

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
UG	Alphabétique	OUI	Fixe	OUI	
Date du suivi	Date	OUI	Libre	NON	
Année du suivi	Numérique	OUI	Libre	NON	
Position arbre	Numérique	OUI	Libre	NON	Entre 1 et 50
Numéro unique	Numérique	OUI	Libre	NON	
Statut	Alphabétique	OUI	Libre	NON	Donnée systématiquement collectée à l'échelle de l'arbre à partir de 2024 (Sain, atteint, mort ou absent)
Hauteur (cm)	Numérique	OUI	Libre	NON	
Diamètre (au collet en mm)	Numérique	OUI	Libre	NON	Donnée récoltée jusqu'en 2022 inclus.
Diamètre (1m30 en cm)	Numérique	OUI si hauteur > 140 cm	Libre	NON	Mesuré au pied à coulisse

Circonférence (1m30 en cm)	Numérique	OUI si hauteur > 140 cm	Libre	NON	Calculé sur base du diamètre
Dégât apical	Numérique	OUI	Libre	NON	Mettre oui dans le cas où la croissance en hauteur est significativement affectée
Protection individuelle contre le gibier	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	Val par défaut : NON ou OUI (idem à table 3 – avant-dernière ligne)
Regarni	OUI/NON	OUI	Libre	OUI	Permet de savoir si l'arbre est plus jeune que les autres.
Commentaires					

Annexe H.11 – Regarnissage

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi- verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
Ajouter un regarnissage	Oui/Non	OUI	Libre	NON	Si oui, la suite s'affiche
Date du regarnissage	Date 00/00/0000	OUI	Libre	NON	
Espèce plantée	Alphabétique	NON	Libre	OUI*	Nom latin
Provenance	Alphanumérique	NON	Libre	OUI*	Nom vulgarisé de la provenance si pas de code
Pépinière	Alphabétique	NON	Libre	OUI	
Type de plant	Alphabétique	NON	Libre	OUI	Formule culturale
Nombre de plants	Numérique	NON	Libre	NON	
Protection gibier	Numérique	NON	Libre	OUI	
Commentaires	Texte	NON	Libre	NON	

Annexe H.12 – Travaux

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi- verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
Ajouter un travail	Oui/Non	OUI	Libre	OUI	Si oui, la suite s'affiche
Date de l'intervention	Date 00/00/0000	OUI	Libre	NON	
Intervention	Alphabétique	OUI	Libre	OUI	
Homme/jour	Numérique	NON	Libre	NON	
Commentaires	Texte	NON	Libre	NON	

Annexe H.13 – Éclaircie

Champs	Type de champs	Champs obligatoires ?	Champs fixe, semi-verrouillé, libre	Liste ?	Remarque
Ajouter une éclaircie	Oui/Non	OUI	Libre	NON	Si oui, la suite s'affiche
Date de l'éclaircie	Date 00/00/0000	OUI	Libre	NON	
Recette	Numérique	NON	Libre	NON	Recette obtenue à la suite d'une éclaircie (en € TTC)
Nombre de tige	Numérique	NON	Libre	NON	Nombre de tiges exploitées
Circonférence moyenne (en cm)	Numérique	NON	Libre	NON	Des tiges parties en éclaircie
Volume	Numérique	NON	Libre	NON	Des tiges parties en éclaircie
Prix/m ³	Numérique Monétaire	NON	Libre	NON	De l'espèce parties en éclaircie
Commentaires	Texte	NON	Libre	NON	

Annexe I – Tableaux récapitulatifs de l’ensemble des espèces du mémoire⁴

Annexe I.1 – Tableau récapitulatif de l’ensemble des espèces du mémoire plantées dans différents sites, ainsi que leur provenance et leur année de plantation

Espèce	Provenance	Site	Saison de plantation
<i>Abies bornmuelleriana</i>	FRA / ABOVG002, Turquie, Bostan	Hamoir	19-20
	FRA / ABOVG002, Turquie, Bostan	Lierneux 2	19-20
	FRA / ABOVG002, Turquie, Bostan	Tintange 1	19-20
	FRA / ABOVG01, Uludag-Sousceyrac	Bois de l'Or	22-23
<i>Abies nordmanniana</i>	BEL / VG8 Ardenne, Baudrimont	Château Regnault	22-23
	BEL / VG8 Ardenne, Baudrimont	Hamoir	19-20
	BEL / VG8 Ardenne, Baudrimont	Lierneux 1	18-19
	BEL / VG8 Ardenne, Baudrimont	Tintange 1	19-20
	GEO / Ambrolauri	Château Regnault	20-21
	GEO / Ambrolauri	Hamoir	19-20
	GEO / Ambrolauri	Lierneux 1	18-19
	GEO / Ambrolauri	Tintange 1	19-20
<i>Calocedrus decurrens</i>	FRA / CA, Mount Sashta	Strud	20-21
	FRA / CA, Mount Sashta	Vierves-sur-Viroin	19-20
	FRA / Mix CA, Mount Sashta - OR, Ashland	Felenne	20-21
	FRA / OR, Ashland	Strud	20-21
	FRA / OR, Ashland	Vierves-sur-Viroin	19-20
	INC	Bois de l'Or	20-21
	USA	Baileux	23-24
	USA	Huldenberg 1	23-24
	USA	Manhay	23-24
	USA	Ouffet	23-24
<i>Cedrus atlantica</i>	FRA / CAT900	Hamoir	19-20
	FRA / CAT900	Helchteren 3	24-25
	FRA / CAT900	Lierneux 1	18-19
	FRA / CAT900	Poppel 1	19-20
	FRA / CAT900	Porcheresse	19-20
	FRA / CAT900	Postel 2	20-21
	FRA / CAT900	Roly 1	19-20
	FRA / CAT900	Sevry	22-23
	FRA / CAT900	Stoumont	19-20
	FRA / CAT900	Tintange 1	19-20
	FRA / CAT900	Vierves-sur-Viroin	19-20
	FRA / CATPP01, Menerbes	Château Regnault	22-23
	FRA / CATPP01, Menerbes	Hamoir	19-20
	FRA / CATPP01, Menerbes	Lierneux 1	18-19
	FRA / CATPP01, Menerbes	Poppel 1	19-20
	FRA / CATPP01, Menerbes	Porcheresse	19-20

⁴ Tous ces sites sont présents dans la base de données et ont donc tous été pris en compte dans les analyses réalisées et présentées dans les Résultats.

	FRA / CATPP01, Menerbes	Postel 2	20-21
	FRA / CATPP01, Menerbes	Roly 1	19-20
	FRA / CATPP01, Menerbes	Stoumont	19-20
	FRA / CATPP01, Menerbes	Tintange 1	19-20
	FRA / CATPP01, Menerbes	Vierves-sur-Viroin	19-20
	FRA / CATPP02, Mont Ventoux	Hamoir	19-20
	FRA / CATPP02, Mont Ventoux	Poppel 1	19-20
	FRA / CATPP02, Mont Ventoux	Porcheresse	19-20
	FRA / CATPP02, Mont Ventoux	Postel 2	19-20
	FRA / CATPP02, Mont Ventoux	Roly 1	19-20
	FRA / CATPP02, Mont Ventoux	Stoumont	19-20
	FRA / CATPP02, Mont Ventoux	Vierves-sur-Viroin	19-20
	FRA / CATPP03, Saumon	Château Regnault	20-21
	FRA / CATPP03, Saumon	Lierneux 1	18-19
	FRA / CATPP03, Saumon	Postel 2	20-21
<i>Pinus nigra</i>	BEL / VG1, Halle - Koekelare	Couthuin	19-20
	BEL / VG1, Halle - Koekelare	Hamoir	19-20
	BEL / VG1, Halle - Koekelare	Postel 1	19-20
	BEL / VG1, Halle - Koekelare	Tintange 1	19-20
	FRA / PLOVG01, Sologne - Vayrières	Couthuin	19-20
	FRA / PLOVG01, Sologne - Vayrières	Hamoir	19-20
	FRA / PLOVG01, Sologne - Vayrières	Postel 1	19-20
	FRA / PLOVG01, Sologne - Vayrières	Tintange 1	19-20
	FRA / PLOVG02, Corse, Haute-Serre	Couthuin	19-20
	FRA / PLOVG02, Corse, Haute-Serre	Hamoir	19-20
	FRA / PLOVG02, Corse, Haute-Serre	Postel 1	19-20
	FRA / PLOVG02, Corse, Haute-Serre	Tintange 1	19-20
<i>Pinus pinaster</i>	FRA / PPAVG06, Mimizan VF2	Helchteren 1	19-20
	FRA / PPAVG06, Mimizan VF2	Postel 1	19-20
	FRA / PPAVG07, St Augustin VF2	Helchteren 1	19-20
	FRA / PPAVG07, St Augustin VF2	Poppel 1	19-20
<i>Pinus sylvestris</i>	FRA / PSYVG03, Haguenau Vayrières	Couthuin	19-20
	FRA / PSYVG03, Haguenau Vayrières	Haut Fays	19-20
	FRA / PSYVG03, Haguenau Vayrières	Postel 1	19-20
	FRA / PSYVG03, Haguenau Vayrières	Stoumont	19-20
	FRA / PSYVG04, Plaines nord-est	Couthuin	19-20
	FRA / PSYVG04, Plaines nord-est	Porcheresse	19-20
	FRA / PSYVG04, Plaines nord-est	Postel 1	19-20
	FRA / PSYVG04, Plaines nord-est	Stoumont	19-20
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	FRA / PMEVG01, Darrington	Vierves-sur-Viroin	19-20
	FRA / PMEVG01, Darrington	Yvoir 1	19-20
	FRA / PMEVG06, Californie	Lierneux 1	19-20
	FRA / PMEVG06, Californie	Vierves-sur-Viroin	19-20
	FRA / PMEVG06, Californie	Yvoir 1	19-20
	BUL	Ciergnon 2	21-22
	BUL	Gomery	21-22

<i>Quercus cerris</i>	BUL	Yvoir 2	21-22
	FRA / QCE901, Hors Alpes Niçoises	Hamoir	19-20
	FRA / QCE901, Hors Alpes Niçoises	Haut Fays	19-20
	FRA / QCE901, Hors Alpes Niçoises	Lierneux 2	19-20
	FRA / QCE901, Hors Alpes Niçoises	Overijse	19-20
	FRA / QCE901, Hors Alpes Niçoises	Postel 1	19-20
	FRA / QCE901, Hors Alpes Niçoises	Roly 2	19-20
	FRA / QCE901, Hors Alpes Niçoises	Rumillies	19-20
	INC	Sevry	22-23
	ITA / Emilia Romagna	Tintange 1	19-20
<i>Quercus petraea</i>	BEL	Ciergnon 3	21-22
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Ciergnon 2	21-22
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Creppe	21-22
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Gomery	21-22
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Hamoir	19-20
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Haut Fays	19-20
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Ohey 1	21-22
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Ouffet	21-22
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Overijse	19-20
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Postel 1	19-20
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Roly 2	19-20
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Rumillies	19-20
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Saint-Léger	21-22
	BEL / 7 Bas Plateaux Mosans, Culée de Faulx	Tintange 1	19-20
	BEL / 8 Ardenne, Coquerey	Ouffet	22-23
	BEL / 8 Ardenne, Coquerey	Tintigny	24-25
	FRA / QPE205, Vallée de la Saône	Ciergnon 3	21-22
	FRA / QPE205, Vallée de la Saône	Gomery	21-22
	FRA / QPE362, Gascogne	Creppe	21-22
	FRA / QPE362, Gascogne	Fellenne	21-22
	FRA / QPE362, Gascogne	Saint-Léger	21-22
	FRA / QPE362, Gascogne	Vierves-sur-Viroin	19-20
<i>Quercus pubescens</i>	FRA / Provence	Baileux	23-24
	FRA / Provence	Ouffet	23-24
	FRA / QPU101, Nord-Ouest	Hamoir	19-20
	FRA / QPU101, Nord-Ouest	Haut Fays	19-20
	FRA / QPU101, Nord-Ouest	Overijse	19-20
	FRA / QPU101, Nord-Ouest	Postel 1	19-20
	FRA / QPU101, Nord-Ouest	Rumillies	19-20
	FRA / QPU360, Sud-Ouest France	Bois de l'Or	20-21
	FRA / QPU360, Sud-Ouest France	Hamoir	19-20
	FRA / QPU360, Sud-Ouest France	Haut Fays	19-20
	FRA / QPU360, Sud-Ouest France	Overijse	19-20
	FRA / QPU360, Sud-Ouest France	Postel 1	19-20
	FRA / QPU360, Sud-Ouest France	Roly 2	19-20
	FRA / QPU360, Sud-Ouest France	Rumillies	19-20

	FRA / QPU741, Languedoc	Bois de l'Or	22-23
	FRA / QPU741, Languedoc	Ciergnon 3	21-22
	FRA / QPU741, Languedoc	Gomery	21-22
	FRA / QPU741, Languedoc	Jenneret 4	21-22
	FRA / QPU741, Languedoc	Ohey 1	21-22
	FRA / QPU741, Languedoc	Ouffet	21-22
	FRA / QPU741, Languedoc	Saint-Léger	21-22
	FRA / QPU741, Languedoc	Vierves-sur-Viroin	19-20
	ITA / Ascoli	Ciergnon 3	21-22
	ITA / Ascoli	Jenneret 4	21-22
	ITA / Ascoli	Ohey 1	21-22
	ITA / Ascoli	Ouffet	21-22
	ITA / Ascoli	Vierves-sur-Viroin	19-20
	ITA / Bologna	Bois de l'Or	20-21
	ITA / Emilia Romagna	Ciergnon 3	21-22
	ITA / Emilia Romagna	Creppe	21-22
	ITA / Emilia Romagna	Gomery	21-22
	ITA / Emilia Romagna	Saint-Léger	21-22
<i>Tilia cordata</i>	ALL	Lierneux 2	19-20
	DAN	Gozee	24-25
	FRA / Mix TCO200 - TCO901	Gozee	19-20
	FRA / TCO200, Nord-Est	Haut Fays	19-20
	FRA / TCO200, Nord-Est	Overijse	19-20
	FRA / TCO200, Nord-Est	Peruwelz	19-20
	FRA / TCO901, Montagnes	Overijse	19-20
	FRA / TCO901, Montagnes	Peruwelz	19-20

Annexe I.2 – Tableau récapitulatif du nombre d’Unités Génétiques par espèce⁵ et par site ainsi que par type de plantation (en ligne ou *klumps*)

Espèce →	Abo	Ano	Cde		Cat	Pni	Ppi	Psy	Pme	Qce		Qpe		Qpu		Tco
Type de plantation → Sites ↓	En ligne	En ligne	En ligne	Klumps	En ligne	En ligne	En ligne	En ligne	En ligne	En ligne	Klumps	En ligne	Klumps	En ligne	Klumps	En ligne
Baileux	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Bois de l'Or	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
Chateau Regnault	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ciergnon 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Ciergnon 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0
Couthuin	0	0	0	0	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Creppe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0
Fellenne	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Gomery	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	2	0	0
Gozee	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Hamoir	1	2	0	0	3	3	0	0	0	1	0	1	0	3	0	0
Haut Fays	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	2	0	1
Helchteren 1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Helchteren 3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Huldenberg 1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jenneret 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
Lierneux 1	0	2	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Lierneux 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Manhay	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ohey 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0
Ouffet	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0
Overijse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	2
Peruwelz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Poppel 1	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Porcheresse	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Postel 1	0	0	0	0	0	3	1	2	0	0	1	0	1	0	3	0
Postel 2	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Roly 1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Roly 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0
Rumillies	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0
Saint-Leger	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0
Sevry	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Stoumont	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Strud	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tintange 1	1	2	0	0	2	3	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Tintigny	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Vierves-sur-Viroin	0	0	2	0	3	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2	0
Yvoir 1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Yvoir 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

⁵ Les abréviations utilisées dans le tableau pour le nom des espèces sont reprises dans le Lexique.

Annexe J – Portfolio des différentes espèces

Annexe J.1 – Photos *Abies bornmuelleriana* (« eFlore », s. d.)



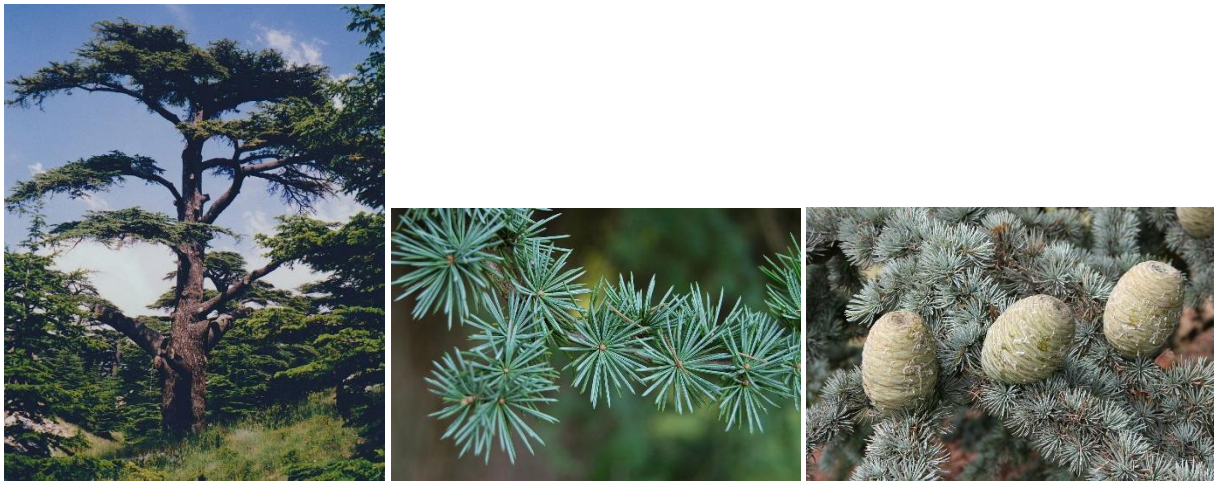
Annexe J.2 – Photos *Abies nordmanniana* (Biologie végétale, s. d.)



Annexe J.3 – Photos *Calocedrus decurrens* (Biologie végétale, s. d.)



Annexe J.4 – Photos *Cedrus atlantica* (Biologie végétale, s. d.)



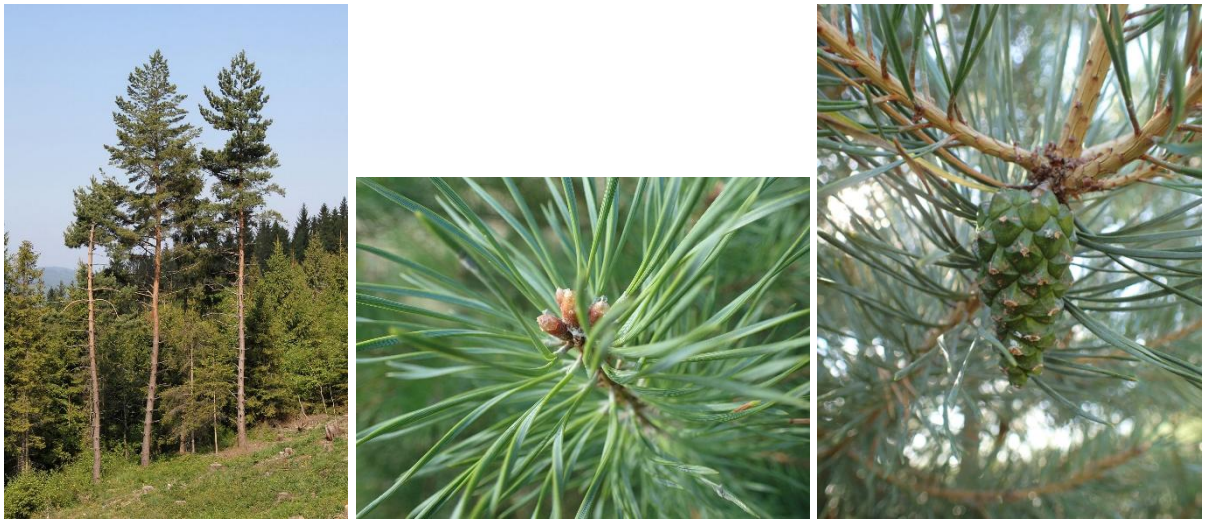
Annexe J.5 – Photos *Pinus nigra* (Biologie végétale, s. d.)



Annexe J.6 – Photos *Pinus pinaster* (Biologie végétale, s. d.)



Annexe J.7 – Photos *Pinus sylvestris* (Biologie végétale, s. d.)



Annexe J.8 – Photos *Pseudotsuga menziesii* (Biologie végétale, s. d.)



Annexe J.9 – Photos *Quercus cerris* (Biologie végétale, s. d.)



Annexe J.10 – Photos *Quercus petraea* (Biologie végétale, s. d.)



Annexe J.11 – Photos *Quercus pubescens* (Biologie végétale, s. d.)



Annexe J.12 – Photos *Tilia cordata* (Biologie végétale, s. d.)



Annexe K – Tableau reprenant l’écologie des douze espèces étudiées dans le cadre du mémoire

Espèce	Sensibilité à l'engorgement	Sensibilité aux gelées		Sensibilité aux dégâts de la faune sauvage			Sensibilité aux stations à faible réserve en eau	Vulnérabilité à l'embolie
		Précoces (automne)	Tardives (printemps)	Abrouissement	Écorcement	Frottage		
<i>Abies bornmuelleriana</i>	Sensible	Non/peu sensible	Non/peu sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	
<i>Abies nordmanniana</i>	Non/peu sensible	Non/peu sensible	Non/peu sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	
<i>Calocedrus decurrens</i>	Sensible	Non/peu sensible	Non/peu sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	
<i>Cedrus atlantica</i>	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	(Peu) sensible	(Peu) sensible	(Peu) sensible	Faible
<i>Pinus nigra</i>	Sensible	Non/peu sensible	Non/peu sensible	(Peu) sensible	(Peu) sensible	(Peu) sensible	Non/peu sensible	Moyenne
<i>Pinus pinaster</i>	Non/peu sensible	Sensible		Sensible	Sensible	Sensible		Moyenne
<i>Pinus sylvestris</i>	Non/peu sensible	Non/peu sensible	Non/peu sensible	(Peu) sensible	Non/peu sensible	(Peu) sensible		Moyenne
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Sensible	Peu sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Non/peu sensible	Moyenne
<i>Quercus cerris</i>	Sensible	Non/peu sensible	Sensible					
<i>Quercus petraea</i>	Sensible	Peu sensible	Sensible	Sensible	Non/peu sensible	(Peu) sensible		Moyenne
<i>Quercus pubescens</i>	Sensible	Peu sensible	Sensible				Non/peu sensible Meilleur que Qpe	
<i>Tilia cordata</i>	Sensible	Non/peu sensible	Non/peu sensible	(Peu) sensible	(Peu) sensible	(Peu) sensible		

Espèce	Présence de risques liés à l'altitude (en Belgique)	Présence de risques liés au secteur			Niveau trophique pour être en optimum ou en tolérance	Niveau hydrique pour être en optimum ou en tolérance		Résistance à la sécheresse	Sensibilité aux sols compacts	Sensibilité au type de sol
		Froid	Neutre	Chaud		NH	RHA			
<i>Abies bornmuelleriana</i>	Absence de risque			Risque si T° ↑ sans que pluie ↑	-2 à 2	-2 à 3		Bonne		Argile lourde
<i>Abies nordmanniana</i>	Absence de risque			Risque si T° ↑ sans que pluie ↑	-2 à 2	0 à 3		Bonne	Sensible	Argile compacte
<i>Calocedrus decurrens</i>	Absence de risque			Favorable	-3 à 1	-2 à 3		Bonne	Sensible	Argile lourde
<i>Cedrus atlantica</i>	àpd 250 m	Risque	Absence	Favorable	-3 à 2	-1 à 4		Très bonne (sauf stade juvénile)	Sensible	Compact argileux et acide sableux
<i>Pinus nigra</i>	àpd 350 m	Risque	Absence	Favorable	-3 à 2	-1 à 4	-1	Bonne (sauf stade juvénile)	Sensible	
<i>Pinus pinaster</i>	Absence de risque				-3 à 0	-3 à 4		Bonne	Non/peu sensible	Carbonate de calcium
<i>Pinus sylvestris</i>	àpd 400 m	Absence (sauf fond de vallée)	Absence	Absence	-3 à 1	-3 à 5	-1 à -3	Bonne	Non/peu sensible	
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Absence de risque	Absence (sauf fond de vallée)	Absence	Absence	-2 à 1	-1 à 4	-1	Bonne	Sensible	Compact argileux
<i>Quercus cerris</i>	Absence de risque	Thermophile			-2 à 1	-2 à 3		Très bonne (meilleur que Qpe et Qpu)	Non/peu sensible	
<i>Quercus petraea</i>	àpd 500 m	Absence (sauf fond de vallée)	Absence	Absence	-3 à 2	-2 à 4	-1 à -2	Très bonne	Non/peu sensible	
<i>Quercus pubescens</i>	Absence de risque				-2 à 2	-2 à 4		Très bonne (meilleur que Qpe)		Argile lourde
<i>Tilia cordata</i>	àpd 400 m	Absence	Absence	Absence	-1 à 2	-2 à 4	-1 à -2	Tolérant	Non/peu sensible	

Espèce	Potentiel d'avenir lié aux changements climatiques	Croissance	Rusticité à l'installation	Enracinement potentiel	Besoin en lumière	Besoin en eau (mm.an ⁻¹)	Besoin en température (°C)		
							Moyenne annuelle	Min.	Max.
<i>Abies bornmuelleriana</i>	Bon	Tardive, moyennement rapide	Excellent	Pivotant	Héliophile (sciaphile au stade juvénile)	600-1500	7 à 15	-30	Supporte de fortes chaleurs
<i>Abies nordmanniana</i>	Bon	Tardive, moyennement rapide	Bonne	Pivotant	Sciaphile	600-1000	9 à 15	-27	
<i>Calocedrus decurrens</i>		Lente, régulière	Excellent	Profond et étalé	Héliophile	380-2000	5 à 15	-25	48
<i>Cedrus atlantica</i>	Bon	Précoce, moyennement rapide	Moyenne	Pivotant et profond	Héliophile	800-1500	8 à 14	-25	37
<i>Pinus nigra</i>	Bon	Moyennement précoce, moyennement rapide	Bonne	Pivotant et profond	Héliophile	800-1500	6 à 13	-25	35-40
<i>Pinus pinaster</i>	Bon	Rapide	Excellent	Pivotant et profond	Héliophile	550-1200	11 à 15	-15	Supporte de fortes chaleurs
<i>Pinus sylvestris</i>	Bon	Précoce, lente et non soutenue	Excellent	Pivotant	Héliophile	900-1000	3 à 13	-40	39
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Bon	Précoce, rapide et soutenue	Bonne	Traçant et superficiel	Héliophile (Faible tolérance à l'ombrage au stade juvénile)	800-1200	5,5 à 17	-30	40
<i>Quercus cerris</i>	Bon	Précoce et rapide		Pivotant, profond, puissant et étalé	Demi-ombre	Besoin important		-15	Résistant
<i>Quercus petraea</i>	Bon	Précoce mais soutenue	Bonne	Pivotant et profond	Héliophile (Faible tolérance à l'ombrage au stade juvénile)	600-1400	7 à 13	-30	45
<i>Quercus pubescens</i>	Bon	Précoce mais soutenue	Bonne	Pivotant, puissant et étalé	Héliophile	500-1200	9 à 15	-20	29
<i>Tilia cordata</i>	Bon	Précoce, moyenne à soutenue	Moyenne	Pivotant et profond	Demi-ombre	min. 500	6 à 17	-50	44

Annexe L – Étude de différents modèles : équations testées, explications de chaque modèle et valeurs correspondantes d’AIC

Modèle	Équation	Explications	Valeur d’AIC
<i>M0</i>	$H \sim \text{Age}$	Modèle simple entre la hauteur et l’âge	251 000
<i>M1</i>	$H \sim \text{Age} * \text{Espèce}$	Relation entre la hauteur et plusieurs effets fixes : ceux-ci prennent compte de l’effet âge, l’effet espèce et leur interaction. Ces trois effets sont représentés par la *	238 000
<i>M2</i>	$H \sim \text{Age} * \text{Espèce}$ + (1 <i>Site</i>) + (1 <i>Site:Code_UG</i>) + (1 <i>tree_id</i>)	Relation entre la hauteur et plusieurs effets fixes et aléatoires (entre parenthèses) : un intercept aléatoire est assigné à chaque site, à chaque interaction entre le site et l’UG et à chaque arbre (<i>tree_id</i>)	229 000
<i>M3</i>	$H \sim \text{Age} * \text{Espèce}$ + (<i>Age</i> <i>Site</i>) + (1 <i>Site:Code_UG</i>) + (1 <i>tree_id</i>)	Relation entre la hauteur et plusieurs effets fixes et aléatoires (entre parenthèses) : une pente et un intercept aléatoire sont attribués pour chaque site ; un intercept aléatoire est assigné à chaque interaction entre le site et l’UG et à chaque arbre	225 000
<i>M4</i>	$H \sim \text{Age} * \text{Espèce}$ + (<i>Age</i> <i>Site</i>) + (1 <i>tree_id</i>)	Relation entre la hauteur et plusieurs effets fixes et aléatoires (entre parenthèses) : une pente et un intercept aléatoire sont attribués pour chaque site ; un intercept aléatoire est assigné à chaque arbre	226 000
<i>M5</i>	$H \sim \text{Age} * \text{Espèce}$ + (1 <i>Site</i>) + (1 <i>tree_id</i>)	Relation entre la hauteur et plusieurs effets fixes et aléatoires (entre parenthèses) : un intercept aléatoire est assigné à chaque site et à chaque arbre	230 000
<i>M6</i>	$H \sim \text{Age} * \text{Espèce}$ + (1 <i>Site</i>) + (1 <i>Site:Code_UG</i>) + (1 <i>Site:Code_UG:tree_id</i>)	Relation entre la hauteur et plusieurs effets fixes et aléatoires (entre parenthèses) : un intercept aléatoire est assigné à chaque site, à chaque interaction entre le site et l’UG et à chaque interaction entre le site, l’UG et l’arbre	229 000
<i>M7</i>	$H \sim \text{Age} * \text{Espèce}$ + (1 <i>Site/Code_UG</i>) + (<i>Age</i> <i>tree_id</i>)	Relation entre la hauteur et plusieurs effets fixes et aléatoires (entre parenthèses) : un intercept aléatoire est assigné à chaque UG imbriquée dans le Site ; une pente et un intercept aléatoire sont attribués pour chaque arbre	217 000
<i>M7b</i>	$H \sim \text{Age} * \text{Espèce}$ + (1 <i>année_plantation</i>) + (1 <i>Site/Code_UG</i>) + (<i>Age</i> <i>tree_id</i>)	Relation entre la hauteur et plusieurs effets fixes et aléatoires : un intercept aléatoire est assigné à chaque année de plantation et à chaque UG imbriquée dans le Site ; une pente et un intercept aléatoire sont attribués pour chaque arbre	217 000

Annexe M – Nombre d’Unités Génétiques par espèce et par année du suivi ayant été plantées en 2019-2020

Le jeu de données utilisé provient des données de l’Annexe H.8.

Espèce	Année du suivi	Nombre d'UG
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2020	3
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2021	3
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2022	3
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2023	3
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2024	3
<i>Abies nordmanniana</i>	2020	4
<i>Abies nordmanniana</i>	2021	4
<i>Abies nordmanniana</i>	2022	4
<i>Abies nordmanniana</i>	2023	4
<i>Abies nordmanniana</i>	2024	4
<i>Cedrus atlantica</i>	2020	17
<i>Cedrus atlantica</i>	2021	17
<i>Cedrus atlantica</i>	2022	20
<i>Cedrus atlantica</i>	2023	20
<i>Cedrus atlantica</i>	2024	20
<i>Pinus nigra</i>	2020	11
<i>Pinus nigra</i>	2021	11
<i>Pinus nigra</i>	2022	11
<i>Pinus nigra</i>	2023	12
<i>Pinus nigra</i>	2024	12
<i>Pinus pinaster</i>	2020	4
<i>Pinus pinaster</i>	2021	3
<i>Pinus pinaster</i>	2022	4
<i>Pinus pinaster</i>	2023	4
<i>Pinus pinaster</i>	2024	4
<i>Pinus sylvestris</i>	2020	8
<i>Pinus sylvestris</i>	2021	8
<i>Pinus sylvestris</i>	2022	8
<i>Pinus sylvestris</i>	2023	8
<i>Pinus sylvestris</i>	2024	8
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2020	5
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2021	5
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2022	3
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2023	4
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2024	5
<i>Quercus cerris</i>	2020	7
<i>Quercus cerris</i>	2021	4
<i>Quercus cerris</i>	2022	5
<i>Quercus cerris</i>	2023	6
<i>Quercus cerris</i>	2024	8
<i>Quercus petraea</i>	2020	7
<i>Quercus petraea</i>	2021	3

<i>Quercus petraea</i>	2022	5
<i>Quercus petraea</i>	2023	6
<i>Quercus petraea</i>	2024	7
<i>Quercus pubescens</i>	2020	11
<i>Quercus pubescens</i>	2021	5
<i>Quercus pubescens</i>	2022	7
<i>Quercus pubescens</i>	2023	11
<i>Quercus pubescens</i>	2024	13
<i>Tilia cordata</i>	2020	6
<i>Tilia cordata</i>	2021	6
<i>Tilia cordata</i>	2022	5
<i>Tilia cordata</i>	2023	5
<i>Tilia cordata</i>	2024	7

Annexe N – Tableaux reprenant le nombre de données certaines, corrigées et d'outliers

Annexe N.1 – Par espèce

Espèce	Nombre données totales	Nombre totales réelles (sans NA)	Nombre de données certaines	Données corrigées	Outliers certains	Outliers incertains	Outliers nuls	Outliers élevés
<i>Abies bornmuelleriana</i>	829	589	519	0	28	7	19	16
<i>Abies nordmanniana</i>	1547	1136	999	12	60	7	28	30
<i>Calocedrus decurrens</i>	804	393	365	1	12	0	4	11
<i>Cedrus atlantica</i>	6483	4567	4152	14	152	70	70	109
<i>Pinus nigra</i>	2980	2153	2015	6	25	19	36	52
<i>Pinus pinaster</i>	924	572	524	3	12	9	14	10
<i>Pinus sylvestris</i>	1995	1449	1375	4	11	4	21	34
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1196	758	621	12	46	23	41	15
<i>Quercus cerris</i>	2012	1333	1127	10	127	2	27	40
<i>Quercus petraea</i>	2466	1340	1113	17	142	6	27	35
<i>Quercus pubescens</i>	4466	2455	1990	20	297	29	59	60
<i>Tilia cordata</i>	1477	1005	823	15	110	11	27	19

Annexe N.2 – Par âge

Âge	Nombre données totales	Nombre données totales réelles (sans NA)	Données certaines	Données corrigées	Outliers certains	Outliers incertains	Outliers nuls	Outliers élevés
1	6119	0	0	0	0	0	0	0
2	5612	5031	4035	0	396	186	273	141
3	5700	4777	4311	47	257	1	47	114
4	4653	4031	3768	30	138	0	20	75
5	4845	3666	3282	33	222	0	33	96
6	250	245	227	4	9	0	0	5

Annexe O – Nombre d’Unités Génétiques par espèce et par âge

Ce tableau a été construit selon l’Annexe H.10 du jeu de données.

Espèce	Âge	Nombre d’UG
<i>Abies bornmuelleriana</i>	1	4
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2	4
<i>Abies bornmuelleriana</i>	3	3
<i>Abies bornmuelleriana</i>	4	3
<i>Abies bornmuelleriana</i>	5	3
<i>Abies nordmanniana</i>	1	4
<i>Abies nordmanniana</i>	2	6
<i>Abies nordmanniana</i>	3	6
<i>Abies nordmanniana</i>	4	7
<i>Abies nordmanniana</i>	5	6
<i>Abies nordmanniana</i>	6	2
<i>Calocedrus decurrens</i>	1	7
<i>Calocedrus decurrens</i>	2	3
<i>Calocedrus decurrens</i>	3	3
<i>Calocedrus decurrens</i>	4	3
<i>Cedrus atlantica</i>	1	26
<i>Cedrus atlantica</i>	2	26
<i>Cedrus atlantica</i>	3	26
<i>Cedrus atlantica</i>	4	27
<i>Cedrus atlantica</i>	5	23
<i>Cedrus atlantica</i>	6	3
<i>Pinus nigra</i>	1	12
<i>Pinus nigra</i>	2	12
<i>Pinus nigra</i>	3	12
<i>Pinus nigra</i>	4	12
<i>Pinus nigra</i>	5	12
<i>Pinus pinaster</i>	1	4
<i>Pinus pinaster</i>	2	3
<i>Pinus pinaster</i>	3	4
<i>Pinus pinaster</i>	4	4
<i>Pinus pinaster</i>	5	4
<i>Pinus sylvestris</i>	1	8
<i>Pinus sylvestris</i>	2	8
<i>Pinus sylvestris</i>	3	8
<i>Pinus sylvestris</i>	4	8
<i>Pinus sylvestris</i>	5	8
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1	5
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2	5
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	3	5
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	4	4
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	5	5
<i>Quercus cerris</i>	1	11
<i>Quercus cerris</i>	2	9

<i>Quercus cerris</i>	3	8
<i>Quercus cerris</i>	4	6
<i>Quercus cerris</i>	5	8
<i>Quercus petraea</i>	1	12
<i>Quercus petraea</i>	2	13
<i>Quercus petraea</i>	3	15
<i>Quercus petraea</i>	4	6
<i>Quercus petraea</i>	5	7
<i>Quercus pubescens</i>	1	28
<i>Quercus pubescens</i>	2	22
<i>Quercus pubescens</i>	3	21
<i>Quercus pubescens</i>	4	13
<i>Quercus pubescens</i>	5	13
<i>Tilia cordata</i>	1	7
<i>Tilia cordata</i>	2	6
<i>Tilia cordata</i>	3	5
<i>Tilia cordata</i>	4	5
<i>Tilia cordata</i>	5	7

Annexe P – Résumés statistiques des modèles utilisés

Annexe P.1 – Modèle de croissance (Équation [8])

Modèle : $H \sim \text{Age} * \text{Espèce} + (1 | \text{année_plantation}) + (1 | \text{Site/Code_UG}) + (\text{Age} | \text{tree_id})$

Effet global de l'espèce, l'âge et leur interaction sur le modèle : ces paramètres sont significatifs (ANOVA, $p < 0,05$)

Espèce	Valeur moyenne estimée de H	Erreur standard	Intervalle de confiance
<i>Abies bornmuelleriana</i>	92,9	10,3	63,6-122
<i>Abies nordmanniana</i>	81,6	8,25	58,1-105
<i>Calocedrus decurrens</i>	137	10,2	108-166
<i>Cedrus atlantica</i>	179	6,07	162-196
<i>Pinus nigra</i>	235	7,39	214-256
<i>Pinus pinaster</i>	353	11,1	321-385
<i>Pinus sylvestris</i>	260	8,18	237-284
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	184	10,9	152-215
<i>Quercus cerris</i>	208	7,18	188-229
<i>Quercus petraea</i>	197	6,80	178-217
<i>Quercus pubescens</i>	220	6,03	203-237
<i>Tilia cordata</i>	158	9,02	132-184

Annexe P.2 – Modèle de l'hétérogénéité de croissance (Équation [4])

Modèle : $\text{CoefVar5} \sim \text{Espèce} + (1 | \text{Site})$

Effet global de l'espèce sur le modèle : l'espèce est significative (ANOVA, $p < 0,05$)

Espèce	Valeur moyenne estimée de CoefVar5	Erreur standard	Intervalle de confiance
<i>Abies bornmuelleriana</i>	29,3	3,95	17,8-40,8
<i>Abies nordmanniana</i>	25,8	2,99	17,1-34,5
<i>Cedrus atlantica</i>	26,0	1,81	20,6-31,5
<i>Pinus nigra</i>	13,7	2,33	6,85-30,7
<i>Pinus pinaster</i>	19,6	3,77	8,61-30,7
<i>Pinus sylvestris</i>	12,4	2,64	4,68-20,1
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	28,9	3,48	18,7-39,1
<i>Quercus cerris</i>	27,3	2,53	20,0-34,7
<i>Quercus petraea</i>	22,4	2,68	14,6-30,2
<i>Quercus pubescens</i>	26,0	2,19	19,6-32,4
<i>Tilia cordata</i>	36,3	2,88	27,9-44,7

Annexe P.3 – Modèle concernant l'effet du site (Équation [6])

Modèle : $\Delta H \sim \text{Site} + (1 \mid \text{Code UG})$

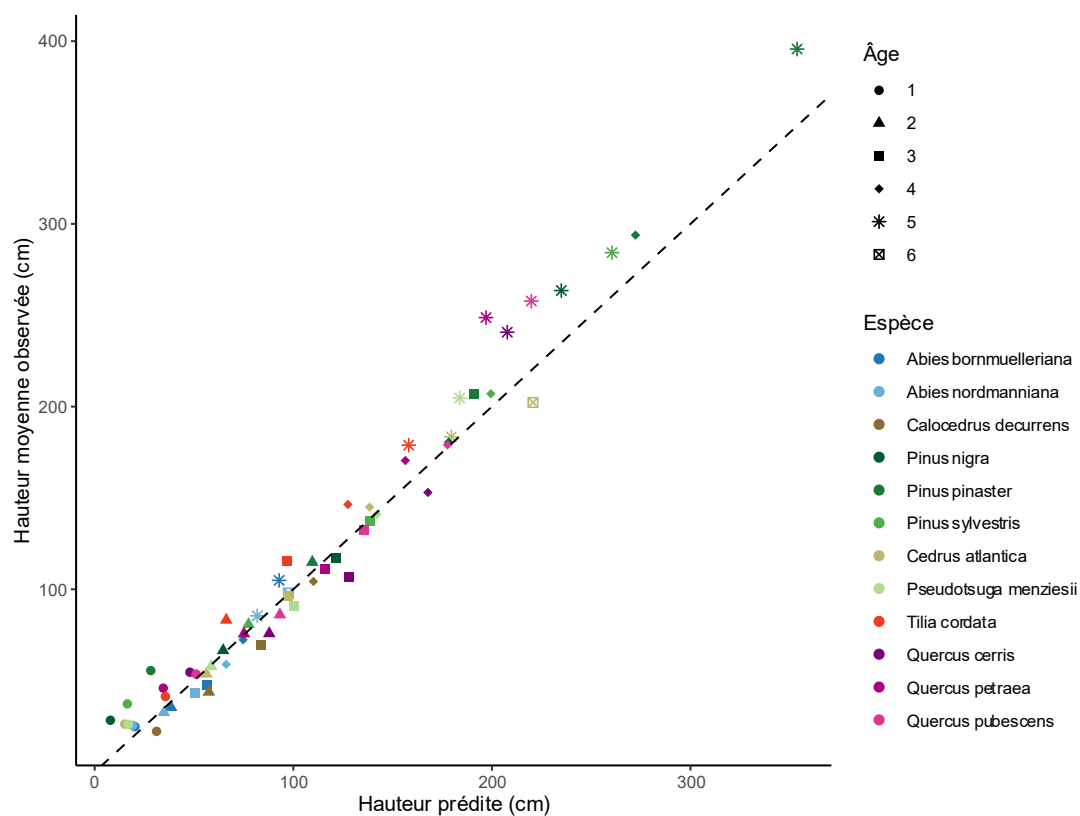
Effet global du site sur le modèle : le site est significatif (ANOVA, $p < 0,05$)

Site pour <i>Q. pubescens</i>	Valeur moyenne estimée de ΔH	Erreur standard	Intervalle de confiance
Bois de l'Or	22,7	6,31	0,03-45,4
Ciergnon 3	24,4	4,00	11,1-37,7
Gomery	36,7	4,49	20,7-52,8
Hamoir	38,7	3,66	25,6-51,8
Jenneret 4	57,0	4,48	40,9-73,0
Ohey 1	58,4	4,54	42,4-74,4
Ouffet	17,2	4,72	1,10-33,4
Postel 1	60,4	4,84	44,2-76,6
Rumillies	53,3	4,47	37,3-69,4
Saint-Léger	54,9	4,45	38,9-71,0

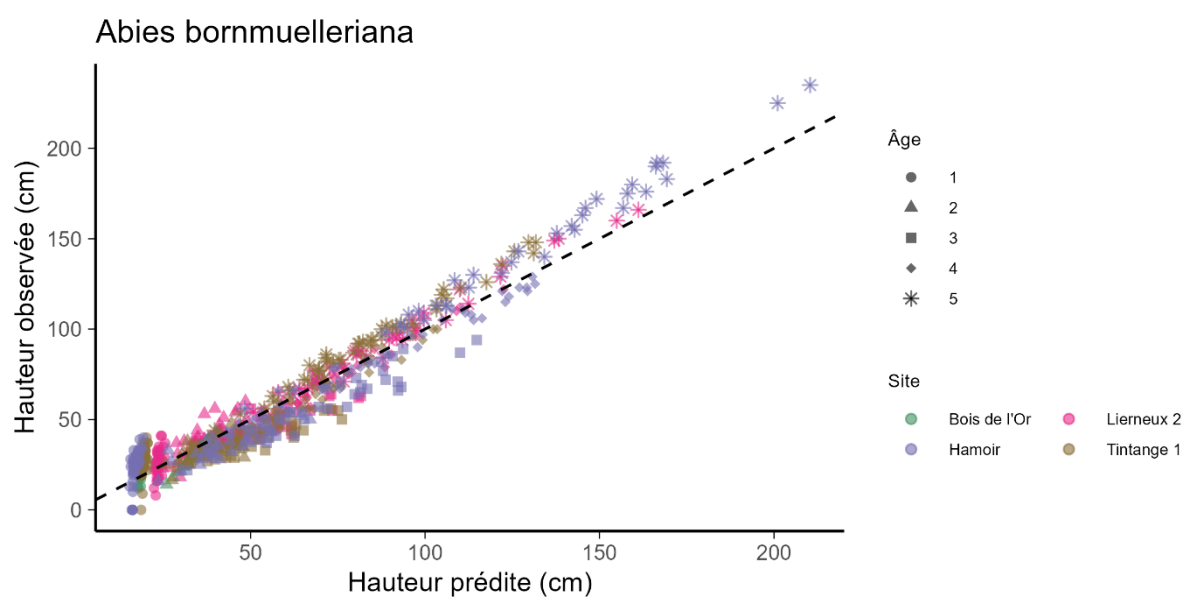
Site pour <i>C. atlantica</i>	Valeur moyenne estimée de ΔH	Erreur standard	Intervalle de confiance
Château Regnault	31,4	3,73	19,3-43,5
Hamoir	32,4	2,17	25,4-39,4
Lierneux 1	23,5	2,14	16,6-30,5
Poppel 1	36,5	2,14	29,5-43,5
Porcheresse	26,8	2,66	18,2-35,3
Postel 2	42,7	2,14	35,8-49,7
Roly	28,5	2,14	21,6-35,5
Stoumont	47,0	2,14	40,0-53,9
Tintange 1	20,6	2,65	12,0-29,2
Vierves-sur-Viroin	20,0	2,19	12,9-27,0

Annexe Q – Figures des hauteurs observées (en cm) en fonction de la hauteur prédite par le modèle (en cm)

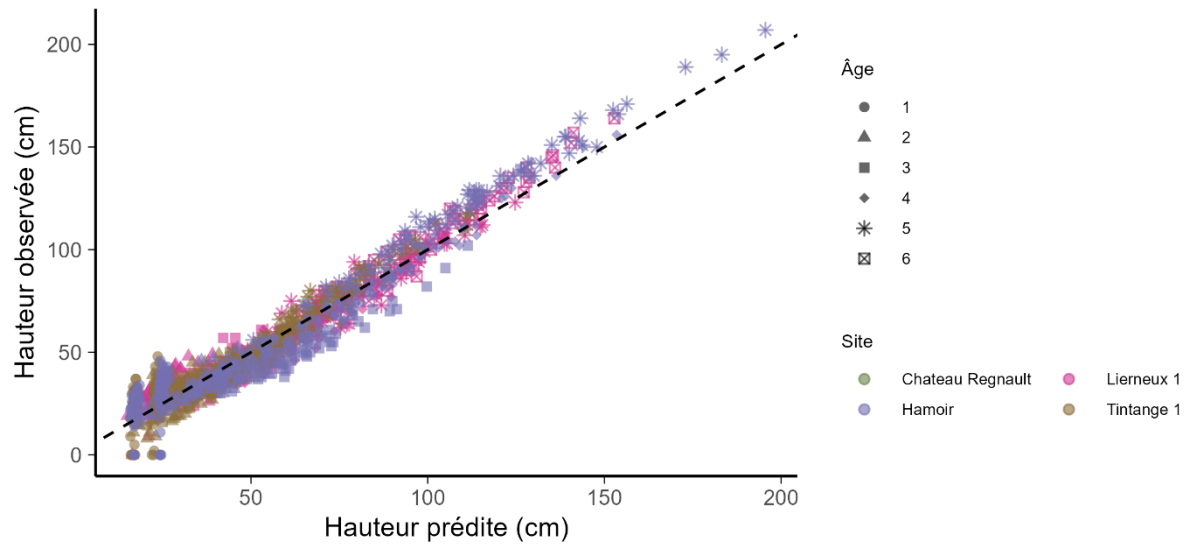
Annexe Q.1 – Figure des hauteurs moyennes observées (en cm) en fonction de la hauteur prédite par le modèle (en cm) selon l'espèce et l'âge



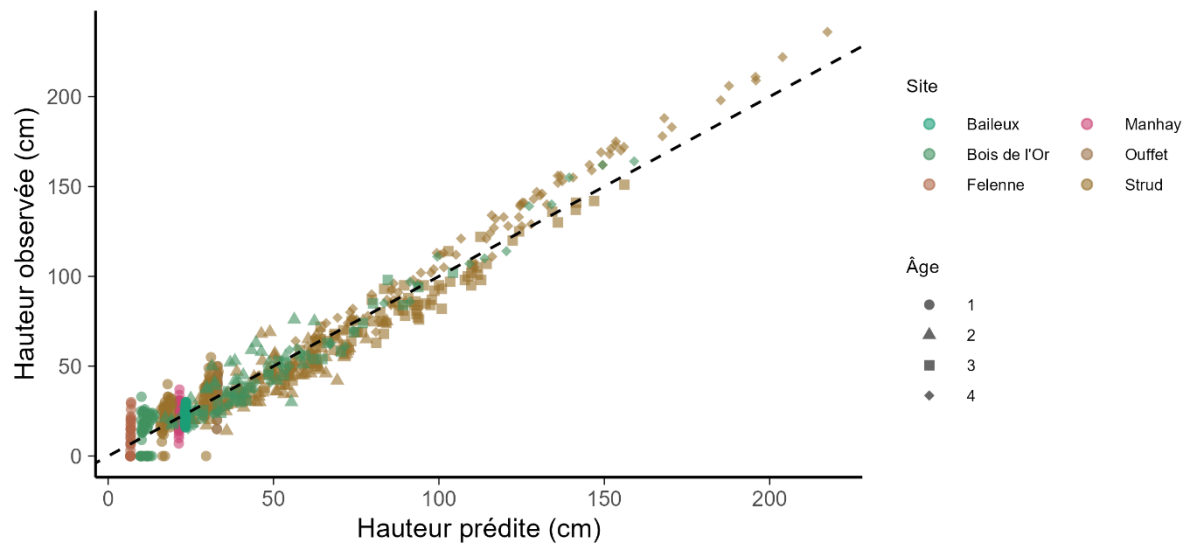
Annexe Q.2 – Figures des hauteurs observées (en cm) en fonction de la hauteur prédite par le modèle (en cm) selon l'espèce et le site et l'âge

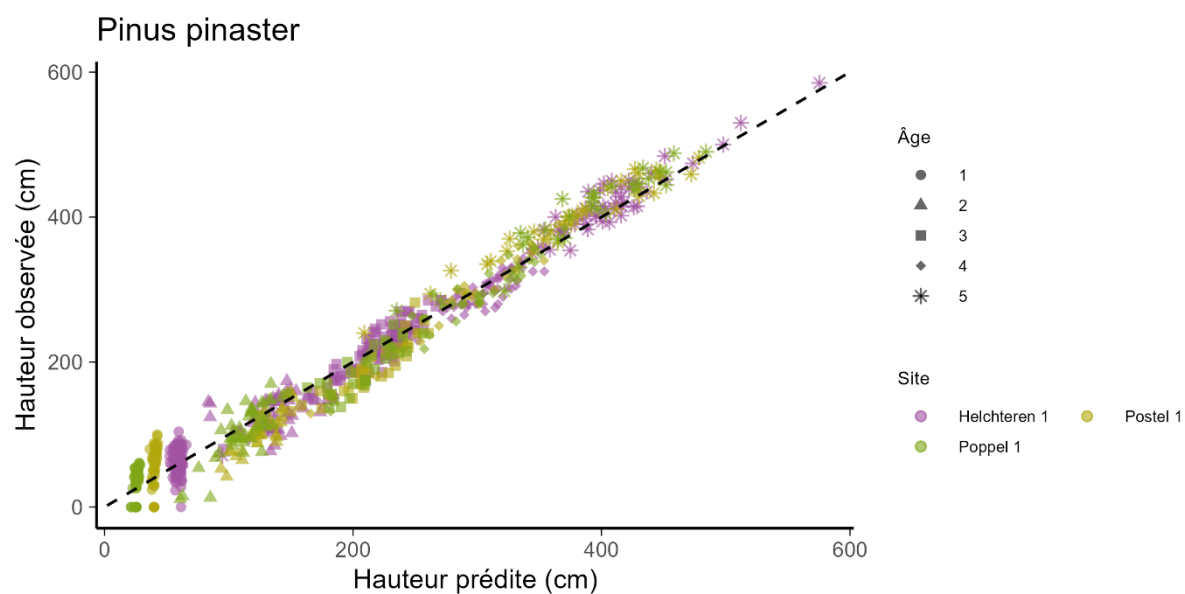
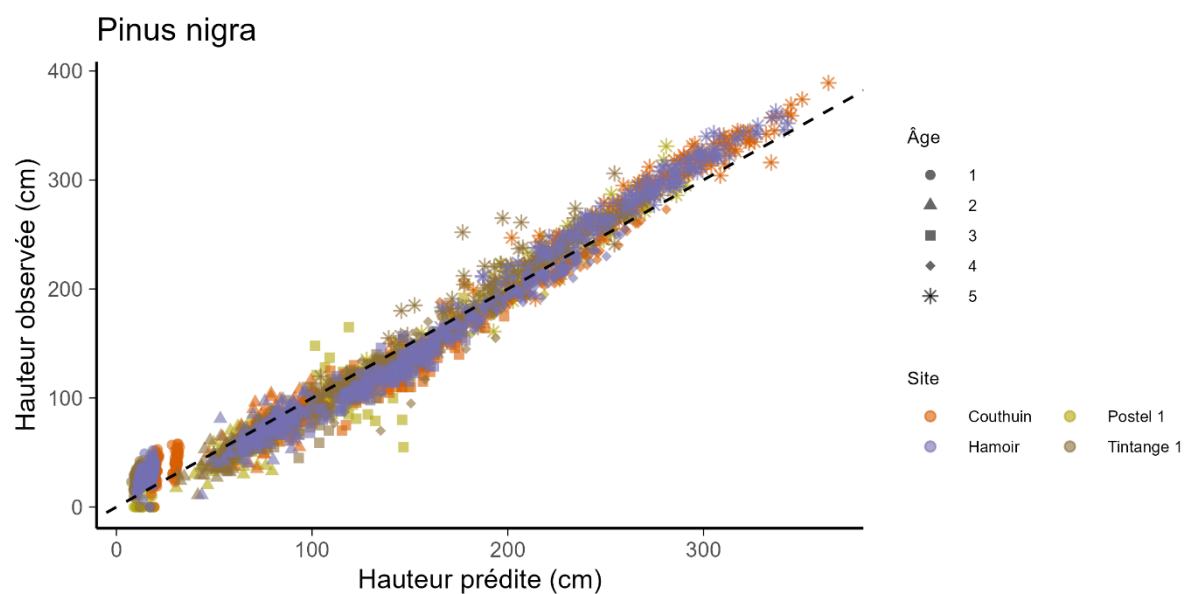
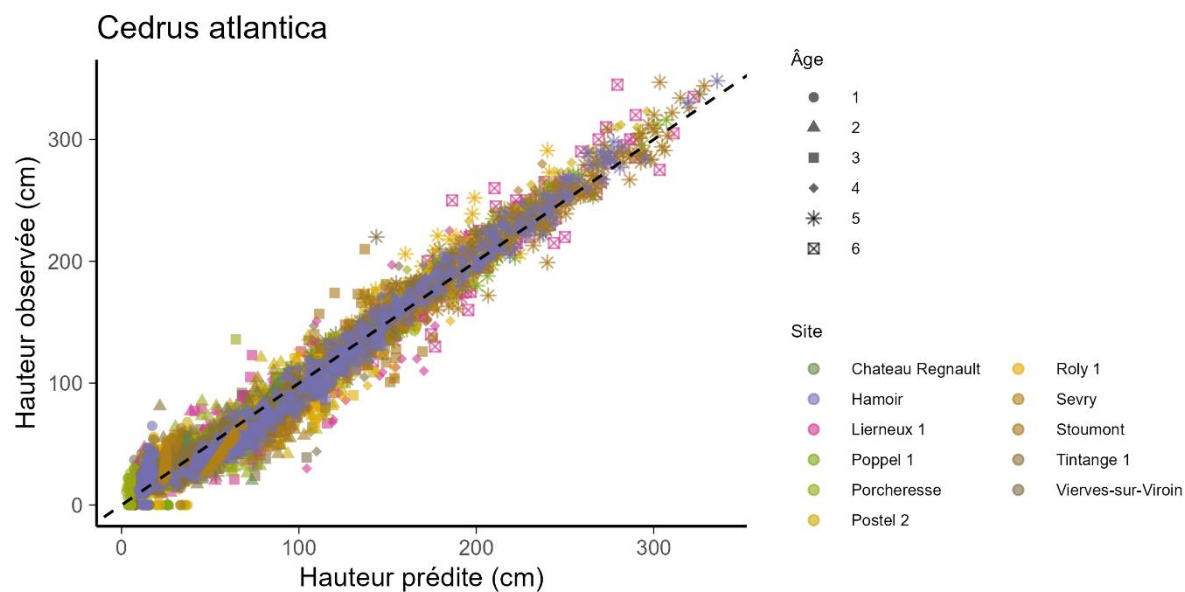


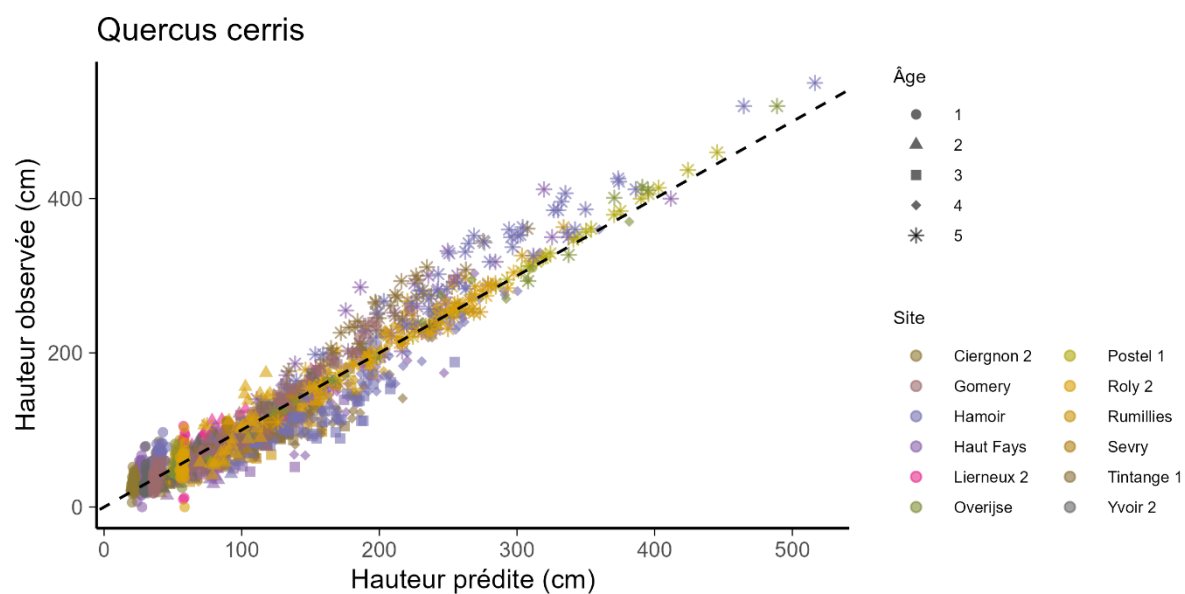
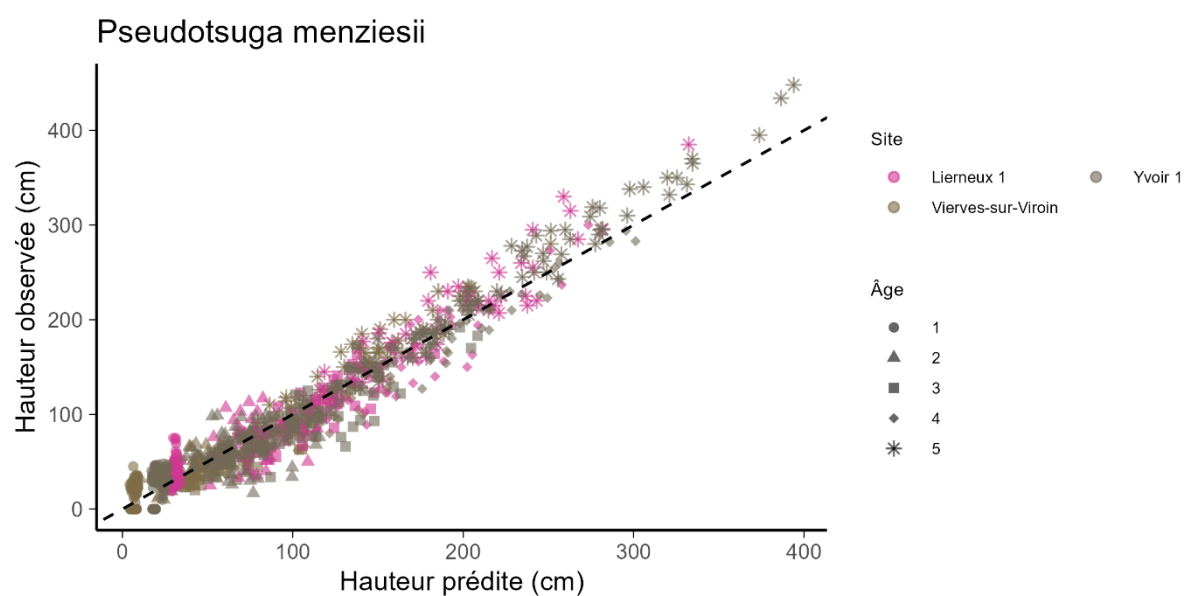
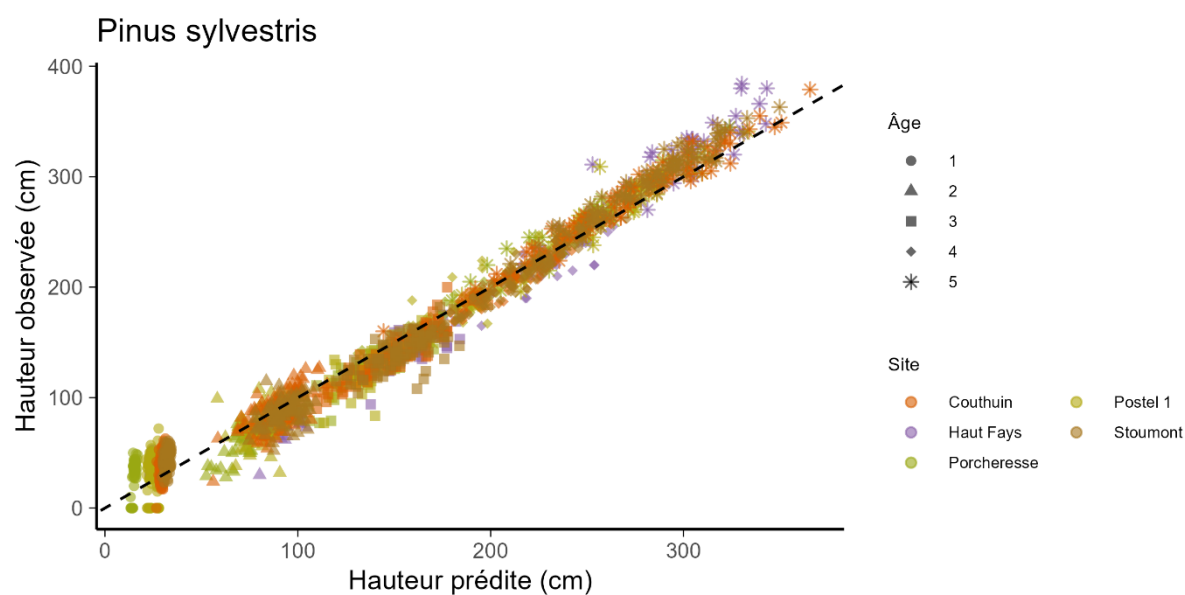
Abies nordmanniana

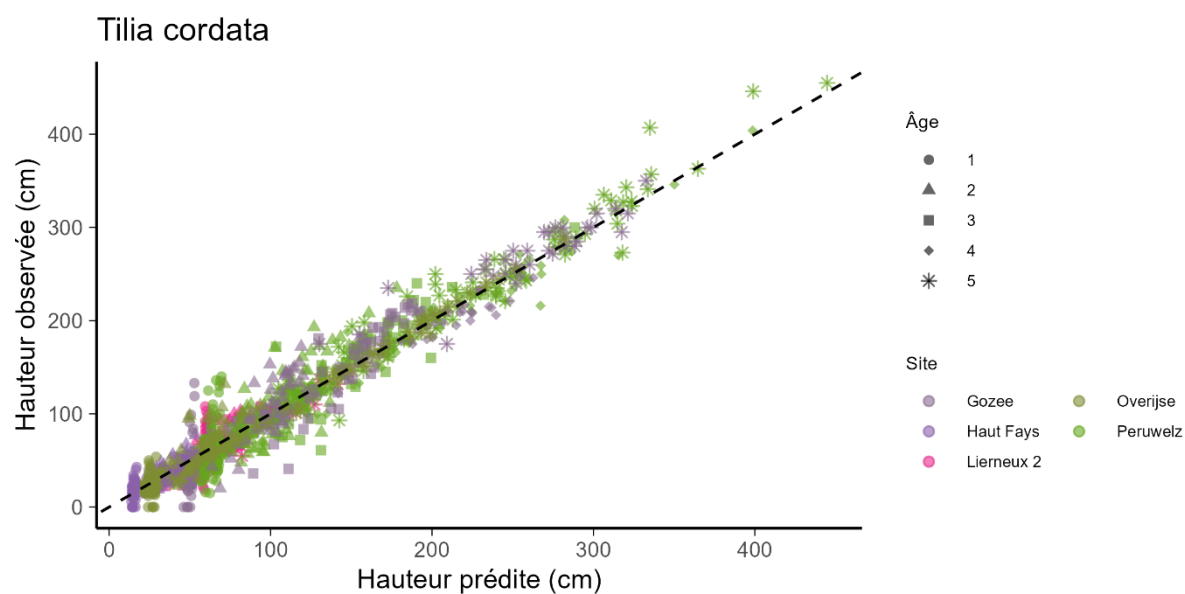
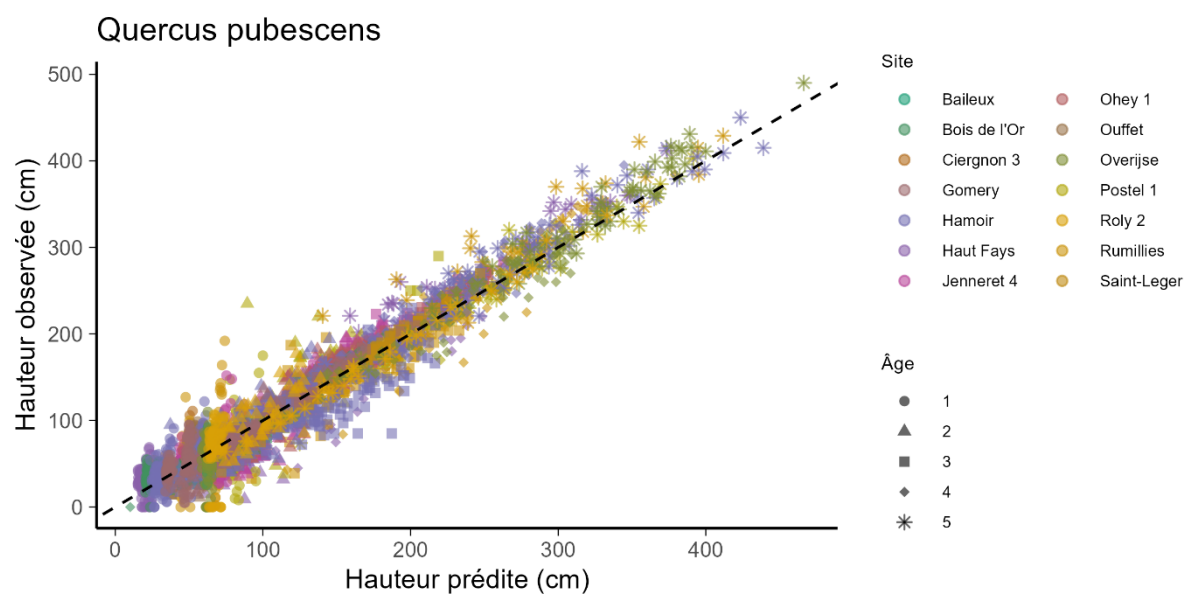
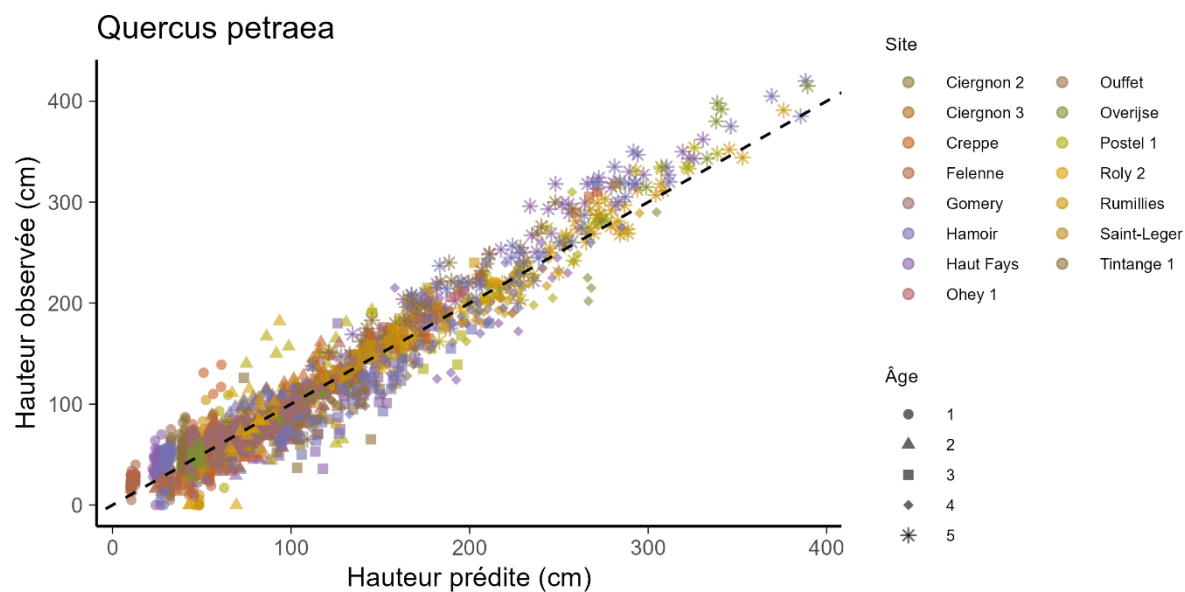


Calocedrus decurrens









Annexe R – Tableau reprenant les valeurs statistiques des *boxplots* avec les coefficients de variation (CV) de la Figure 23

Le nombre d'UG a été calculé selon l'Annexe H.10 du jeu de données.

Espèce	Nombre UG	Median CV	Q1 CV	Q3 CV	Min CV	Max CV	IQR CV	Moyenne CV	Écart type CV	CV global
<i>Abies bornmuelleriana</i>	3	31,9	29,4	34,5	27,0	37,1	5,04	32,0	5,05	15,8
<i>Abies nordmanniana</i>	6	27,8	23,6	28,9	21,5	33,1	5,32	27,0	4,40	16,3
<i>Cedrus atlantica</i>	23	24,1	19,8	26,6	14,2	51,3	6,81	25,3	9,38	37,1
<i>Pinus nigra</i>	12	14,6	13,8	16,4	10,4	19,7	2,62	14,9	2,88	19,3
<i>Pinus pinaster</i>	4	19,5	14,1	25,6	13,9	28,2	11,6	20,3	7,33	36,2
<i>Pinus sylvestris</i>	8	11,1	9,33	14,1	8,0	15,4	4,77	11,6	2,87	24,8
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	5	27,7	26,4	30,0	22,6	34,5	3,60	28,3	4,42	15,6
<i>Quercus cerris</i>	8	27,6	26,2	29,7	23,8	42,2	3,58	29,1	5,67	19,5
<i>Quercus petraea</i>	7	24,0	21,2	27,5	16,8	30,5	6,36	24,1	4,79	19,9
<i>Quercus pubescens</i>	13	26,7	22,9	29,0	21,0	38,7	6,14	27,1	5,43	20,1
<i>Tilia cordata</i>	7	39,5	31,3	41,6	17,1	59,9	10,3	37,5	13,6	36,4

Annexe S – Données stationnelles pour les deux espèces étudiées dans le cadre de l'analyse de l'effet du site sur la croissance annuelle

Annexe S.1 – Données de *Q. pubescens*

Site	Nombre d'UG	Saison de plantation	En ligne / Klumps	Type de plant	Zone bioclimatique	Niveau trophique	Niveau hydrique
Bois de l'Or	1	20-21	En ligne	Godet	Ardenne française	-1	-1 ou -2
Ciergnon 3	3	21-22	Klumps	Godet	Fagne, Famenne et Calestienne	-2	4
Gomery	2	21-22	En ligne	Godet	Basse Lorraine	-1	-2RHA
Hamoir	3	19-20	En ligne	Les deux	Sambre-et-Meuse et Condroz	-2	1
Jenneret 4	2	21-22	En ligne	Godet	Sambre-et-Meuse et Condroz	-1	0
Ohey 1	2	21-22	Klumps	Godet	Sambre-et-Meuse et Condroz	-1	1
Ouffet	2	21-22	En ligne	Godet	Sambre-et-Meuse et Condroz	2	4 et 1
Postel 1	2	19-20	Klumps	Les deux	Campine	-1	2
Rumillies	2	19-20	En ligne	Racines nues	Plaines et vallées Scaldiennes	0	-2RHA
Saint-Léger	2	21-22	En ligne	Godet	Haute Lorraine	0	0

Site	Position	Exposition	Texture	Altitude (m)	Compaction	Charge caillouteuse
Bois de l'Or	Plateau	Neutre		339	Peu compact	> 50 %
Ciergnon 3	Plateau	Neutre	Limon léger	238	Peu compact	15-50 %
Gomery	Pente faible	Neutre	Argile légère	301	Compact	5-15 %
Hamoir	Plateau	Neutre	Limon lourd	228	Compact	5-15 %
Jenneret 4	Pente concave	Froid	Limon léger	242	Compact	15-50 %
Ohey 1	Pente faible	Neutre	Limon lourd/limon léger	246	Compact	15-50 %
Ouffet	Plateau	Neutre	Limon lourd	243	Compact	15-50 %
Postel 1	Plaines	Neutre	Sableux	42	Meuble	< 5 %
Rumillies	Plateau	Neutre	Limon sableux	50	Compact	5-15 %
Saint-Léger	Pente faible concave	Neutre	Limon sableux	335	Compact	5-15 %

Annexe S.2 – Données de *C. atlantica*

Site	Nombre d'UG	Saison de plantation	En ligne / Klumps	Type de plant	Zone bioclimatique	Niveau trophique	Niveau hydrique
Château Regnault	1	20-21	En ligne	Godet	Ardenne française	-1	-1 ou -2
Hamoir	3	19-20	En ligne	Godet	Sambre-et-Meuse et Condroz	-2	1
Lierneux 1	3	18-19	En ligne	Godet	Basse et moyenne Ardenne	-1	2
Poppel 1	3	19-20	En ligne	Godet	Campine	-3	2
Porcheresse	2	19-20	En ligne	Godet	Basse et moyenne Ardenne	-2	1
Postel 2	3	20-21	En ligne	Godet	Campine	0	-2
Roly	3	19-20	En ligne	Godet	Fagne, Famenne et Calestienne	-1	0
Stoumont	3	19-20	En ligne	Godet	Basse et moyenne Ardenne	-1	2
Tintange 1	2	19-20	En ligne	Godet	Ardenne centro-orientale	-1	1
Vierves-sur-Viroin	3	19-20	En ligne	Godet	Basse et moyenne Ardenne	-2	2

Site	Position	Exposition	Texture	Altitude (m)	Compaction	Charge caillouteuse
Château Regnault	Plateau	Neutre		256	Peu compact	> 50 %
Hamoir	Plateau	Neutre	Limon lourd	228	Compact	5-15 %
Lierneux 1	Versant Est	Froid	Limon léger	375	Peu compact	15-50 %
Poppel 1	Plaine	Neutre	Sableux	21	Meuble	<5 %
Porcheresse	Plateau	Neutre	Limon lourd	366	Compact	15-50 %
Postel 2	Plaine	Neutre	Sableux	36	Meuble	< 5 %
Roly	Versant nord	Froid	Limon lourd	198,5	Compact	5-15 %
Stoumont	Versant nord	Froid	Limon léger	399	Peu compact	15-50 %
Tintange 1	Pente faible	Neutre	Limon léger	481	Compact	15-50 %
Vierves-sur-Viroin	Versant	Froid	Limon léger	266	Peu compact	15-50 %

Annexe T – Nombre d’Unités Génétiques ayant un taux de survie inférieur à 80 % en 2024

Annexe T.1 – Caractéristiques des UG concernées par un taux de survie inférieur à 80 % en 2024

Code UG	Espèce	Année du suivi	Âge	Année de plantation	Végétation présente	Végétation concurrente	Protection gibier	Taux de survie
CooHelPpiMim	<i>Pinus pinaster</i>	2024	5	2019	Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Clôture	56,0 %
CooHelPpiSai	<i>Pinus pinaster</i>	2024	5	2019	Herbacées, Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Ronces/Framboisiers	Clôture	58,0 %
DebPosPpiMim	<i>Pinus pinaster</i>	2024	5	2019	Ronces/Framboisiers		Aucune	62,0 %
DebPosQpuNor	<i>Quercus pubescens</i>	2024	5	2019	Herbacées, Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Ligneuses	Aucune	72,2 %
DebPosQpuSudR	<i>Quercus pubescens</i>	2024	5	2019	Herbacées, Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Ligneuses	Aucune	77,8 %
DejPopPpiSai	<i>Pinus pinaster</i>	2024	5	2019	Herbacées, Ligneuses		Aucune	62,0 %
LalGozTcoNor	<i>Tilia cordata</i>	2024	5	2019	Herbacées, Ronces/Framboisiers		Individuelle	72,0 %
PelOufQpuNor	<i>Quercus pubescens</i>	2024	5	2019	Herbacées, Fougères, Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Fougères, Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Clôture	62,0 %
duPOveQpeCul	<i>Quercus petraea</i>	2024	5	2019	Fougères, Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Aucune	50,0 %
duPOveQpuSud	<i>Quercus pubescens</i>	2024	5	2019	Fougères, Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Aucune	62,0 %
duPOveTcoNor	<i>Tilia cordata</i>	2024	5	2019	Fougères, Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Fougères, Ronces/Framboisiers	Aucune	68,0 %
duPOveTcoOue	<i>Tilia cordata</i>	2024	5	2019	Fougères, Ronces/Framboisiers, Ligneuses	Ronces/Framboisiers	Aucune	52,0 %
duPRolQpeCul	<i>Quercus petraea</i>	2024	5	2019	Herbacées, Ronces/Framboisiers, Ligneuses		Individuelle	77,8 %

Annexe T.2 – Données des taux de survies (TS) de chaque année des UG concernées par un taux de survie inférieur à 80 % en 2024

Code UG	Espèce	TS 2020	TS 2021	TS 2022	TS 2023	TS 2024
CooHelPpiMim	<i>Pinus pinaster</i>	100 %	98,0 %	100 %	68,0 %	56,0 %
CooHelPpiSai	<i>Pinus pinaster</i>	98,0 %		100 %	72,0 %	58,0 %
DebPosPpiMim	<i>Pinus pinaster</i>	92,0 %	76,0 %	68,0 %	68,0 %	62,0 %
DejPopPpiSai	<i>Pinus pinaster</i>	82,0 %	84,0 %	66,0 %	66,0 %	62,0 %
duPOveQpeCul	<i>Quercus petraea</i>	100 %			83,3 %	50,0 %
duPRolQpeCul	<i>Quercus petraea</i>	100 %				77,8 %
DebPosQpuNor	<i>Quercus pubescens</i>					72,2 %
DebPosQpuSudR	<i>Quercus pubescens</i>	100 %		94,4 %	94,4 %	77,8 %
PelOufQpuNor	<i>Quercus pubescens</i>	94,0 %	88,0 %	90,0 %	82,0 %	62,0 %
duPOveQpuSud	<i>Quercus pubescens</i>	92,0 %			84,0 %	62,0 %
LalGozTcoNor	<i>Tilia cordata</i>	92,0 %	92,0 %	96,0 %	90,0 %	72,0 %
duPOveTcoNor	<i>Tilia cordata</i>	94,0 %	80,0 %			68,0 %
duPOveTcoQue	<i>Tilia cordata</i>	98,0 %	80,0 %			52,0 %

Annexe U – Nombre d’Unités Génétiques concernées et étudiées pour réaliser la figure sur l’évolution des proportions selon l’année et l’espèce, avec le nombre total d’arbres repris pour l’ensemble des UG concernées

Le jeu de données utilisé provient des données de l’Annexe H.8.

Espèce	Année du suivi	Nombre d'UG	Total
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2020	3	145
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2021	3	145
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2022	3	145
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2023	4	195
<i>Abies bornmuelleriana</i>	2024	4	195
<i>Abies nordmanniana</i>	2020	6	300
<i>Abies nordmanniana</i>	2021	6	300
<i>Abies nordmanniana</i>	2022	6	300
<i>Abies nordmanniana</i>	2023	6	300
<i>Abies nordmanniana</i>	2024	7	350
<i>Calocedrus decurrens</i>	2021	4	200
<i>Calocedrus decurrens</i>	2022	2	100
<i>Calocedrus decurrens</i>	2023	3	150
<i>Calocedrus decurrens</i>	2024	6	300
<i>Cedrus atlantica</i>	2020	20	1000
<i>Cedrus atlantica</i>	2021	23	1150
<i>Cedrus atlantica</i>	2022	26	1300
<i>Cedrus atlantica</i>	2023	29	1450
<i>Cedrus atlantica</i>	2024	29	1450
<i>Pinus nigra</i>	2020	11	550
<i>Pinus nigra</i>	2021	11	550
<i>Pinus nigra</i>	2022	11	550
<i>Pinus nigra</i>	2023	12	600
<i>Pinus nigra</i>	2024	12	600
<i>Pinus pinaster</i>	2020	4	200
<i>Pinus pinaster</i>	2021	3	150
<i>Pinus pinaster</i>	2022	4	200
<i>Pinus pinaster</i>	2023	4	200
<i>Pinus pinaster</i>	2024	4	200
<i>Pinus sylvestris</i>	2020	8	400
<i>Pinus sylvestris</i>	2021	8	400
<i>Pinus sylvestris</i>	2022	8	400
<i>Pinus sylvestris</i>	2023	8	400
<i>Pinus sylvestris</i>	2024	8	400
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2020	5	250
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2021	5	250
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2022	3	150
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2023	4	200
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2024	5	250
<i>Quercus cerris</i>	2020	7	304
<i>Quercus cerris</i>	2021	4	200

<i>Quercus cerris</i>	2022	8	400
<i>Quercus cerris</i>	2023	10	468
<i>Quercus cerris</i>	2024	12	540
<i>Quercus petraea</i>	2020	7	272
<i>Quercus petraea</i>	2021	3	150
<i>Quercus petraea</i>	2022	11	526
<i>Quercus petraea</i>	2023	15	694
<i>Quercus petraea</i>	2024	17	765
<i>Quercus pubescens</i>	2020	11	458
<i>Quercus pubescens</i>	2021	6	300
<i>Quercus pubescens</i>	2022	19	819
<i>Quercus pubescens</i>	2023	24	1055
<i>Quercus pubescens</i>	2024	31	1320
<i>Tilia cordata</i>	2020	6	300
<i>Tilia cordata</i>	2021	6	300
<i>Tilia cordata</i>	2022	5	244
<i>Tilia cordata</i>	2023	5	244
<i>Tilia cordata</i>	2024	7	344

Analyse comparée de la performance de douze espèces d'avenir au stade juvénile, dans le contexte des changements climatiques

Laure Haedens-Dumoulin

Les forêts belges sont peu diversifiées et dominées par des espèces sensibles aux changements climatiques, ce qui constitue une préoccupation majeure quant à leur adaptation. Dans ce cadre, le projet *Trees for Future* vise à identifier des espèces et des provenances contribuant à l'adaptation des forêts aux changements climatiques. À ce jour, le projet inclut 30 espèces réparties sur plusieurs sites en Belgique. Seules les plantations de douze espèces, âgées d'un à cinq ans, sont étudiées dans ce mémoire. L'objectif principal est d'évaluer les comportements et les besoins de ces espèces, à leur stade juvénile, en Belgique. Plus précisément, il s'agit d'identifier les groupes de croissance, les facteurs influençant la croissance, l'homogénéité de croissance, le taux de survie et les facteurs du site expliquant l'évolution de la croissance d'une espèce. Pour ce faire, les données ont été traitées et des analyses statistiques ont été réalisées. Un modèle de croissance a été réalisé qui dépend d'effets fixes (l'âge, l'espèce et leur interaction) et d'effets aléatoires (l'individu arbre, le site et l'année de plantation). Les résultats révèlent que l'espèce a un effet significatif sur la croissance, permettant l'identification de groupes de croissance : *A. bornmuelleriana* et *A. nordmanniana*, *C. decurrens* et *T. cordata* montrent des croissances plus faibles, *Q. cerris*, *Q. petraea*, *C. atlantica*, *P. menziesii* et *Q. pubescens* montrent des croissances intermédiaires tandis que *P. nigra*, *P. sylvestris* et *P. pinaster* montrent des croissances relativement plus élevées. Ces regroupements peuvent être expliqués par leur aptitude écologique similaire, comme leur besoin en lumière. L'analyse de l'hétérogénéité de croissance pour chaque espèce montre que les espèces les plus homogènes sont *P. nigra* et *P. sylvestris*, l'espèce la plus hétérogène est *T. cordata* tandis que les autres espèces se situent entre les deux cas. Cette hétérogénéité peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Par exemple, *T. cordata* montre des ralentissements de croissance chez certains arbres liés à des dégâts liés au gibier. L'étude de l'effet du site pour *Q. pubescens* et *C. atlantica* montre que le site influence significativement leur croissance. Les différences de croissance entre les sites s'expliquent principalement par l'adéquation stationnelle de ces espèces. Par exemple, une espèce sensible aux gelées tardives pousse mieux sur des sites non exposés. Enfin, plusieurs facteurs sont à l'origine de la diminution du taux de survie, notamment le stress post-plantation, les facteurs biotiques et abiotiques.