
Comparaison à l'aide de méthodes non destructives de la qualité des fûts d'épicéa issus soit de régénérations naturelles soit de plantations

Auteur : Gosset, Thibault

Promoteur(s) : Ligot, Gauthier

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9507>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

**Comparaison à l'aide de méthodes non destructives de la
qualité des fûts d'épicéa issus soit de régénérations
naturelles soit de plantations.**

THIBAUT GOSSET

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET ESPACES NATURELLES**

ANNEE ACADEMIQUE 2019-2020

PROMOTEUR: LIGOT GAUTHIER

Copyright © Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de l'Université de Liège -Faculté Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

Remerciements

Je tiens, tout d'abord, à remercier de leur accueil dans leurs bureaux et de la mise à disposition du matériel nécessaire à la réalisation de ce travail, l'Axe "Gestion des Ressources Forestières" de Gembloux Agro-Bio Tech.

Je tiens aussi à remercier mon promoteur Gauthiuer Ligot de l'unité de gestion des ressources forestières et des milieux naturels de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech de m'avoir encadré et guidé durant la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Je remercie aussi les différents agents forestiers du DNF de leur contribution à la réalisation de cette thèse.

J'adresse également ma gratitude aux différentes personnes contactées ; Christine Sanchez de l'ASBL Foret.Nature, Marc Etienne Wilhelm animateur sylvicole à l'ONF en Alsace, Francis Colin directeur de recherche au centre INRAE de Nancy ainsi que Jean-Marc Hénin du DEMNA de m'avoir aiguillé et répondu à mes différentes questions.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance envers mes parents et mon frère pour leur soutien et encouragement tout au long de ces années d'étude au sein de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech. Tout cela n'aurait pas été possible sans eux.

Abstract

Spruce stands have traditionally been regenerated by plantation and harvested by clear-cutting in Belgium since the middle of the 19th century. For several decades, a genetic selection of spruce origins has been carried out to increase the productivity and quality of plantations. With natural regeneration, the genetic diversity of regenerated trees is no longer controlled, spurring fears of losing this progress. Moreover, different forest stakeholders have suggested that naturally regenerated trees are of poorer quality than planted trees. The aim of this study is to test this statement by comparing the quality of spruce wood produced in naturally and artificially regenerated even-aged stands. This comparison was achieved through a review of the literature, interviews with one Belgian and two French experts in order to collect and synthesize their opinions and developing a field experiment. To elaborate this experiment, a survey was first sent to the Walloon forest service in order to locate potential study stands. Next, the field experiment was designed and prepared. An adequate sampling scheme to measure and compare the timber quality of naturally regenerated and planted spruce was developed. To collect the data, a smartphone application was used to build an efficient encoding system that can be used to ease and verify data collection. This protocol and application were then tested in four plots. Finally, a framework for the statistical analyses of the data that could be gathered according to the protocol is proposed.

Based on the literature and on expert interviews, it seems unclear why the quality of naturally regenerated stands could differ from that of plantations. The collected information rather suggests that other factors, such as silvicultural treatment, may be more important. Establishing a field experiment remains nevertheless needed to verify this hypothesis. Our survey of potential study sites revealed that at least 46 naturally-regenerated stands with mean tree girth greater than 60 cm could be found in the public forests of Wallonia. A robust sample could then be established. Finally, the preliminary field experiment brought insight about the variability of wood quality in two spruce stands and information about sampling time costs. This information is used to discuss what would be the most efficient sampling strategy.

At the end of this thesis, it remains unclear whether the wood quality of naturally regenerated trees differ from that of planted trees. But an all-inclusive toolbox has been developed to test this hypothesis.

Keywords : Norway spruce, wood quality, non-destructive evaluation, natural regeneration

Résumé

L'épicéa est traditionnellement régénéré par plantation et exploité par mise à blanc en Belgique depuis le milieu du 19^{ème} siècle. Depuis plusieurs décennies, une sélection génétique des provenances d'épicéa a été réalisée pour augmenter la productivité et la qualité du bois issu des plantations. Avec la régénération naturelle, cet aspect n'est plus autant maîtrisé et la crainte de perdre ce progrès subsiste. De plus, différents acteurs du monde forestier suggèrent que le bois issu de régénération naturelle est de moins bonne qualité que celui issu de plantation. L'objectif de ce travail est ainsi de comparer la qualité du bois d'épicéa issu de régénération naturelle et de plantation dans le contexte de la futaie équienne. Cette comparaison est obtenue à l'aide d'une synthèse de la littérature, d'interviews auprès d'un expert belge et deux experts français afin de recueillir leurs opinions et la création d'une expérimentation de terrain. Pour mettre en place cette expérimentation, un formulaire a été envoyé à différents cantonnements du DNF afin de localiser les parcelles potentiellement intéressantes. Le protocole de terrain a ensuite été développé afin de mesurer et comparer la qualité du bois d'épicéa issu de régénération naturelle et de plantation. Un système d'encodage a été développé sur base d'une application smartphone afin de faciliter l'encodage des données. Ce protocole et cette application ont ensuite été testés au sein de quatre placettes. Enfin, une structure d'analyse statistique des données récoltées est proposée.

Selon la littérature et les interviews des experts, la qualité des peuplements régénérés naturellement ne devrait pas différer de la qualité des peuplements issus de plantation. Les informations récoltées suggèrent plutôt que d'autres facteurs, comme les interventions sylvicoles, puissent être plus importants. Mettre en place une expérimentation de terrain reste cependant nécessaire afin de vérifier cette hypothèse. L'enquête réalisée auprès des agents du DNF a révélé qu'au moins 46 parcelles présentent des arbres de minimum 60 cm de circonférence, permettant ainsi un échantillonnage suffisant. Enfin, la première expérience sur le terrain a permis d'estimer la variabilité de la qualité du bois entre deux peuplements et d'obtenir des informations sur l'effort d'échantillonnage à concevoir. Ces informations sont utilisées afin d'estimer le plan d'échantillonnage le plus optimal.

A l'issue de cette thèse, aucun éclaircissement n'a pu être apporté concernant une potentielle différence de qualité du bois entre la régénération naturelle et la plantation. Une boîte à outils complète a, cependant, été développée afin de tester cette hypothèse.

Mots-clés Epicéa commun, qualité du bois, mesure non-destructive, régénération naturelle

Table des matières

Remerciements	i
Abstract	ii
Résumé	iii
Table des matières	vi
I Introduction	1
1 Contexte	1
1.1 Engouement pour la régénération naturelle	1
1.2 Sylviculture de l'épicéa en Belgique	2
1.3 La régénération naturelle de l'épicéa en Belgique	4
1.4 Problématique	5
2 Objectifs de l'étude	6
3 Bref plan de l'étude	6
II Revue de la littérature	7
4 Anatomie du bois	7
4.1 Paroi cellulaire	7
4.2 Bois de printemps	8
4.3 Bois d'été	9
4.4 Bois de réaction	9
4.5 Bois juvénile	10
5 Caractériser la qualité du bois d'épicéa	11
5.1 Densité du bois	12
5.2 Module d'élasticité	12

5.3	Défilement	13
6	Facteur de variation de la qualité du bois d'épicéa	14
6.1	Nodosité	14
6.2	Vitesse de croissance	15
6.3	Compression latérale	15
7	Mesurer la qualité du bois d'épicéa	20
7.1	Classement du bois	20
7.1.1	Classement visuel	20
7.1.2	Classement mécanique	21
7.2	Mesures destructives	21
7.2.1	SilviScan	21
7.2.2	Spectroscopie par infrarouge proche	21
7.2.3	DiscBot	22
7.2.4	Tomographie	22
7.3	Mesures non destructives	23
7.3.1	Pilodyn	23
7.3.2	Méthodes acoustiques	24
7.3.3	Résistographe	25
7.3.4	Rigidimètre	26
III	Avis des experts	27
IV	Élaboration et test du protocole de terrain	31
8	Sélection des sites d'études	31
9	Acquisition des données	33
9.1	Réalisation de la placette dendrométrique	33
9.2	Mesure de la circonférence	33
9.3	Mesure de la densité du bois	33
9.4	Mesure acoustique	35
9.5	Calcul du module d'élasticité	35
9.6	Excentricité de la couronne	37
9.7	Hauteur élaguée	38

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	vi
9.8 Nodosité	38
9.9 Défilement	38
9.10 Déformations de la base du tronc	39
9.11 Synthèse des temps de mesure	40
10 Encodage des données	41
11 Analyse statistique théorique	44
12 Echantillonnage pilote	47
12.1 Analyse descriptive	49
12.2 Illustration de la méthode de modélisation	50
12.3 Estimation de l'effort d'échantillonnage	53
V Discussion	55
13 Qualité du bois issu de la régénération naturelle	55
14 Interprétation de l'échantillonnage pilote	56
15 Critiques et améliorations du protocole	59
16 Perspectives pour des recherches ultérieures	60
Référence	62

Table des figures

1	Structure de la paroi cellulaire. Illustration issue de JOUREZ (2011)	7
2	Transition en coupe transversale entre du bois de printemps et du bois d'été chez l'épicéa commun.	9
3	Répartition le long du tronc du bois juvénile et du bois mature chez un résineux. Illustration issue de JOUREZ (2011)	11
4	Effet de la compression latérale sur le défilement du tronc. Illustration issue de JOZSA et MIDDLETON (1994)	17
5	Variation de la proportion de bois juvénile en fonction du statut social et de l'espacement entre arbre. Illustration issue de BRÜCHERT <i>et al.</i> (2000)	19
6	Photo d'un pilodyn 6J forest	23
7	Techniques de mesure de la vitesse de propagation d'une onde dans le bois.	25
8	Photo d'un résistographe. Illustration issue de GULLER <i>et al.</i> (2012)	26
9	Schéma d'installation d'un rigidimètre. Illustration issue de SCHIMLECK <i>et al.</i> (2019)	26
10	Répartition du nombre de parcelles présentant de la régénération naturelle par classe de circonférence.	32
11	Mesure au pilodyn. Illustration issue de HANSEN (2000)	34
12	Blessure laissée par la mesure de la densité du bois	34
13	Mise en place du Fakopp TreeSonic timer	36
14	Blessure causée par la mise en place du Fakopp Treesonic timer	36
15	Schéma de la procédure de mesure de l'excentricité de la couronne	37
16	Mesure de la déformation de la base du tronc	39
17	Application d'encodage	43
18	Vérification des conditions d'application du modèle ajusté sur les données théoriques	47
19	Localisation des placettes mesurées dans le Cantonement de Verviers à proximité d'Eupen	48
20	Boxplot des différentes mesures en fonction du type de régénération	51
21	Valeur du module d'élasticité par placette	52
22	Vérification des conditions d'application du modèle ajusté à partir des données récoltées sur le terrain.	52
23	Évolution du demi-intervalle de confiance en fonction du nombre de placettes et du nombre d'arbres par placette	55

Liste des tableaux

1	Critère de la nodosité pris lors du classement du bois. Tableau issu de CNDB (2000)	14
2	Tableau de la présence de régénération naturelle d'épicéa dans les différents cantonnements ayant répondu au questionnaire	32
3	Tableau récapitulatif du temps estimé pour les différentes mesures	41
4	Description de l'échantillonnage théorique	44
5	Moyenne et écart-type des distributions normales utilisées pour chaque variable en fonction du type de régénération	44
6	Estimation des paramètres du modèle	46
7	Caractéristiques des peuplements échantillonnés.	49
8	Description de l'échantillonnage.	49
9	Estimation des paramètres du modèle décrit par l'équation 10	50
10	Moyenne et écart-type des distributions normales pour le nombre de placettes et le nombre d'arbres par placette	53
11	Classe de résistance du bois en fonction du module d'élasticité. Tableau extrait de BENOIT <i>et al.</i> (2008)	57

Première partie

Introduction

1 Contexte

1.1 Engouement pour la régénération naturelle

Globalement, l'engouement pour la régénération naturelle se généralise en Europe, incitant certains pays à mettre en place des législations strictes. Par exemple, en Allemagne, de nombreux Länder restreignent fortement les coupes rases. En Rhénanie du Nord-Westphalie depuis les années 90, la superficie mise à blanc ne peut pas dépasser un hectare en forêt privée et 0,3 ha en forêt domaniale. Suite à de graves inondations, toute mise à blanc est interdite en Suisse depuis 1991 (BARTHOD *et al.*, 1999).

En Slovénie, l'engouement pour la régénération naturelle remonte à plus d'un siècle. L'évolution des pratiques sylvicoles s'y est déroulée en quatre étapes. Tout d'abord, à la fin du 19^{ème} siècle, faisant face à une dégradation de l'environnement (côte Adriatique déforestée, plantation d'épicéa intensive dans les alpes) et à une surexploitation des forêts privées, la volonté de changer de méthode de sylviculture a commencé à s'installer. La réussite de la mise en place d'un premier plan de gestion à grande échelle et la pratique d'une sylviculture conservatrice par certains agriculteurs et autres grands propriétaires terriens ont permis d'encourager ce changement. La seconde période, du début du 20^{ème} siècle à la fin de la Seconde Guerre mondiale, est marquée par un décret obligeant la création de plans de gestion des forêts pour tous les grands propriétaires terriens. A la fin de la guerre, un second décret visant à interdire la gestion par mise à blanc à grande échelle voit le jour. Fort de cette interdiction, une gestion ayant recourt à l'utilisation de la régénération naturelle est établie dans toutes les forêts du pays. Enfin, après l'indépendance de la Slovénie au début des années 1990, le service forestier slovène est créé. Il a pour but le contrôle et la gestion des forêts publiques et privées. Ce service a permis de conserver ce mode de gestion au moment où le milieu forestier faisait face à beaucoup de bouleversements. Notamment, la séparation entre la sylviculture et l'exploitation faisant suite au transfert de la responsabilité de la gestion forestière des entreprises forestières aux propriétaires forestiers. Les propriétaires forestiers sont ainsi, par exemple, devenus responsables de la réalisation des travaux forestiers (DIACI, 2006).

Ensuite, en janvier 2019, le ministre irlandais des forêts a annoncé un grand projet visant à favoriser la sylviculture à couvert continu, encourageant la durabilité, la résilience

et la biodiversité des forêts irlandaises. Par exemple, pour inciter les propriétaires à adopter ce nouveau type de gestion, trois paiements de 750€/ha leur sont versés, un la première année, puis après quatre à huit ans et enfin après douze ans. C'est ainsi qu'en octobre de la même année, une motion votant un programme d'irrégularisation des jeunes futaies régulières a été adoptée (WILSON *et al.*, 2020).

Cet engouement est expliqué par les nombreux avantages liés à la régénération naturelle. Tout d'abord, elle permet de limiter les coûts de plantation, étape la plus coûteuse lors de la mise en œuvre d'une sylviculture régulière régénérée artificiellement (PETIT et CLAESSENS, 2013). De plus, l'exploitation en futaies régulières récoltée par mise à blanc est de moins en moins appréciée par la population à cause des marques laissées dans le paysage et des impacts écologiques (NOLET *et al.*, 2018; VÍTKOVÁ et DHUBHÁIN, 2013). Les coupes rases peuvent avoir des impacts non négligeables. Le retrait d'une importante quantité d'arbres peut entraîner des remontées de nappes phréatiques par la diminution de l'évapotranspiration et déstabiliser les peuplements voisins qui deviennent alors plus vulnérables aux chablis. Elles modifient brutalement les conditions biotiques et abiotiques du sol engendrant des conséquences de différentes natures. Il s'agit par exemple d'une émission significative de carbone issue notamment de la respiration des organismes de la litière du sol. Des pertes d'éléments par érosion ou du tassement peuvent aussi apparaître. Différentes techniques visant à réduire ces impacts existent. Par exemple, une mise à blanc sur cloisonnements et lits de branches permet de protéger 80 à 90% de la surface du sol lors de l'exploitation (LAYON *et al.*, 2013). Les bilans des coupes rases ne sont cependant pas complètement négatifs. Cette méthode permet une exploitation facile et à moindre coût. Elle fournit des lots homogènes ce qui est apprécié par la filière bois. D'un autre côté, les mises à blanc peuvent aussi être bénéfiques pour certaines espèces ayant besoin de milieux ouverts, augmentant ainsi la biodiversité. En retirant tous les arbres présents sur une surface assez importante, la mise à blanc permet l'introduction plus aisée de nouvelles espèces dont notamment les pionnières se régénérant difficilement sous les essences tolérantes à l'ombre (ex. hêtre).

1.2 Sylviculture de l'épicéa en Belgique

L'épicéa a été introduit pour la première fois au début du 19^{ème} siècle en Ardenne orientale; puis vers le milieu du 19^{ème} siècle sur les hauts plateaux ardennais à la suite d'une première vague de replantation de pin sylvestre (THIBAUT *et al.*, 2007). La surface forestière belge était alors à son minimum. C'est seulement suite à la loi de 1847, en pleine révolution industrielle, concernant la valorisation par les communes de leurs incultes que

l'épicéa est devenu la première essence de replantation à la fin du 19^{ème} siècle. Il était alors introduit sur toute l'Ardenne. Au fil du temps, les landes, les tourbières, les plaines humides et autres terres agricoles moins productives ont été boisées. Ce phénomène a été favorisé par la forte demande en bois lié à l'accroissement économique, entre autres pour l'industrie minière. Dans les années 80, le pic de développement est atteint, la pessière est présente sur 200 000 ha, représentant 37% de la forêt wallonne.

Sa capacité à se développer dans des contextes difficiles (station humide, froide et où la période de végétation est courte) et sa productivité, jusqu'à deux fois supérieure à une forêt feuillue d'Ardenne, expliquent en partie son succès. L'épicéa possède généralement un fût droit, avec des branches fines ce qui lui a permis une valorisation diverse, et ce, quelles que soient les dimensions (pâte à papier, construction, poteaux, piquets, menuiserie). Il était alors considéré comme un investissement intéressant (CLAESSENS, 2001; CLAESSENS *et al.*, 2017).

Grâce à son bois de qualité et en permettant l'occupation des terres considérées comme incultes, l'épicéa est traditionnellement exploité en futaie pure équienne issue de plantation. Récolté par mise à blanc en Région wallonne, cette méthode de gestion permet ainsi une rentabilité optimale et un suivi de peuplement simplifié. Fournissant aussi des lots homogènes, la filière de l'industrie du bois s'est rapidement adaptée et développée en fonction de cette ressource. De plus, des normes de sylviculture ont été développées afin d'améliorer la productivité des pessières.

Actuellement, les peuplements résineux occupent 43% de la forêt wallonne, correspondant ainsi à une superficie de 205 000 ha. Avec 122 000 ha, l'épicéa représente toujours la première essence de production en Wallonie. Le terme d'exploitabilité est généralement considéré être atteint lorsque la circonférence est entre 90 et 120 cm voir proche de 150 cm dans les forêts publiques bien que le marché pour les très gros bois soit relativement réduit. La majorité des scieurs ne peuvent en effet pas travailler des bois de plus de 180 cm. En 2019, 12 000ha de forêts résineuses ont été mis à blanc en Wallonie (OEWB, 2019). Cependant, depuis les années 90, la surface des pessières diminue. Entre 1984 et 2008, la surface de pessière wallonne a diminué de 30 000 ha (représentant 15% de réduction), inquiétant la filière (ALDERWEIRELD *et al.*, 2015; FRISSON *et al.*, 2011). Cette diminution est expliquée par différentes raisons.

Tout d'abord, comme écrit précédemment, la pessière wallonne est issue d'un reboisement massif. Un grand nombre de peuplements arrivent ainsi à maturité et sont récoltés, mais pas forcément replantés. En effet, l'incertitude actuelle due aux changements climatiques et à d'autres aspects économiques ne donne pas confiance à de nombreux propriétaires ou investisseurs.

Ensuite, à l'époque, l'épicéa a été planté sur tous les types de sols réputés incultes, y compris les zones non favorables à son développement comme les tourbières ainsi que les endroits où sa présence provoque des impacts néfastes, comme l'acidification des cours d'eau. Toutes ces zones combinées, la surface concernée représente 25% des pessières wallonnes (CLAESSENS, 2001). Actuellement, une grande partie des surfaces où l'épicéa n'a plus sa place fait l'objet de projets de restauration (CLAESSENS *et al.*, 2017).

Enfin, les dégâts causés par la tempête Lothar en 1999, la prise en compte du changement climatique ainsi que la plantation d'essences plus productives (ex. Douglas) et/ou plus adaptées à un climat hivernal doux, plus résistantes aux sécheresses et aux canicules ont mis à mal de nombreuses plantations d'épicéa.

1.3 La régénération naturelle de l'épicéa en Belgique

Depuis 2013, le gouvernement wallon a retranscrit sa volonté de promouvoir une sylviculture à couvert continu grâce à la publication de la circulaire n° 2178 (DG03, 2013). Cette circulaire a pour objectif la mise en place obligatoire de la gestion Pro Silva dans les forêts domaniales ainsi que la recommandation de ce type de gestion dans les forêts communales. Cette sylviculture vise à produire du bois de qualité tout en réduisant les investissements. Elle met un point d'honneur à conserver un couvert forestier continu et à favoriser la régénération naturelle. Les décideurs espèrent ainsi promouvoir le développement de forêts plus résilientes capables de délivrer une multitude de services économiques, écologiques et culturels. Certains cantonnements du Département de la Nature et des Forêts (DNF) appliquent déjà ce type de sylviculture depuis plusieurs décennies, le cantonnement de Bullange en est un, principalement sur le triage de Buscholz. Après les tempêtes de 1990, des tentatives de plantation ont eu lieu dans les trouées laissées par les chablis. Rapidement, les agents forestiers ont remarqué que les plantations présentaient une vigueur moindre en comparaison des semis issus de régénération naturelle et que les plants souffraient de jaunissement. Combiné avec une diminution des budgets consacrés aux forêts domaniales, il a été décidé de ne plus réaliser de plantations d'épicéa sur ce triage (CLAESSENS *et al.*, 2017). En outre, depuis 2008, les coupes à blanc de plus de cinq hectares de résineux nécessitent la demande d'une dérogation.

La question de la régénération naturelle revient souvent sur le devant de la scène. En effet, en 2016, un questionnaire du DNF ainsi que du parlement wallon avait conduit à une étude sur l'impact économique de la mise en place de la gestion Pro Silva dans les forêts wallonnes. De nouveau, en février 2020, cette méthode de gestion est revenue dans les discussions de ce même parlement (P.W, 2020). Actuellement, il n'est pas possible

de réaliser un état des lieux réel des surfaces de forêt concernées par la sylviculture Pro Silva. Cependant, l'étude demandée par le parlement permet de fournir une estimation en posant quelques hypothèses. Tout d'abord, la première approche consiste à prendre en compte la surface des forêts domaniales au regard de la circulaire n° 2178. Cette première surface représente environ 23 000 hectares. Ensuite au niveau communal, la mise en place de cette méthode n'est pas obligatoire. Pour obtenir une estimation, des hypothèses considérant des critères administratifs et stationnels sont établies. Les peuplements qui auront le plus de chance d'être régénérés de manière naturelle sont ceux sur des stations où les investissements sont risqués, par exemple sur des sols à argile blanche. L'importance écologique des peuplements est aussi prise en compte. Ceux situés en zone Natura 2000 autorisant les résineux (UG10 : forêts non indigènes de liaison) présentent aussi plus de chance d'être régénérés naturellement. Toutes hypothèses combinées, environ 25 000 hectares de forêts résineuses ardennaises sont ainsi concernés par la sylviculture Pro Silva (CLAESSENS *et al.*, 2017).

1.4 Problématique

Près d'un tiers de la surface forestière wallonne est composée d'une seule essence exotique. Cependant, l'épicéa est la seule essence permettant de répondre à une demande qu'aucune autre essence indigène ne peut remplir. Ces peuplements sont ainsi traditionnellement exploités par mise à blanc et plantation. Pour être le mieux valorisé, l'arbre doit ainsi être le plus droit possible, avec la plus faible nodosité et le plus faible défilement et de qualité homogène (CLAESSENS *et al.*, 2017). Depuis plusieurs décennies, une sélection génétique des provenances d'épicéa a été réalisée pour augmenter la productivité et la qualité du bois issu des plantations. Des provenances recommandables ont ainsi été identifiées pour les améliorer. C'est pourquoi la Belgique ne dispose que de peu de recul concernant la production de bois d'épicéa issu de régénération naturelle. Avec la régénération naturelle, l'aspect génétique n'est plus autant maîtrisé et la crainte de perdre ce progrès subsiste. Les arbres sont alors souvent considérés comme étant de moins bonne qualité, présentant un bois moins homogène (PIISPANEN *et al.*, 2014) ou une nodosité plus importante (PRETZSCH et RAIS, 2016). Des déformations à la base du tronc et une couronne asymétrique seraient aussi, selon certains acteurs du domaine forestier, un problème récurrent. A ce stade, il ne semble pas y avoir de consensus clair entre l'effet du mode de régénération sur la qualité du bois obtenu de nombreuses années plus tard. D'autant plus que les différents travaux sylvicoles (dégagements, éclaircies, etc) peuvent améliorer la conformation moyenne d'un peuplement en favorisant les arbres bien

conformés.

2 Objectifs de l'étude

Deux objectifs sont poursuivis lors de cette étude.

Tout d'abord, elle a pour but de réaliser un état des lieux de la qualité du bois d'épicéa régénéré naturellement en comparaison avec celui issu de plantation en contactant la filière bois de différents pays. Différentes personnes du domaine forestier belge et français ont ainsi été contactées afin de réaliser des interviews.

Le second objectif de l'étude est d'établir un protocole de mesures non-destructives de la qualité du bois sur des arbres d'avenir issus de plantation et de régénération naturelle dans le contexte de la futaie équienne. Ce protocole contient notamment des mesures de densité du bois, du module d'élasticité, de la déformation à la base du tronc, du défilement, de la hauteur élaguée et de l'asymétrie de leur houppier.

3 Bref plan de l'étude

L'étude est organisée de la manière suivante : tout d'abord, une synthèse de la littérature est réalisée dans le but d'identifier les composants anatomiques du bois, de caractériser les différents éléments permettant d'obtenir un bois de qualité, d'analyser les facteurs influençant la qualité du bois et enfin de déterminer les différentes manières de mesurer cette qualité. Ensuite, la troisième partie présente un état des lieux de la qualité du bois d'épicéa issu de la régénération naturelle, réalisé à partir d'interviews d'acteurs de la filière bois belge, française. La quatrième partie présente le protocole de mesures non destructives de la qualité des bois sur pied. Elle comprend le plan d'échantillonnage, les mesures réalisées ainsi que l'encodage des données. Une méthode d'analyse statistique théorique est présentée. Elle comprend aussi une description et analyse de l'échantillonnage pilote. Une illustration de la méthode de modélisation est présentée ainsi qu'une estimation de l'effort d'échantillonnage. Enfin, la cinquième partie présente la discussion. Elle est composée d'une discussion théorique de la qualité du bois issu de régénération naturelle et d'une interprétation des résultats de l'échantillonnage pilote. Une section concernant les critiques et améliorations du protocole est aussi présentée ainsi que les perspectives pour des recherches ultérieures.

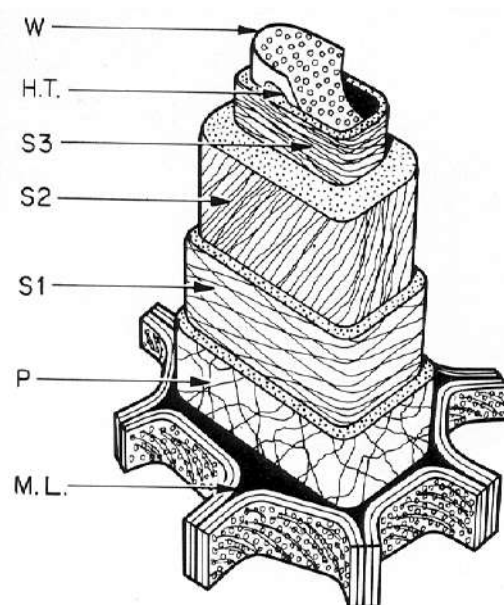


FIGURE 1 – Structure de la paroi cellulaire. Illustration issue de JOUREZ (2011)

Deuxième partie

Revue de la littérature

4 Anatomie du bois

4.1 Paroi cellulaire

La cellulose est un constituant important de la paroi cellulaire. En s'associant par des liaisons hydrogènes, une centaine de molécules de cellulose forme un faisceau micellaire aussi appelé fibrille élémentaire. Ces derniers s'associent aussi entre eux par vingtaines pour former une microfibrille de cellulose. Incrustées dans un mélange d'hémicellulose, de pectines, de protéines et de lignines, les microfibrilles servent de structure à la paroi cellulaire.

La paroi cellulaire est construite à partir de l'empilement de trois couches : la lamelle moyenne (M.L), la paroi primaire (P) et la paroi secondaire (Figure 1). La lamelle moyenne est constituée à 90% de lignine. Elle correspond au ciment liant deux parois primaires adjacentes. Elle n'est ainsi pas considérée comme une paroi.

La paroi primaire est constituée d'un assemblage de fibres de cellulose, d'hémicellulose et de chaînes peptidiques, induites de pectines. Elle présente un double rôle. Tout d'abord,

elle sert de squelette à la cellule et se doit donc d'être relativement rigide. Cependant, elle doit permettre la croissance et la division cellulaire. Sa rigidité est donc inférieure à celle de la paroi secondaire. Elle joue ainsi un rôle mineur dans la rigidité de la cellule, mais contribue à leur élasticité lors de leur croissance.

La paroi secondaire n'est formée que lorsque la croissance de la cellule est terminée. Issue de la différenciation des cellules sur la surface intérieure de la paroi primaire, son rôle est d'assurer la rigidité de la cellule. Les mêmes constituants que la paroi primaire sont ainsi retrouvés, avec, en plus, une incrustation de lignine ce qui lui confère une rigidité supérieure à la première paroi. Les microfibrilles sont aussi plus nombreuses et disposées en hélices sur différentes strates, le sens de rotation de l'hélice changeant entre chaque strate. La paroi secondaire est elle-même divisée en trois couches : S1, S2, S3.

La première couche (S1), directement au contact de la face interne de la paroi primaire, est très fine et présente un angle des microfibrilles allant de 40 à 45° par rapport à la verticale.

La couche S2 est, quant à elle, la plus épaisse des trois et présente un angle des microfibrilles plus faible, variant entre 10 et 30° par rapport à la verticale. Elle joue ainsi un rôle plus important d'un point de vue résistance et rigidité du bois (HERMAN *et al.*, 1999).

La dernière couche S3, la plus au centre de la cellule, présente les mêmes caractéristiques que la couche S1.

La paroi des cellules joue ainsi un rôle structurel pour l'arbre. Elle peut ainsi impacter différents constituants du bois comme sa densité (différence d'épaisseur de paroi entre le bois d'été et le bois de printemps) ainsi que sa résistance. En effet, un angle des microfibrilles trop important diminue la rigidité et augmente le retrait longitudinal une fois le bois séché (HERMAN *et al.*, 1999; PIISPANEN *et al.*, 2020).

4.2 Bois de printemps

Au début de la période de végétation, l'arbre produit du bois de printemps appelé également bois initial. Il est constitué de cellules de faible longueur, avec un lumen de grande section, ce qui implique des parois fines (Figure 2). L'angle des microfibrilles varie entre 25 et 30°. Il est facilement déformable. Ces caractéristiques lui procurent une densité ainsi qu'une résistance relativement faibles. Chez les résineux, la proportion de bois de printemps produite annuellement est très variable.

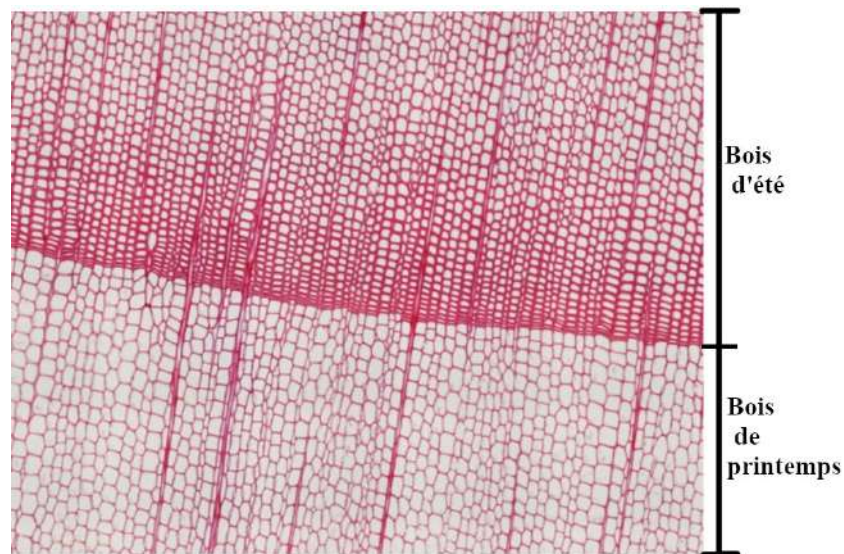


FIGURE 2 – Transition en coupe transversale entre du bois de printemps et du bois d’été chez l’épicéa commun.

4.3 Bois d’été

A la fin de la période de végétation, l’arbre produit du bois d’été appelé également bois final. Il est constitué de cellules de plus grande longueur, de section faible avec un lumen parfois bouché, impliquant des parois épaisses (Figure 2). L’angle des microfibrilles varie entre 10 à 15° par rapport à la verticale. Il est faiblement déformable. Ces caractéristiques lui procurent une densité et une résistance plus élevées que le bois de printemps. Chez les résineux, la proportion de bois d’été produit annuellement reste relativement constante.

4.4 Bois de réaction

Le bois de réaction est notamment produit dans les parties déformées ou courbées du tronc et des branches. Les causes principales des déformations sont le vent ainsi que le phototropisme. De par sa production, le bois de réaction permet à l’arbre de se redresser ou de se maintenir dans une position verticale. Cependant, ce type de bois possède des contraintes internes importantes qui auront un impact sur le produit fini (déformation au moment du séchage et retrait longitudinal jusqu’à dix fois supérieurs à la normale)(CLAIR *et al.*, 2014; PIISPANEN *et al.*, 2020). Les angiospermes et gymnospermes ont développé des stratégies différentes pour rétablir leur équilibre. Les premiers produisent du bois de tension dans les zones tendues et les seconds, du bois de compression dans les zones comprimées. Le bois de compression est formé par une forte lignification des trachéides

ce qui augmente sa densité. Les angles de microfibrilles sont aussi plus importants en variant entre 30 et 50° par rapport à la verticale. Il est aussi caractérisé par l'absence de la couche S3 de la paroi cellulaire ainsi qu'une couche S2 possédant des épaissements spiralés (BEUCHER *et al.*, 2008). Enfin, la longueur des fibres est diminuée de 15 à 25%. D'une manière générale, la résistance du bois de compression dépend fortement de l'orientation de la contrainte. Cette résistance est particulièrement réduite quand la contrainte est exercée perpendiculairement aux fibres. La relation est plus complexe parallèlement aux fibres. Alors que la résistance à la compression semble être supérieure pour le bois de compression par rapport au bois "normal", la résistance à la traction semble être inférieure. L'effet des angles de microfibrilles est donc complexe (BEUCHER *et al.*, 2008; GINDL, 2002; WIMMER et JOHANSSON, 2014).

4.5 Bois juvénile

Le bois juvénile est le bois produit pendant les premières années de vie du cambium, lorsque celui-ci n'a pas encore atteint sa maturité. Le cambium est le tissu cellulaire responsable de la croissance en diamètre de l'arbre. Chez les résineux, il constitue les cinq à vingt premiers cernes en partant de la moelle, peu importe l'âge de l'arbre. Il est constitué de fibres plus courtes, à lumen de section importante et donc de parois fines. Les angles de microfibrilles sont aussi plus importants. Sa densité est donc plus faible ainsi que sa résistance mécanique. Il contient aussi une proportion plus élevée de bois de compression.

Arrivé à maturité, le cambium produira le bois adulte. Ce dernier est caractérisé par des fibres plus longues, une densité plus élevée, et des angles de microfibrille moins prononcés (Figure 3).

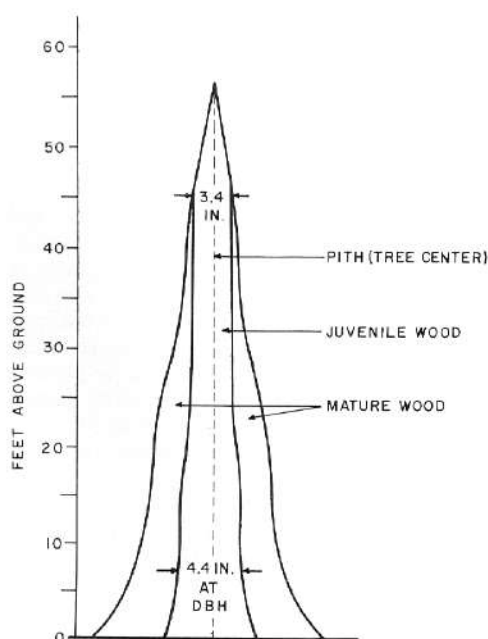


FIGURE 3 – Répartition le long du tronc du bois juvénile et du bois mature chez un résineux. Illustration issue de JOUREZ (2011)

5 Caractériser la qualité du bois d'épicéa

La notion de qualité dans le domaine du bois est assez complexe. En fonction de l'utilisation, la qualité peut être divisée en fonction de caractéristiques esthétiques ou structurelles.

Les caractéristiques esthétiques sont relativement subjectives mais font quand même l'objet d'un classement d'aspect. Les pièces de bois sont classées en cinq catégories, allant de 0 à 4. Les pièces ayant le moins de défauts sont classées en catégorie 0 et celles avec le plus de défauts, en catégorie 4. Ce classement prend en compte la localisation (sur la face ou sur la rive), l'abondance et le type de défaut. Les défauts considérés sont la nodosité, la présence de flache et les fentes. D'autres irrégularités sont aussi prises en compte comme la présence de moelle, l'entre-écorce, les poches de résine ainsi que les altérations fongiques et causées par des insectes.

Concernant les caractéristiques mécaniques, contrairement à des matériaux industriels (acier, béton, etc.) où la qualité du produit fait référence directement à son classement mécanique selon des normes, le classement du bois est un peu plus compliqué. En effet, les normes de résistance pour le bois garantissent un seuil de rupture et non des classes de

résistance. Ce qui veut dire qu'une poutre certifiée C16 va pouvoir résister au minimum à une contrainte de 16 MPa en flexion. Le fait d'utiliser un seuil de rupture peut ainsi entraîner un surdimensionnement des pièces. Une autre contrainte provient du fait que le bois est un matériau naturel. Il n'est alors pas possible de fournir des lots homogènes parfaitement calibrés. La qualité du bois est alors souvent envisagée par une absence de défauts (nœuds, bois de compression, etc). Cependant, il existe un critère général pour l'industrie : le bois doit être résistant. Cela se traduit en pratique par un bois dense, avec un module d'élasticité élevé et donc rigide (CNDB, 2000; CRPF, 2020; PIISPANEN *et al.*, 2014; PRETZSCH et RAIS, 2016).

5.1 Densité du bois

La densité du bois correspond à la quantité de matière ligneuse pour un volume donné (kg/m^3). Elle est variable en fonction des essences ainsi qu'au sein même d'une essence. En effet, à l'intérieur d'un cerne de croissance, les bois de printemps et d'été ne possèdent pas la même densité. Les conditions stationnelles et climatiques impactent ainsi sa densité. Une station moins favorable entraînera des cernes plus fins qu'une station favorable. Il en est de même pour la sylviculture. Une sylviculture dynamique, favorisant la vitesse de croissance, induira des cernes larges. La proportion de bois final étant constante annuellement, une augmentation de la largeur de cerne induit ainsi une diminution de la densité (PAMERLEAU-COUTURE *et al.*, 2019).

En plus d'une variation intra-annuelle, la densité varie tout au long de la vie de l'arbre. En effet, le bois juvénile est moins dense que le bois mature. Au sein même du bois juvénile, la densité diminue jusqu'à atteindre un minimum entre le 15-20^{ème} cerne. Ensuite, dans le bois mature, la densité augmente à nouveau pour devenir de plus en plus élevée avec le vieillissement de l'arbre (JYSKE *et al.*, 2008). De plus, la proportion de bois d'été a tendance à augmenter dans les cernes avec le temps. En effet, en vieillissant, le peuplement tend vers la fermeture du couvert ce qui réduit la dimension des couronnes (WIMMER et DOWNES, 2003). Cela a ainsi pour effet de réduire la vitesse de croissance en largeur des arbres.

5.2 Module d'élasticité

Le module d'élasticité est une mesure de la déformation d'un échantillon de bois soumis à une contrainte. Cette caractéristique définit la rigidité du matériau. La déformation est réversible tant qu'elle reste dans le domaine élastique. Plus la valeur du module d'élasticité est élevée, plus il faudra une force importante pour induire un faible déplacement.

Dans un premier temps, la relation entre la déformation observée et la contrainte est linéaire et réversible. L'objet est dans le domaine élastique. Une fois ce domaine dépassé, la relation déformation-contrainte n'est plus linéaire et l'objet ne pourra plus reprendre sa forme d'origine. Il est ainsi rentré dans le domaine plastique. Lorsque la contrainte devient trop grande par rapport à la résistance de l'objet, la rupture intervient.

Le module d'élasticité serait corrélé à la densité du bois (BÉRUBÉ DESCHÊNES, 2016; FISCHER *et al.*, 2015; GÜNTEKIN et AYDIN, 2016; LEGG et BRADLEY, 2016; LIU *et al.*, 2007). Cependant la relation entre densité et module d'élasticité est très discutée. Certaines études ont trouvé que des conditions de croissance peuvent affecter la densité sans avoir d'effet sur le module d'élasticité (FUNDOVA, 2011; GÜNTEKIN et AYDIN, 2016).

Comme cela a déjà été mentionné (section 4), les caractéristiques mécaniques des cellules ont un impact au-delà de l'échelle cellulaire. Les tissus, et donc in fine le bois n'étant qu'un assemblage de cellules, une variation de résistance au niveau cellulaire se traduit par une variation de résistance au niveau tissulaire. La rigidité des cellules étant en partie dépendant de l'angle des microfibrilles, le module d'élasticité du bois devrait être lui-même influencé par cet angle (EVANS, 2001; GHERARDI HEIN et TARCÍSIO LIMA, 2012). Cependant, cette supposition est intimement liée à la densité du bois. En effet, la densité correspondant à la quantité de matière pour un volume donné, cela peut se traduire par la quantité de cellules par unité de volume, particulièrement la quantité de parois cellulaires par unité de volume. La combinaison des deux éléments impacte ainsi le module d'élasticité. Le module d'élasticité serait donc d'autant plus élevé que le bois est dense et l'angle des microfibrilles faible (DONALDSON, 2008). Il est reconnu que le module d'élasticité du bois sec est supérieur à celui du bois humide.

5.3 Défilement

Le défilement, ou conicité caractérise la diminution du diamètre du tronc de l'arbre de bas en haut. A longueur et circonférence à la base équivalente, un fût avec un défilement important aura un volume plus faible et un rendement de sciage plus faible. Le défilement est fortement lié au développement de la cime ainsi qu'à la densité de peuplement. De manière générale, le défilement est plus important lorsque l'arbre est en croissance libre, avec une couronne de grande dimension et avec une hauteur élaguée courte. Le défilement peut ainsi également être révélateur de la densité du bois. En effet, plus la vitesse de croissance de l'arbre est grande, plus la densité est faible chez les résineux et plus le défilement sera prononcé (LINDSTRÖM, 1996b).

Tableau 1 – Critère de la nodosité pris lors du classement du bois. Tableau issu de CNDB (2000)

Zone étudiée	Classes		
	ST-I	ST-II	ST-III
Sur la face	diam. $\leq 1/6$ largeur et ≤ 30 mm	diam. $\leq 1/2$ largeur et ≤ 50 mm	diam. $\leq 3/4$ largeur et ≤ 100 mm
Sur la rive	diam. $\leq 1/3$ épais- seur et ≤ 15 mm	diam. $\leq 1/2$ épais- seur et ≤ 30 mm	diam. $\leq 1/2$ épais- seur et ≤ 30 mm

6 Facteur de variation de la qualité du bois d'épicéa

6.1 Nodosité

Les nœuds correspondent à une modification du bois causée par la présence d'une branche. Les nœuds sont une des premières causes de déclassement du bois d'épicéa (Tableau 1). La présence de nœuds diminue la résistance mécanique à cause de la perturbation de la pente du fil à leurs alentours. Leurs impacts dépendent de leur abondance, de leur taille et de leur nature (bois sain, mort ou pourri).

La taille des nœuds est influencée par deux facteurs ; la vitesse de croissance de l'arbre et le temps pendant lequel la branche est restée sur l'arbre, vivante ou morte (MOORE *et al.*, 2009; VESTØL et HØIBØ, 2001). Plus la branche reste vivante longtemps sur l'arbre et plus sa vitesse de croissance est élevée, plus le nœud sera gros. On distingue trois catégories de nœuds.

Premièrement, les nœuds sains sont formés lorsque la branche est coupée du tronc alors qu'elle est encore vivante. Ces nœuds impactent faiblement la qualité du bois. En effet, les nœuds sains sont parfaitement adhérents au bois. Leur principal défaut est donc essentiellement visuel.

Deuxièmement, si la branche est coupée lorsqu'elle est morte, le nœud sera mort. Son impact sur la qualité du bois est potentiellement plus important. En effet, il n'est alors pas parfaitement adhérent au bois l'entourant. Il n'y a pas de continuité entre le bois et le nœud. Il présente alors le risque de sauter lorsque le bois sera scié, impactant fortement la résistance du bois.

Troisièmement, lorsque la branche morte forme un chicot, le nœud formé peut être pourri, aussi appelé nœud vicieux. Un bourrelet de cicatrisation va progressivement recouvrir le chicot, mais une infiltration d'eau peut pénétrer dans le bois causant ainsi de la pourriture. L'impact de ces nœuds sur la qualité du bois est alors important et nuit fortement à sa transformation (PRÉVOT et PETIT, 2019; JOUREZ *et al.*, 2010). Sans

élagage artificiel, ces trois catégories de nœuds se retrouvent inévitablement dans le bois produit.

6.2 Vitesse de croissance

La vitesse de croissance est répercutée dans les variations de largeur de cerne annuel. Plus un arbre grandit vite, plus les cernes seront larges et inversement. Cela a un impact direct sur la densité. Chez les résineux, la proportion de bois d'été est constante (PAMERLEAU-COUTURE *et al.*, 2019). Une vitesse de croissance plus faible permet ainsi de diminuer la proportion de bois de printemps et donc d'augmenter la densité du bois (LINDSTRÖM, 1996a; MANSFIELD *et al.*, 2016). La nodosité est, elle aussi, impactée. Le développement des branches est corrélé à la croissance radiale de l'arbre. Plus l'arbre pousse rapidement, plus la dimension des branches augmente rapidement, et donc plus les nœuds seront de grande taille (VESTØL et HØIBØ, 2001). De plus, une grande vitesse de croissance est souvent synonyme de faible compétition entre arbres. Si l'élagage naturel est faible, les branches restent plus longtemps en vie sur le tronc, augmentant ainsi d'autant plus la nodosité.

L'angle de microfibrilles varie aussi avec la vitesse de croissance. Plus la croissance est soutenue, plus l'angle des microfibrilles est important et peut entraîner d'importantes déformations lors du séchage du bois. Une croissance plus lente permet de diminuer cet angle (HERMAN *et al.*, 1999). La qualité du bois est donc améliorée.

Enfin, pour des arbres d'un même diamètre, la proportion de bois juvénile est plus grande pour les arbres ayant eu une croissance rapide (MACDONALD et GARDINER, 2005; MACDONALD *et al.*, 2010). Ces arbres sont en effet plus jeunes et le bois juvénile, occupant les 5 à 20 premiers cernes, occupe un volume plus important, diminuant ainsi la qualité du bois.

La vitesse de croissance est ainsi un élément intégratif pouvant impacter différents facteurs de la qualité du bois. En fonction de l'intensité des interventions, le sylviculteur agit directement sur la qualité future des produits finaux.

6.3 Compression latérale

La compression latérale est directement liée à la distance entre les individus. Elle est le résultat de la compétition causée par la proximité des arbres entre eux. La compétition est la concurrence entre deux individus pour l'obtention d'une ressource limitée. Cette ressource peut être les nutriments du sol, l'accès à la lumière, la disponibilité en eau, etc. La densité de la plantation est un des éléments permettant de contrôler la compétition

entre les jeunes plants et donc la compression. Une distance plus faible entre individus augmente la compétition ce qui réduit la vitesse de croissance qui entraîne tous les bénéfices liés à une croissance plus lente, exposés précédemment (BÉRUBÉ-DESCHÊNES *et al.*, 2016). La compression latérale a un effet direct sur le développement du houppier. En effet, la couronne de l'arbre étant le siège des processus photosynthétiques, elle est régie par l'accès à la lumière. Elle est supposée avoir un impact sur la qualité du bois, notamment la densité (LINDSTRÖM, 1996b). La forme des couronnes a tendance à varier en fonction de l'importance de la compétition. Les branches ont une longueur plus grande lorsque la densité du peuplement est faible et inversement lorsque la compétition est forte. Le développement des branches est contrôlé par la disponibilité en lumière. Une pénétration élevée des rayons solaires dans le sous-étage maintient en vie plus longtemps des branches tout le long de l'arbre, augmentant ainsi la proportion de grosses branches (PRETZSCH et RAIS, 2016). La présence d'une trouée avoisinante peut entraîner la formation de cimes asymétriques (PRETZSCH et RAIS, 2016). Cette excentricité engendre une moelle excentrée, ce qui crée une différence dans la largeur de cerne. D'un côté les cernes seront plus larges et de l'autre plus fine. Plus de bois de compression est aussi observé. Ces variations sont renforcées si l'essence possède une grande plasticité morphologique, ce qui n'est pas le cas de l'épicéa. Ces variations sont donc potentiellement moins marquées par rapport à d'autres espèces plus plastiques morphologiquement comme le sapin blanc ou le pin sylvestre (PRETZSCH et RAIS, 2016).

De plus, une croissance importante de la couronne entraîne souvent une augmentation du défilement, lui-même, partiellement corrélée à la densité du bois (LINDSTRÖM, 1996a). Chez les plantes, l'hormone responsable de la croissance en hauteur de l'arbre et de la dominance apicale est l'auxine. Elle est synthétisée par les bourgeons terminaux et au niveau des entre-nœuds. Sa production a ainsi lieu tout le long du tronc quand l'arbre est en croissance libre. En effet, un grand écartement favorise le développement du houppier sur toute la longueur de l'arbre. Les arbres se développant dans ces conditions possèdent alors de grosses branches de bas en haut du tronc. Cela entraîne un défilement important, car le cambium est alors actif au même moment sur toute la hauteur de l'arbre. L'accroissement à la base et au sommet de l'arbre démarrent alors simultanément. La conicité de l'arbre est ainsi conservée, l'accroissement annuel est identique tout le long du tronc, la circonférence du haut du tronc reste donc inférieure à celle de la base. Quand la compression latérale est forte, les arbres allouent plus d'énergie à l'élongation de la tige par phototropisme. Cela se traduit par une diminution des dimensions de la couronne ainsi qu'une augmentation de la hauteur élaguée en comparaison d'une croissance libre (JOHANSSON, 1992; PRETZSCH et RAIS, 2016; WIKBERG, 2004). La synthèse de l'auxine

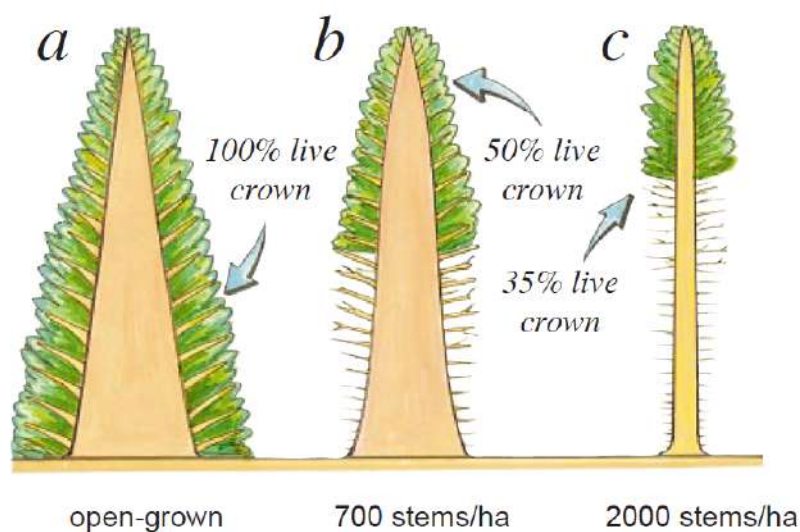


FIGURE 4 – Effet de la compression latérale sur le défilement du tronc. Illustration issue de JOZSA et MIDDLETON (1994)

commence ainsi dans la partie haute de l'arbre, constituée par le houppier, avant la partie basse. Il y a alors un délai entre l'activation du cambium dans les parties supérieures et inférieures de l'arbre, diminuant le défilement (Figure 4). Dans le cas des plus gros individus, ce décalage peut aller jusque six semaines. Chaque année, l'accroissement est ainsi plus important dans les parties proches du sommet qu'à la base de l'arbre. Les dimensions du haut du tronc rattrapent ainsi celles du bas, augmentant la cylindricité de l'arbre (JOZSA et MIDDLETON, 1994).

Généralement, lorsque la compétition est forte, l'élagage naturel est favorisé. Cela se traduit par une diminution de la taille des nœuds. En favorisant la croissance en hauteur, la hauteur de la base de la couronne aura tendance à monter et donc les branches basses resteront vivantes moins longtemps et seront moins grosses (HÉBERT *et al.*, 2003; KLANG et EKÖ, 1999; PRETZSCH et RAIS, 2016; ØVRUM, 2013). De plus, la croissance en est aussi ralentie, la proportion de bois juvénile sera donc plus faible et les cernes annuels seront plus fins, ce qui est bénéfique à la densité du bois (KRAJNC, 2019; PIISPANEN *et al.*, 2014; SEELING, 2001). A contrario, un espacement important entre les arbres favorise les dimensions des nœuds ainsi que l'espérance de vie des branches basses.

Il est possible de classer les arbres dans différentes catégories en fonction du statut social de leur couronne. Ils peuvent être dominants, codominants ou dominés. Cette classification a l'inconvénient d'être relativement subjective. La densité des arbres codominants et dominés a tendance à être supérieure à la densité des dominants, même si

la relation n'est pas toujours significative. La même relation est observée pour le module d'élasticité (AMARASEKARA, 2002; KRAJNC *et al.*, 2019; MANSFIELD *et al.*, 2016; WIMMER et DOWNES, 2003). Le statut social de l'arbre a aussi une influence sur la proportion de bois juvénile. Un arbre dominant ayant tendance à pousser plus vite qu'un dominé, sa proportion de bois juvénile sera plus importante (Figure 5).

La distance entre les plants est donc un facteur important. En fonction du choix du sylviculteur, la conduite du peuplement sera définie. Un large écartement permet un terme d'exploitabilité plus court, mais aux prix d'intervention plus fréquente ainsi qu'une diminution potentielle de la qualité du bois. Un écartement plus serré permet de se reposer plus facilement sur les processus naturels, mais au prix d'un terme d'exploitabilité plus lointain.

En pratique la distance initiale n'est pas le seul facteur affectant la compétition latérale. La réalisation de dégagements, de dépressages et d'éclaircies vise justement à contrôler la densité du peuplement et à favoriser les arbres présentant la meilleure conformation. Les dégagements visent à réduire la compétition causée par la végétation adventice. Ils permettent ainsi de faciliter la croissance des plants. Les dépressages, quant à eux, visent à réduire la densité de plants issus de semis afin de favoriser les individus ayant une meilleure vigueur. Enfin, les éclaircies ont pour objectif de favoriser la croissance des arbres restants en diminuant la densité d'un peuplement (JAAKKOLA *et al.*, 2005). On peut catégoriser les éclaircies en deux types : les éclaircies par le haut et les éclaircies par le bas.

Les éclaircies par le haut prélèvent préférentiellement les arbres dominants de plus grosses dimensions en faveur des codominants ou dominés. La densité moyenne des arbres du peuplement tend à augmenter. En effet, ce sont les arbres ayant eu une croissance plus lente et donc des cernes plus fins qui restent dans le peuplement (MACDONALD *et al.*, 2010; PIISPANEN *et al.*, 2014). Le module d'élasticité moyen augmente également, les arbres restants ont donc tendance à présenter du bois plus rigide (BÉRUBÉ-DESCHÊNES *et al.*, 2016).

Les éclaircies par le bas prélèvent à contrario préférentiellement les arbres de plus faibles dimensions. Cependant, cette pratique a tendance à diminuer la qualité du bois. En effet, en permettant une augmentation de la vitesse de croissance suite à l'éclaircie, la densité du bois diminue à cause d'une augmentation de la largeur des cernes. Ensuite, en permettant une croissance plus libre, le défilement est augmenté, la formation de branches de plus grosse dimension est favorisée et les arbres ont tendance à être plus trapus à cause de la diminution de l'élongation (BRÜCHERT *et al.*, 2000; KRAJNC, 2019; LAIHO *et al.*, 2011; MOORE *et al.*, 2009; PRETZSCH et RAIS, 2016). L'augmentation de la vitesse de

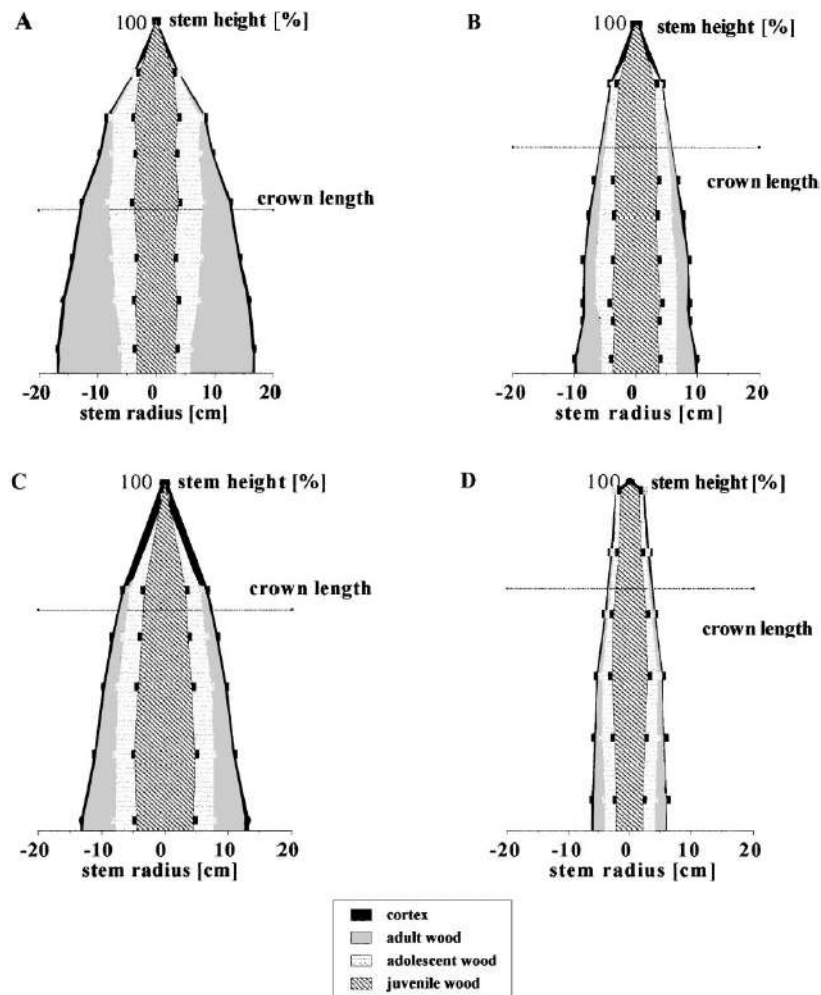


FIGURE 5 – Variation de la proportion de bois juvénile en fonction du statut social et de l'espacement entre arbre. En A, arbre dominant avec grand espacement, en B arbre dominé avec grand espacement, en C arbres dominant avec faible espacement et en D arbre dominé avec faible espacement. Illustration issue de BRÜCHERT *et al.* (2000)

croissance se reflète aussi au niveau des angles de microfibrilles. Après éclaircie, l'angle mesuré est plus important qu'avant l'éclaircie (HERMAN *et al.*, 1999). Ces éléments ont une influence sur le module d'élasticité, entre un peuplement éclairci et un peuplement non ou faiblement éclairci, ces derniers auront une rigidité plus importante (GAGNÉ *et al.*, 2012; WILSON *et al.*, 2020).

7 Mesurer la qualité du bois d'épicéa

La qualité du bois peut être mesurée de manière destructive ou non destructive. Une évaluation destructive signifie le plus souvent que l'intégrité physique de l'objet est impactée lors du test ou nécessite l'abattage de l'arbre. Au contraire, une étude non destructive a pour objectif de ne pas dégrader la qualité du produit final. Dans le cadre de ce travail, nous qualifierons l'objet en question comme l'arbre sur pied. Les mesures non-destructives correspondent à toutes les mesures qui sont effectuées sur les arbres vivants et qui ne nécessitent pas d'effectuer un prélèvement (ex. carotte). Afin d'être le plus exhaustif possible, certaines mesures destructives de référence sont brièvement présentées ci-dessous avant de présenter plus en détail celles sélectionnées pour ce travail.

7.1 Classement du bois

7.1.1 Classement visuel

Le classement visuel permet de classer le bois sans nécessiter obligatoirement l'utilisation d'une machine. En se basant sur des critères évaluant l'aspect du bois, le type de débit, les déformations, et autres défauts, différentes classes de résistance ont été mises au point. Les normes de classement visuel prennent notamment en compte les perturbations causées par les nœuds grâce à l'estimation des KAR (knot area ratio) total et KAR marginal. Le KAR total correspond à la proportion de la poutre occupée par la projection de la surface des nœuds alors que le KAR marginal n'évalue que la projection de la surface des nœuds sur le quart supérieur et inférieur de la portion de la poutre. Ces paramètres sont estimés sur une partie de la poutre où les nœuds dépassent une certaine dimension fixée. D'autres défauts sont aussi considérés, comme le contre-fil, les roulures, les entre-écorces, présence de moelle (CRPF, 2020; CNDB, 2000; HÉBERT, 2014; JOUREZ, 2011).

Des tests réalisés sur des planches évaluées visuellement puis soumises à une évaluation jusqu'à la rupture ont montré que, dans très peu de cas, la planche atteignait le point de rupture avant les valeurs correspondantes à sa classe de résistance. Elles ont même

tendance à le dépasser. Cela entraîne un surdimensionnement des pièces et un gaspillage de matière. Le classement visuel n'est donc pas parfait, mais à l'avantage d'être rapide et peu coûteux tout en garantissant un niveau de sécurité élevé.

7.1.2 Classement mécanique

Le classement mécanique permet de classer directement le bois en fonction de ses propriétés mécaniques. La méthode la plus courante utilise une machine mesurant directement la rigidité des planches sur la ligne de découpe. Une contrainte est continuellement exercée entre deux points afin de créer un phénomène de flexion. La flèche est alors mesurée et permet de disposer les pièces dans différentes catégories. Cette méthode de classement à l'avantage d'être rapide et relativement précise. Cependant, la vitesse de test doit correspondre au minimum à la vitesse de débit de la ligne de production afin de ne pas créer de goulot d'étranglement. D'autres techniques sont en développement comme l'utilisation de la vitesse de propagation d'une onde dans le bois ou encore la fréquence de vibration de la planche suite à un choc (CRPF, 2020; CNDB, 2000; HÉBERT, 2014; JOUREZ, 2011).

7.2 Mesures destructives

7.2.1 SilviScan

Le SilviScan est un instrument combinant trois outils automatisés permettant l'étude des propriétés du bois (ex. sa densité) et de ses fibres via l'analyse d'un échantillon. Il a été développé par des chercheurs du CSIRO en Australie. Il est composé d'un scanner cellulaire optique permettant d'analyser les trachéides, la dimension des fibres, les vaisseaux, etc. Ensuite, un densitomètre à rayon X permet de créer un profil de densité dans le bois, l'inclinaison des fibres ainsi que les limites de cernes. Enfin, un diffractomètre à rayon X étudie l'angle des microfibrilles, et autres caractéristiques des trachéides et fibres.

7.2.2 Spectroscopie par infrarouge proche

La spectroscopie par infrarouge proche est une technique se basant sur l'absorption du rayonnement par les différents composés du bois. Cette technique est utilisée pour établir des modèles de prédiction de la qualité du bois pour la production de pâte à papier. Le domaine de l'infrarouge est compris entre des longueurs d'onde allant de 700

et 2500 nm. Le résultat obtenu est un spectre d'absorption unique et caractéristique pour chaque échantillon. Il varie en fonction des différents composés contenus dans le bois.

Très utilisée pour la sélection génétique, cette technique est la seule permettant de traiter une grande quantité d'échantillons. Dans un premier temps, elle a permis d'analyser la génétique et l'interaction génotype-environnement pour la production de pâte à papier. Ensuite, des études se sont penchées sur l'influence de la génétique sur la teneur en lignine pour enfin être capable d'analyser la densité du bois. La majorité des études ne concernent cependant que les feuillus et que très peu les résineux. Tout comme la densité, les angles de microfibrilles et le module d'élasticité peuvent être estimés. Cette méthode est aussi utilisée pour établir la variation intra-arbre des composés chimiques extractibles, du rendement de fibre pour la pâte à papier et du contenu en cellulose, lignine et sucre.

7.2.3 DiscBot

Le DiscBot est un outil qui permet à lui seul d'obtenir des informations concernant les variations de propriétés mécaniques, chimiques et physiques d'un arbre. Il est développé par l'Institut de recherche forestière néo-Zélandais. En combinant quatre outils, DiscBot est une méthode permettant une estimation de différentes propriétés au sein d'un arbre. Elle associe la spectroscopie par infrarouge proche, un densitomètre, une mesure acoustique et une analyse de l'angle des vaisseaux. L'analyse est réalisée sur un disque de bois et permet de prédire les propriétés du produit final.

7.2.4 Tomographie

La tomographie est une technique permettant d'analyser la qualité du bois. Les modèles les plus précis permettent de mesurer la densité du bois à l'échelle des cernes de croissance ainsi que d'étudier l'anatomie du bois au niveau cellulaire. Il est aussi possible de modéliser la disposition et la localisation des nœuds, la position de la moelle, le gradient d'humidité au sein d'une grume. Cette méthode peut donc aussi bien être utilisée en laboratoire qu'en scierie.

En mesurant l'absorption des rayons X au travers d'un objet, cette technique a permis de résoudre un des problèmes principaux. En effet, la radiographie ne permettait pas de conserver la profondeur dans une image. Elle ne donne qu'une représentation en deux dimensions d'un objet en 3 D. L'évolution de la tomodensitométrie permet maintenant d'étudier la variation du bois à l'intérieur même des cernes dans le cas de la microtomographie. Dans un premier temps, des modèles utilisables sur le terrain ont été testés.



FIGURE 6 – Photo d'un pilodyn 6J forest

Étant donné la difficulté de mise en place, il est maintenant préférable d'analyser les échantillons en laboratoire.

7.3 Mesures non destructives

7.3.1 Pilodyn

La densité est un élément important dans l'estimation de la qualité du bois. Sa mesure est cependant habituellement longue et laborieuse. Elle nécessite le prélèvement d'un échantillon puis la mesure du bois sec en laboratoire. Une autre méthode est l'utilisation de rayon X. Aucune de ces deux méthodes n'est possible sur le terrain. Initialement développé en Suisse pour étudier la pourriture dans des poteaux en bois, le pilodyn a très vite été utilisé pour estimer la densité des arbres sur pied (Figure 6). Il permet des estimations rapides, peu coûteuses et est largement utilisé dans les programmes d'amélioration génétique. Cet outil portatif à l'avantage de permettre des mesures en se basant sur la profondeur de pénétration d'une aiguille dans le bois avec une force donnée. Trois tailles différentes d'aiguilles permettent de s'adapter aux différentes densités. L'inconvénient est que l'information n'est obtenue que pour les dernières couches ligneuses et nécessite de retirer une petite surface d'écorce (CHEN *et al.*, 2015; GAO *et al.*, 2012; GREAVES *et al.*, 1996; LAUNAY *et al.*, 2000).

L'humidité et la température n'ont pas d'influence sur la mesure. En effet, dès l'instant que l'humidité du bois est supérieure au point de saturation de la fibre, une variation du contenu en eau n'affectera pas la mesure. De même, les mesures du pilodyn ne commencent à être impactées que lorsque la température descend en dessous de 0 °C.

7.3.2 Méthodes acoustiques

La mesure de la qualité du bois à l'aide de l'utilisation de la vitesse de propagation d'une onde est régulièrement étudiée. Différents équipements existent et permettent d'étudier la qualité du bois sous différentes formes ; sur du bois transformé, des grumes ou sur des arbres sur pied. Ces mesures permettent d'estimer le module d'élasticité (MOE_{dyn}) d'un objet en se basant sur la vitesse de propagation d'une onde (AV) et de la densité du bois (ρ) grâce à l'équation 1.

$$MOE_{dyn} = \rho AV^2 \quad (1)$$

Différentes techniques ont été développées pour mesurer la vitesse de propagation d'une onde sur une grume ou sur un arbre sur pied. Une première méthode consiste à mesurer la résonance. Une seconde méthode consiste à mesurer le temps de propagation d'une onde entre deux sondes, une émettrice et une réceptrice (Figure 7). L'onde est générée par l'impact d'un marteau sur l'émetteur (SCHIMLECK *et al.*, 2019; RUDNICKI *et al.*, 2017; VEGA *et al.*, 2012). La méthode par résonance est connue pour être plus précise. En effet, elle permet de prendre en compte la grume en entier, alors que la méthode par temps de vol ne prend en compte que le bois sur 3 à 4 cm de profondeur sur une distance d'environ un mètre entre les deux sondes (GÜNTEKIN et AYDIN, 2016; PU, 2017; SCHIMLECK *et al.*, 2019; WANG, 2013). Une bonne corrélation existe entre les deux techniques. Cependant la mesure sur pied est toujours environ 10% supérieure à son équivalent sur une grume ou une planche (WANG, 2013).

De plus, la variation de temps de vol n'est pas forcément reliée à une variation de densité. D'autres éléments comme les nœuds, les angles de microfibrilles font varier la vitesse de propagation de l'onde (LINDSTRÖM *et al.*, 2009).

Le temps de propagation de l'onde dans le bois est aussi influencé par différents facteurs environnementaux extérieurs. En effet, il varie avec le taux d'humidité du bois et donc de la saison pendant laquelle les mesures sont faites. La vitesse de propagation a tendance à diminuer avec une augmentation de l'humidité. La température a aussi une influence. Plus la température est élevée, plus la vitesse diminue. Une perturbation importante autour du point de congélation est observée (CARTER *et al.*, 2005; LEGG et BRADLEY, 2016).

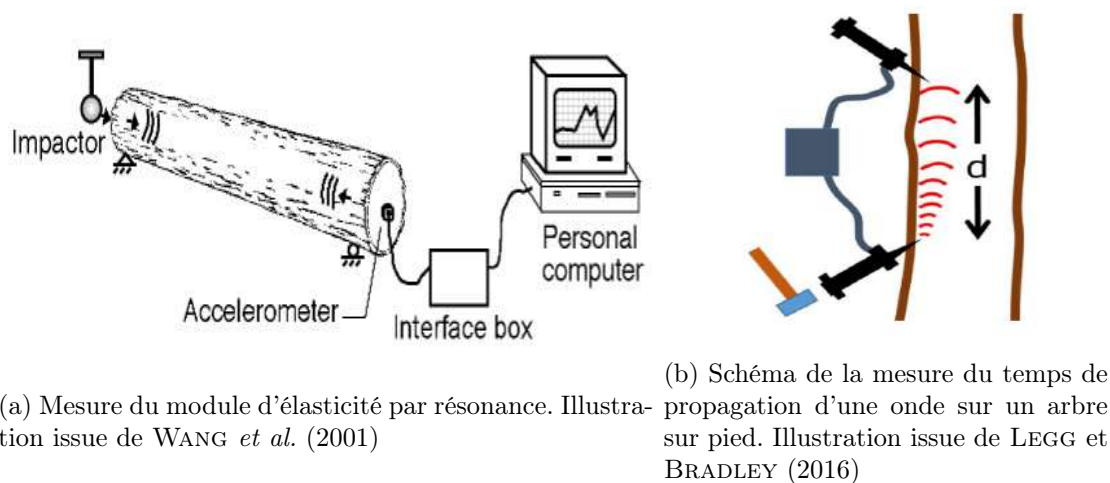


FIGURE 7 – Techniques de mesure de la vitesse de propagation d'une onde dans le bois.

7.3.3 Résistographe

Tout comme le pilodyn, le résistographe est un outil permettant de mesurer la densité du bois. Historiquement développées pour identifier la dégradation des arbres et poteaux, les versions plus évoluées permettent de capter les variations de densité au sein même de l'arbre (IÇEL et GÜLER, 2016).

Depuis quelques années, le résistographe s'est répandu dans les programmes d'amélioration de génétique de la densité du bois en Nouvelle-Zélande et en Australie. En forant une mèche de 3 mm de diamètre dans le bois avec une vitesse de rotation et une vitesse de pénétration fixée, l'outil est capable de fournir la variation de densité du bois tous les 0,1 mm en mesurant la résistance à la rotation. Différentes longueurs de mèche existent, allant de 20 à 40 cm afin de pouvoir s'adapter aux dimensions des arbres ou poteaux (Figure 8).



FIGURE 8 – Photo d'un résistographe. Illustration issue de GULLER *et al.* (2012)

7.3.4 Rigidimètre

Le rigidimètre est un outil permettant de mesurer le module d'élasticité directement sur pied. A l'aide d'un système de poulies et un vérin hydraulique ou un tirefort, il permet de mesurer la courbure de l'arbre pour une force donnée (Figure 9). Il présente cependant l'inconvénient d'être encombrant à transporter pesant aux alentours de 15kg.

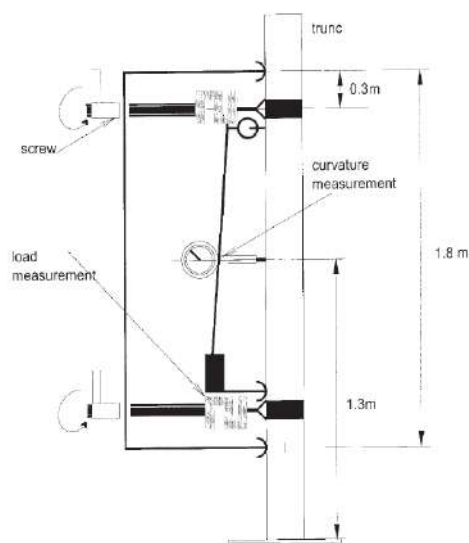


FIGURE 9 – Schéma d'installation d'un rigidimètre. Illustration issue de SCHIMLECK *et al.* (2019)

Troisième partie

Avis des experts

Afin de recueillir l'opinion d'acteurs proche du monde forestier, différentes interviews ont été réalisées. La première personne interrogée est Christine Sanchez de l'ASBL Forêt.Nature, formatrice des agents du DNF concernant la sylviculture Prosilva. Ensuite, un entretien a eu lieu avec Marc-Etienne Wilhelm, animateur sylvicole à l'ONF en Alsace. Enfin, Francis Colin, directeur de recherche au centre INRAE Grand Est- Nancy, a été interrogé. Les réponses obtenues sont issues principalement de leur ressenti et avis, elles ne font pas suite à des études.

Tout d'abord, la qualité du bois sera impactée par l'ensemble des interventions sylvicoles appliquées à un peuplement durant toute la durée de sa vie. En fonction de ses actions et décisions de l'agent forestier, les arbres se comporteront différemment. Il a une influence importante dès le départ en fonction du choix de la régénération. Les caractéristiques de la plantation (densité de plants, travaux sylvicoles, etc.) ainsi que le choix des provenances conditionnent déjà la qualité finale du bois. Concernant la régénération, ces différentes caractéristiques sont difficilement contrôlables. Cependant, il ressort des discussions que la densité de semis est généralement beaucoup plus importante que lors d'une plantation. En suivant cette logique, la densité de semis sera plus élevée sous un peuplement équienne que sous une futaie jardinée. En effet, dans une futaie équienne, la régénération aura lieu sur une plus grande surface et simultanément contrairement à la futaie jardinée qui fournira principalement des cônes de régénération. L'impact du forestier sera aussi marqué au moment du choix des arbres d'avenir ou d'élite. Certains sélectionnent surtout sur base de la vigueur, les arbres dominants seront ainsi favorisés bien qu'ils risquent de présenter plus de grosses branches, un défilement plus important ainsi qu'une rectitude moindre. D'autres sélectionnent en fonction de la qualité de l'arbre, les dominants auront donc tendance à être retirés lors des éclaircies au bénéfice des arbres ayant poussé plus lentement.

Ensuite, concernant la qualité du bois, l'influence du type de régénération sur le défilement la longueur et la rectitude de la grume a été discutée. L'influence sur la nodosité, abondance et taille des nœuds a aussi été abordée. D'une manière générale, la densité du peuplement favorise la croissance en hauteur à la croissance en largeur. Le défilement est donc supposé être moindre en régénération naturelle qu'en plantation. Cette densité favorise aussi la diminution de la taille des branches et leur mortalité à cause du manque de lumière dans les sous-étages. Une diminution de la nodosité est

donc attendue en régénération naturelle. La rectitude est aussi supposée être améliorée grâce à la priorisation de la croissance en hauteur. Il semblerait aussi que la régénération naturelle soit plus protégée face aux gelées que les plantations grâce à la densité de semis. Les déformations de l'apex des tiges à cause du gel sembleraient être plus fréquentes en plantation.

Cependant, des nuances sont à apporter concernant la régénération naturelle. Dans le cas des régénérations sous couvert, le temps pendant lequel la régénération est laissée en sous-étage impacte la qualité. Dans un premier temps, le nombre et la taille des branches est réduit. Or l'épicéa est une essence tolérante à l'ombrage et est capable de former des houppiers avec de longues branches horizontales lorsque sa croissance en hauteur est limitée par le manque de lumière. Ensuite, dans les cônes de régénération, il y a toujours la présence d'arbres ayant une vigueur supérieure plus importante que les autres. Ces arbres sont aussi appelés des "loups". Ces derniers présenteront une qualité moindre. En effet, ils sont souvent développés dans un environnement de compétition faible (croissance libre) et ont ainsi développé un tronc de qualité moindre avec des noeuds de sections larges et un défilement important. De plus, l'agent forestier peut à nouveau impacter la qualité du bois. En effet, les interventions sylvicoles peuvent avoir un impact beaucoup plus important que l'origine de la régénération. Beaucoup de régénérations naturelles sont traitées en suivant les scénarios habituels de dépressage, mise à distance puis éclaircie systématique. Les arbres se développent donc dans des conditions similaires à une plantation. Ensuite, les atouts de la régénération naturelle concernant la qualité du bois sont liés à la densité du peuplement. Or lors de l'ouverture du peuplement, les arbres vont se retrouver dans des conditions similaires aux peuplements issus de plantation. On s'attend alors à une augmentation du défilement et de la nodosité après l'ouverture du peuplement.

Puis certains scieurs belges avancent que le bois issu de régénération naturelle présente des déformations à la base du tronc plus importantes que le bois issu de plantation. Ce point a ainsi été abordé afin d'obtenir l'avis des différentes personnes interrogées. D'un avis général, ces déformations ne devraient pas être favorisées par un type de régénération ou l'autre et ne semblent pas spécialement être fréquemment observées sur le terrain. En effet, différentes hypothèses pourraient expliquer l'apparition de ces déformations. Tout d'abord, elles pourraient provenir d'aléas climatiques comme des chutes de neige sur des peuplements en pente ou alors des chutes de neige lourde. Une seconde hypothèse qui ne concerne que la régénération naturelle est que ces déformations proviendraient de dégâts d'abattage quand les arbres matures sont abattus dans les semis. Elles pourraient, en théorie, aussi provenir d'une compétition avec des adventices comme cela peut être le

cas avec des chênes poussant au travers de la ronce. Cependant, cette dernière hypothèse semble peu probable dans le cas de l'épicéa en Ardennes.

Enfin, un point faisant relativement l'unanimité est la proportion de bois juvénile. L'objectif est d'obtenir une proportion la plus fine possible. En provoquant une phase de compression et qualification plus intense que dans une plantation, la régénération naturelle permet de maintenir une croissance en largeur plus faible pendant les 10-15 premières années.

Malgré cela, l'impression que le bois d'épicéa issu de régénération naturelle est de moins bonne qualité que celui issu de plantation revient régulièrement au travers des agents forestiers. Une hypothèse avancée par les agents est que le système racinaire se développe moins bien que lors d'une plantation, engendrant ainsi une mortalité plus importante. Une plus grande proportion d'arbres infectés par la pourriture rouge (*Heterobasidion parviporum*) serait aussi observée selon certains agents. La pourriture rouge (aussi appelée le fomes de l'épicéa) est un champignon fréquemment retrouvé dans les peuplements d'épicéa. Il est responsable du coeur rouge de l'épicéa entraînant une forte dépréciation du bois. Le champignon se propage de deux manières. Tout d'abord à longue distance grâce aux basidiospores et à courte distance grâce aux contacts racinaires. La contamination d'un peuplement sain se fait lorsqu'une souche fraîchement coupée est infectée par les spores du fomes. L'infection se poursuit ensuite de proche en proche. Les spores peuvent rester en vie jusqu'à plus de 60 ans dans les souches (PIRI, 1996). Elles jouent ainsi un double rôle, celui de source d'inoculum et de foyer de contamination. Les blessures racinaires lors des travaux sylvicoles pourraient aussi être un point d'entrée secondaire. Ces réservoirs d'inoculum ont ainsi un impact sur le peuplement suivant. En comparaison avec le peuplement mature précédent, la présence du fomes est jusqu'à deux fois plus importantes dans un nouveau peuplement d'épicéa lorsque l'essence principale n'a pas changée. Cependant, bien que le nombre d'arbres infecté soit supérieur, la proportion d'individus infectés reste stable. En effet, le nouveau peuplement n'est pas encore mature. Il contient ainsi plus d'individus que le peuplement mature. Le ratio arbres infectés/ arbres sains reste donc stable (PIRI, 1996). Cependant, bien que certaines études montrent que la régénération naturelle peut dans certains cas être moins impactée par la pourriture rouge, la régénération sous-couvert semble être particulièrement atteinte lorsque l'étage supérieur est infecté (PIRI et KORHONEN, 2001; PIRI, 2003). C'est pourquoi il est généralement conseillé d'attendre une année entre la mise à blanc et la replantation pour réduire les problèmes liés au fomes de l'épicéa.

En conclusion, selon les différentes personnes interrogées, la qualité du bois d'épicéa issu de régénération naturelle ne devrait pas être différente de celle du bois issu de

plantation. En effet, sans interventions du sylviculteur, les conditions de croissance en régénération naturelle semblent contribuer à une éventuelle amélioration de la qualité du bois. De plus, la qualité du bois semble être principalement impactée par la sylviculture pratiquée que par le type de régénération.

Cependant, une précision doit être apportée. Dans l'ensemble, les personnes interrogées sont favorables à la régénération naturelle, voir travail en sa faveur. Leurs avis peuvent ainsi être orientés et fournir une image idéalisée de la réalité. Les opinions de personnes plus neutres voir opposées à la régénération naturelle ainsi que d'exploitants et scieurs n'auraient pu être que bénéfique.

Quatrième partie

Élaboration et test du protocole de terrain

L'objectif est de réaliser un protocole de mesure de la qualité du bois sur pied afin de pouvoir comparer les deux types de régénérations. Cette partie reprend ainsi la méthodologie du choix des sites d'études ainsi que des différentes mesures. Une explication du système d'encodage est aussi reprise. Elle comprend aussi une analyse statistique théorique. Enfin, une analyse de l'échantillonnage pilote est expliquée. Elle reprend l'analyse descriptive, l'illustration de la méthode de modélisation et une estimation de l'effort d'échantillonnage.

8 Sélection des sites d'études

La sélection des sites d'étude a été réalisée sur base d'un questionnaire envoyé à 21 cantonnements du DNF en Ardennes. Ce questionnaire permet d'identifier les cantonnements possédant des parcelles de régénération naturelle d'épicéa d'au moins 0.1 ha. Puis, une estimation du nombre de parcelles possédant des arbres appartenant à cinq classes de circonférence (10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm, plus de 80 cm) a été établie. Les agents du DNF avaient le choix entre sept classes d'abondance de parcelles allant de 0 à plus de 25 (0 parcelle, 1-5 parcelle, 6-10 parcelles, 11-15 parcelles, 16-20 parcelles, 21-25 parcelles et plus de 25 parcelles). Les réponses obtenues ont permis d'établir que 71% des cantonnements du DNF des Ardennes possèdent des parcelles avec des épicéas régénérés naturellement (Tableau 2).

Ensuite, les stades de développement avancés ont été privilégiés afin de réduire la proportion de bois juvénile et d'échantillonner des arbres proches du terme d'exploitabilité. En analysant les données du questionnaire et 46 parcelles supérieures à 0.1 ha semblant a priori être un nombre suffisant pour effectuer les analyses statistiques, le seuil minimum de circonférence a été fixé à 60 centimètres dans le protocole (Tableau 10).

Ensuite, une sélection aléatoire des placettes de régénération naturelle présentant les critères voulus est réalisée. Pour chaque placette de régénération naturelle sélectionnée, une placette dans une plantation ayant des conditions écologiques les plus semblables et le plus proche possible est également échantillonnée.

Tableau 2 – Tableau de la présence de régénération naturelle d'épicéa dans les différents cantonnements ayant répondu au questionnaire

Cantonement	Présence de régénération naturelle d'épicéa
Bouillon	Oui
Bullange	
Elsenborn	
Libin	
Marche-en-Famenne	
Nassogne	
Saint-Hubert	
Verviers	
Vielsalm	
Arlon	
Liège	
Malmedy	
Neufchâteau	
Réponses positives	71%
Réponses négatives	29%

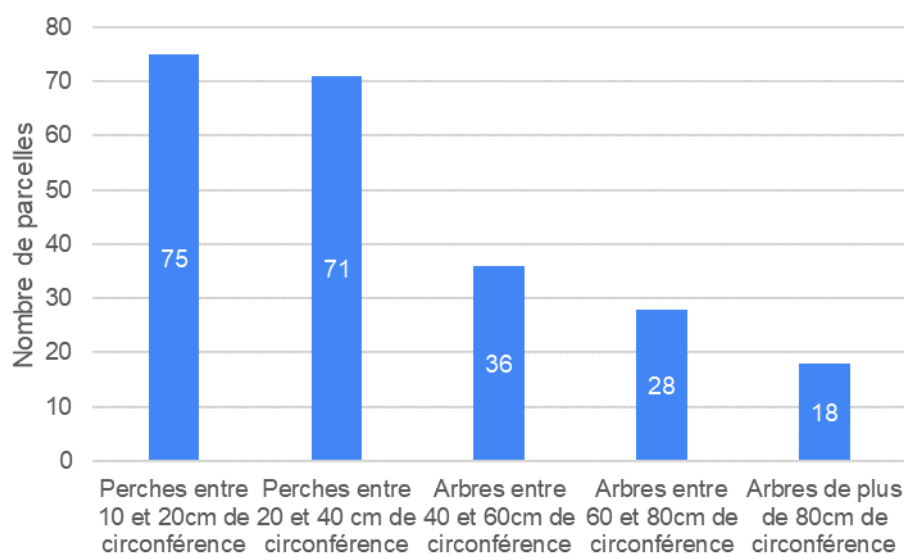


FIGURE 10 – Répartition du nombre de parcelles présentant de la régénération naturelle par classe de circonférence. Pour obtenir le nombre de parcelles par classe de circonférence, le point médian de chaque classe d'abondance a été multiplié par le nombre de fois qu'une classe de circonférence a été sélectionnée. Par exemple, si deux agents ont inscrit qu'ils avaient 1 à 5 parcelles de perches entre 10 et 20 cm de circonférence, le nombre de parcelles considéré est 6 (le point médian de la classe d'abondance 1 à 5 étant 3)

9 Acquisition des données

9.1 Réalisation de la placette dendrométrique

Les placettes sont installées dans une zone présentant des conditions homogènes et caractéristiques du peuplement. Les bords de chemin ou de trouées sont ainsi évités autant que possible. Chaque placette est définie par un cercle de 18 mètres de rayon. Ensuite, cinq arbres d'avenir (AA) sont identifiés en fonction de leur conformation (soit ± 50 AA/ha). Les différentes mesures seront réalisées seulement sur ces arbres. Ils doivent donc posséder la meilleure rectitude, le moins de dégât de gibier, ainsi qu'un statut social de dominant. Les arbres sélectionnés doivent aussi être suffisamment espacés pour ne pas être retirés lors des éclaircies.

Au centre de chaque placette, la surface terrière est relevée avec un relascope à chaîne. La valeur obtenue permet d'estimer l'importance de la compétition. Si l'âge du peuplement n'est pas connu et en accord avec le propriétaire, un forage à la tarière de Pressler est réalisé dans un arbre de moins bonne conformation. Une estimation de l'âge sera ainsi obtenue.

9.2 Mesure de la circonférence

La mesure de la circonférence est réalisée au millimètre près à une hauteur de 1,30 m avec un mètre ruban. Les arbres n'étant pas toujours parfaitement cylindriques, le mètre ruban permet, en une mesure, d'obtenir la circonférence exacte contrairement au compas forestier.

Dans le cas d'arbres fourchus, seules les tiges supérieures au seuil minimum de circonférence sont mesurées. La moyenne des circonférences est alors encodée. Ce cas s'avère cependant peu probable lors de la mesure d'arbre d'avenir.

En cas de pente, la hauteur de mesure est celle mesurée en amont de l'arbre.

9.3 Mesure de la densité du bois

Les mesures de densité sont réalisées avec un Pilodyn 6J Forest (PROCEQ, Zurich, Switzerland) équipé d'une aiguille de deux millimètres de diamètre. Sur chaque arbre, deux mesures sont réalisées à une hauteur de 1,30 m en visant le centre de l'arbre (Figure 11a). Pour garder une cohérence, les mesures sont réalisées perpendiculairement aux vents dominants (sud-ouest), de chaque côté du tronc. L'épaisseur de l'écorce pouvant varier en fonction des arbres, elle doit être, au préalable, retirée sur quelques centimètres carrés

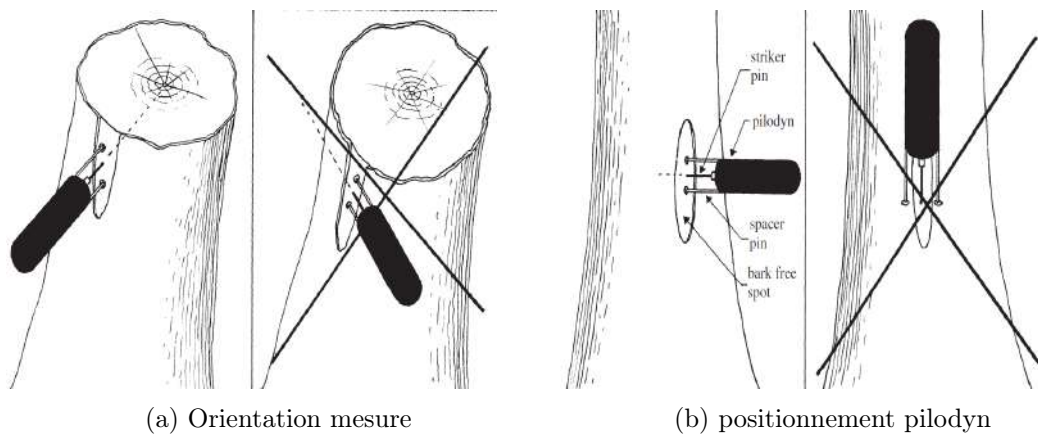


FIGURE 11 – Mesure au pilodyn. Illustration issue de HANSEN (2000)

pour permettre une meilleure comparaison entre les différents arbres (Figure 12). La zone sans écorce doit juste être suffisamment grande que pour permettre au bras d'écartement ("spacer pin") du pilodyn d'être au contact du bois sans écorce (Figure 11b).



FIGURE 12 – Blessure laissée par la mesure de la densité du bois

Dans le cas d'arbres fourchus, seules les tiges supérieures au seuil minimum de circonférence sont mesurées. La moyenne des profondeurs de pénétration est alors encodée. Ce cas s'avère cependant peu probable lors de la mesure d'arbre d'avenir.

Un mastic cicatrisant est appliqué aux endroits où l'écorce a été retirée afin de dimi-

nuer les risques de pourriture.

9.4 Mesure acoustique

La mesure de la vitesse de propagation d'une onde dans le bois est réalisée avec un TreeSonic timer de chez Fakopp (Fakopp Bt, Ágfalva, Hongrie). Les sondes sont introduites dans le bois avec un angle de 45° jusqu'à ce qu'elles tiennent d'elles-mêmes. Un mètre doit séparer les deux sondes, 50 centimètres de part et d'autre du niveau de mesure de la circonférence (Figure 13). La sonde supérieure est inclinée vers le bas et l'inférieure vers le haut. La mesure est réalisée en tapant avec un marteau sur la sonde inférieure. Cette dernière est répétée 3 fois et la différence entre les mesures ne doit pas dépasser 1,5 µs. Pour assurer une cohérence entre la mesure des différents arbres, les sondes sont toujours placées du côté nord de l'arbre. Les blessures causées par les sondes sont quant à elles relativement minimales et se traduisent par un trou d'un diamètre de seulement quelques millimètres (Figure 14).

En cas de pente, les mesures sont réalisées du côté amont de l'arbre.

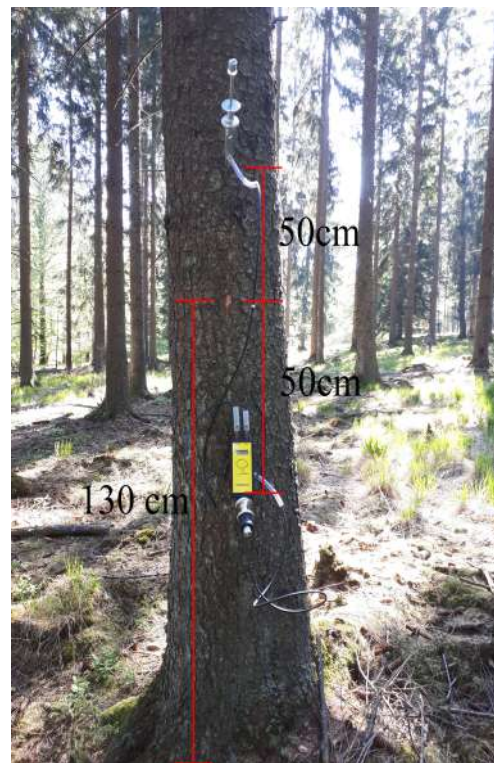
Dans le cas d'arbres fourchus, seules les tiges supérieures au seuil minimum de circonférence sont mesurées. Les mesures sont alors réalisées du côté opposé aux tiges subsidiaires. La moyenne des temps de propagation est alors encodée. Ce cas s'avère cependant peu probable lors de la mesure d'arbre d'avenir.

9.5 Calcul du module d'élasticité

Le module d'élasticité est calculé en combinant les informations obtenues par les mesures de densité (mesurée avec le pylondin, section 9.3) et les informations obtenues par les mesures de la vitesse de propagation de l'onde dans le bois. La formule 2 est utilisée pour son calcul.

$$MOE = \frac{10000}{PFD} AV^2 \quad (2)$$

Où MOE est le module d'élasticité en GPa, AV correspond à la vitesse de propagation en km/s et PFD , la profondeur de pénétration de l'aiguille dans le bois en millimètre (CHEN *et al.*, 2015; DESPONTS *et al.*, 2017). La densité étant inversement proportionnelle à la profondeur de pénétration, cet élément se retrouve au dénominateur de cette formule. Un facteur multiplicatif de 10 000 est ajouté afin que la profondeur de pénétration et la densité soient converties dans le même ordre de grandeur.



(a) Description Fakopp TreeSonic Timer.

(b) Installation du Fakopp TreeSonic Timer.

FIGURE 13 – Mise en place du Fakopp TreeSonic timer



FIGURE 14 – Blessure causée par la mise en place du Fakopp TreeSonic timer

9.6 Excentricité de la couronne

L'excentricité de la couronne est estimée par la mesure de la longueur des branches. Quatre points caractéristiques sont identifiés en suivant deux axes perpendiculaires passant par le centre de l'arbre. Le premier point correspond à la plus longue branche du houppier, le second point est ainsi situé à son opposé. Les deux derniers sont situés de part et d'autre de l'axe perpendiculaire au premier, passant par la moelle de l'arbre (Figure 15).

Pour chaque point, la distance par rapport au tronc est mesurée au vertex en se plaçant à l'aplomb de l'extrémité terminale de la branche. A cette longueur, le rayon de l'arbre à 1,30 m est ajouté afin d'obtenir la distance par rapport au centre de l'arbre. L'azimut de chaque point est aussi relevé à la boussole.

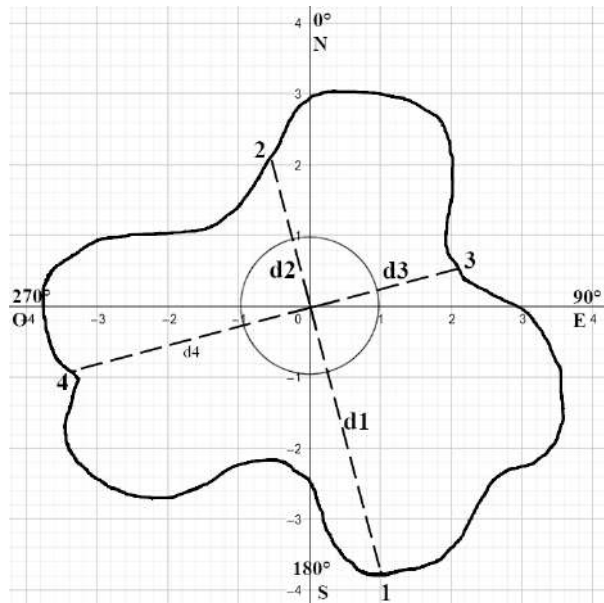


FIGURE 15 – Schéma de la procédure de mesure de l'excentricité de la couronne

Les coordonnées du centre de gravité de la couronne par rapport au centre de l'arbre sont ensuite calculées avec l'équation 3.

$$C = \left(\frac{\sum_{i=0}^4 x_i \cos(\alpha + \frac{\pi}{2})}{4}, \frac{\sum_{i=0}^4 x_i \sin(\alpha + \frac{\pi}{2})}{4} \right) \quad (3)$$

Avec α , l'azimut converti en radian, soit un angle partant de la direction nord et

tournant dans le sens trigonométrique.

Le ratio entre la longueur maximale et minimale permet d'obtenir une idée de la forme de la couronne. Une valeur proche de 1 indique une couronne ronde. Au contraire, plus la valeur est grande, moins la couronne sera circulaire (BRÜCHERT *et al.*, 2000; PRETZSCH, 2014).

L'excentricité de la couronne (*ecc*) est évaluée en calculant la distance du centre de gravité de la couronne au centre de l'arbre, divisée par son diamètre à 1,30 m (Equation 4).

$$ecc = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{d_{130}} \quad (4)$$

Cet indice permet d'exprimer la déviation du centre de gravité de la couronne par rapport au diamètre de l'arbre. Une excentricité de 0 indique que le centre de gravité de la couronne est situé au-dessus du centre de l'arbre. Une excentricité de 2 correspond à une déviation du centre de gravité de la couronne correspondant à deux fois le diamètre de l'arbre (KRAJNC *et al.*, 2019; PRETZSCH, 2014).

9.7 Hauteur élaguée

La hauteur élaguée est mesurée avec un Vertex IV de chez Haglöf. La mesure est réalisée en deux étapes. Tout d'abord, un premier point est placé en visant l'émetteur placé à 1,30 m sur le tronc. Un second point est ensuite placé en visant la première branche vivante faisant plus de deux centimètres de diamètre.

9.8 Nodosité

La nodosité est évaluée en étudiant les verticilles présents entre les sondes utilisées pour la mesure de la vitesse de propagation de l'onde. Le nombre de verticilles est ainsi dénombré. Pour chaque verticille, les nœuds sont ensuite comptés. Seul le diamètre du plus gros nœud de chaque verticille est mesuré avec un pied à coulisse.

9.9 Défilement

Le défilement est mesuré avec un compas parabolique finlandais. Une première mesure est prise à 1,30 m (C_{130}) et une seconde à cinq mètres (C_{500}). Lors de la mesure, la partie droite du compas est mise en contact de l'arbre et l'opérateur se place à la verticale de la poignée du compas.

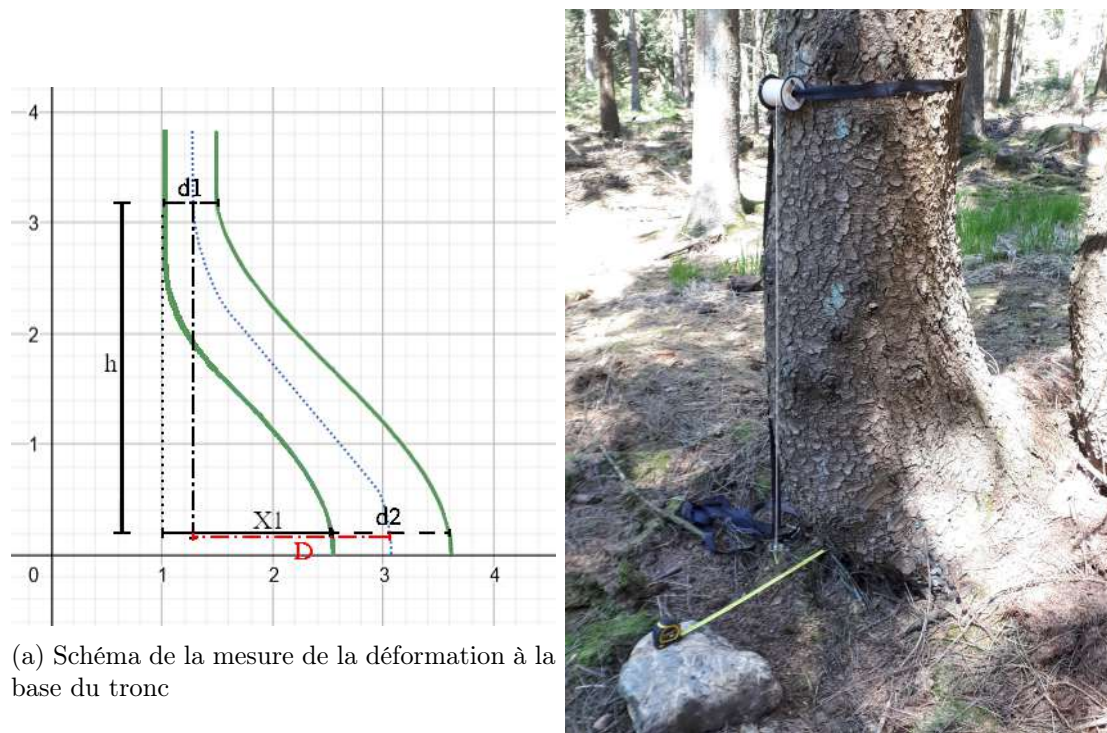
La formule 5 est utilisée pour calculer le défilement.

$$\text{défilement} = \frac{C_{130} - C_2}{h - 1,30} \quad (5)$$

Où les circonférences sont exprimées en centimètre et la hauteur en mètre. Le défilement est ainsi exprimé en cm/m

9.10 Déformations de la base du tronc

Afin de quantifier la déformation à la base du tronc, trois mesures sont réalisées (Figure 16). Tout d'abord, les diamètres de l'arbre à la fin de cette déformation (d_1), ainsi qu'à la base du tronc (d_2), sont mesurés. Ensuite, la distance entre la base du tronc et l'aplomb de la déformation (x_1) est établie.



(a) Schéma de la mesure de la déformation à la base du tronc

(b) Mise en place sur le terrain

FIGURE 16 – Mesure de la déformation de la base du tronc

Le décalage du centre du tronc est calculé en utilisant l'équation 6.

$$D = \left(x_1 + \frac{d_2}{2} \right) - \frac{d_1}{2} \quad (6)$$

Où D est le décalage en centimètre de la moelle, x_1 , d_1 et d_2 étant aussi exprimés en centimètre.

D'autres mesures sont aussi réalisées. En effet, la hauteur sur laquelle la déformation s'établit est évaluée ce qui permet d'obtenir un angle d'inclinaison de la moelle en utilisant la formule suivante 7 :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h}{D}\right) \quad (7)$$

Où α est en degré, la hauteur en centimètre. Un angle de 90° signifie que la base de l'arbre n'est pas déformée et que l'arbre est droit.

Les différents diamètres sont mesurés à l'aide d'un compas forestier en se mettant parallèlement à la déformation. Un fil à plomb est attaché à la fin de la déformation sur l'arbre pour obtenir la direction verticale. Ensuite la distance entre ce fil et l'arbre est mesurée avec un mètre de maçon horizontalement dix centimètres au-dessus du sol. En cas de pente, cette mesure est réalisée dix centimètres au-dessus du sol par rapport à l'amont de l'arbre.

Enfin, la hauteur de déformation est mesurée verticalement avec un mètre de maçon.

Si la déformation n'est pas visible, le diamètre de fin de déformation est mesuré à 1,30 m. Le diamètre à la base de l'arbre est mesuré comme précédemment à 10cm du sol en mesurant dans l'orientation qui maximise ce diamètre. La distance entre le fil à plomb et l'arbre est nulle. Enfin, la hauteur de déformation correspond à 1,20m (1,30 m - 10cm).

9.11 Synthèse des temps de mesure

En prenant en compte un temps de déplacement de trente minutes pour aller et revenir de la placette, le temps estimé pour réaliser le protocole décrit est d'un peu plus de 2h40 par placette (Tableau 3). L'étape la plus longue dans la réalisation du protocole sur le terrain serait l'installation de la placette. Doubler le nombre de placettes aurait pour conséquence de doubler le temps sur le terrain alors que doubler le nombre d'arbres par placette, reviendrait à augmenter le temps sur le terrain d'environ 1,5.

Tableau 3 – Tableau récapitulatif du temps estimé pour les différentes mesures

Nb. placettes	1		
Nb. AA/placette	5		
Outil de mesure	Temps/mesure (min)	Nb. mesures/arbre	Temps total
Circonférence	1	1	1
Densité du bois	1	2	2
Hauteur élaguée	2	1	2
Défilement	3	1	3
Mesure acoustique	3	1	3
Excentricité	1	4	4
Nodosité	1	1	1
Déformation du pied	5	1	5
Réalisation de la placette	25		25
Déplacement/placette	30		30
Total (heures)			2.67

10 Encodage des données

L’encodage des données est réalisé à l’aide de l’environnement open-source Open Foris version 1.7.6[178] - Collect Core version 3.26.0. Open Foris est un logiciel permettant la collecte de donnée en créant un formulaire adapté à chaque étude. Dans le cas de ce travail, ce formulaire a entièrement été créé afin de suivre le protocole décrit à la section 9 et pouvoir être utilisé sur un smartphone fonctionnant sous Android 8 (Figure 17).

Ce formulaire permet l’encodage d’un numéro d’enregistrement correspondant à une journée de travail. Ensuite, les informations concernant la placette peuvent être encodées. Cette section regroupe le numéro de la placette avec le nom du cantonnement et la parcelle correspondante ainsi que son âge. Les pratiques sylvicoles ayant un impact sur l’évolution des arbres, un historique des travaux réalisés est demandé. Puis, les informations concernant les caractéristiques de la placette en elle-même sont encodées. Cette section regroupe le type de régénération observée, les coordonnées géographiques, la pente et la surface terrière. Pour chaque placette, cinq arbres sont enregistrés avec les différentes mesures à réaliser.

Afin de réduire au maximum les erreurs d’encodage, les valeurs sont vérifiées automatiquement lors de la saisie, en fonction de différentes conditions (Figure 17e).

Les formulaires d’encodage sont ensuite directement enregistrés dans une base de données sur ordinateur. Les données peuvent alors être exportées en fichier Excel (.xlsx) ou sous forme d’un fichier texte (.CSV) pour être analysées.

Un script R. a été écrit afin de calculer le module d'élasticité, les différentes caractéristiques de la couronne, le défilement et les différents facteurs de la déformation de la base du tronc. Il permet aussi de réaliser l'analyse statistique qui sera présentée dans la section 11.

Nom Cantonnement	Numéro Parcelle	Age		
Eupen	395.0	75.0	⚠	<input type="checkbox"/>
Eupen	395.0	75.0	⚠	<input type="checkbox"/>
Eupen	373.0	70.0	⚠	<input type="checkbox"/>
Eupen	373.0	70.0	⚠	<input type="checkbox"/>

Numéro d'...stremement: 1.0 (Cluster)

(a) Liste des différentes placettes par jour d'encodage.

Nom Cantonnement	Numéro Parcelle	Age	Historique	Type de régénération	Localisation	Pente (en %)	Surface terrière (en m ² /ha)	+ Arbre
								⚠

Numéro d'...stremement: 1.0 (Cluster)

(b) Données à encoder par placette. Le point d'exclamation informe de la localisation de l'erreur d'encodage.

Circonférence 1m30 (en cm)	Hauteur élaguée (en m)	Profondeur (en mm)		
146.0	8.3	31.0	⚠	<input type="checkbox"/>
157.0	8.6	34.0	⚠	<input type="checkbox"/>
162.0	8.8	33.0	⚠	<input type="checkbox"/>
161.0	10.0	31.0	⚠	<input type="checkbox"/>
128.0	10.5	32.0	⚠	<input type="checkbox"/>

Numéro d'...strement: 1.0 (Cluster)

(c) Liste des arbres par placette.

Profondeur (en mm)
Profondeur (en mm)
Tof (en µs)
Tof (en µs)
146 Tof (en µs)
Longueur 1 (en m)
Azimuth1 (en °)
Longueur 2 (en m)
Azimuth2 (en °)
Longueur 3 (en m)
Azimuth3 (en °)
Longueur 4 (en m)
Azimuth4 (en °)
Circonférence haut (en cm)

Numéro d'...strement: 1.0 (Cluster)

(d) Données à encoder par arbre.

TFE_finish_V3

CLUSTER > PLACETTE [4] > Arbre [1]

Diamètre fin déformation (en cm) ⚠

Diamètre bas déformation (en cm)

Hauteur déformation (en cm)

Décalage déformation (en cm)

Nombre de verticille

+ Verticille

Diamètre fin déformation (en cm)

Diamètre à la fin de la déformation

44

Doit être supérieur à C130

Numéro d'...strement: 1.0 (Cluster)

(e) Message d'erreur lorsque l'encodage n'est pas cohérent.

FIGURE 17 – Application d'encodage

11 Analyse statistique théorique

Afin de réaliser l'analyse statistique, un jeu de données fictives a été construit. Ce jeu a la même structure que celui qui sera obtenu en utilisant le système d'encodage développé (section 10). Il est composé de 19 colonnes. La première est le numéro de journée de travail représentant une unité d'enregistrement dans le système d'encodage. Il regroupe l'ensemble des mesures d'une journée de travail sur le terrain. 40 journées de travail ont été simulées. Pour chacune des journées, une parcelle a ensuite été simulée. Pour chacune de ces parcelles, le type de régénération, la surface terrière, ainsi que l'âge des arbres sont arbitrairement encodés. Ensuite, pour chaque parcelle, cinq arbres ont été simulés et pour chaque arbre, la valeur des différentes mesures (cf. section 9 (Tableau 4), par exemple la vitesse de propagation de l'onde) a été tirée aléatoirement au sein de distributions normales de moyenne et d'écart-type fixés arbitrairement (Tableau 5).

Tableau 4 – Description de l'échantillonnage théorique

Régénération	Nb. placettes	Nb. arbres/placette	Nb. total d'arbres
Naturelle	20	5	100
Artificielle	20	5	100

Tableau 5 – Moyenne et écart-type des distributions normales utilisées pour chaque variable en fonction du type de régénération

Variables	Type de régénération			
	Naturelle		Artificielle	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Age	55	1	55	1
Surface terrière (m ² /ha)	37	2	32	2
C130 (cm)	100	3	155	3
Pénétration (mm)	28	2	35	2
Temps de propagation (µs)	235	6	242	15
Circularité de la couronne (m/m)	3,5	0,5	1,5	0,5
Excentricité (m/cm)	2,5	0,1	0,5	0,1
Hauteur élaguée (m)	8	1	9	1
Défilement (cm/m)	1,8	0,3	2	0,3
Décalage (cm)	4	1	2,5	1
Angle de déformation (°)	70	1	90	1
Nombre de verticilles	2	1	4	1
Nombre de nœuds	2	1	5	1
Diam du plus gros nœud (cm)	1,8	0,5	3	0,5

L'analyse statistique est réalisée à l'aide d'analyses de la covariance (ANCOVA). En effet, l'objectif est de tester l'effet de différentes variables explicatives aussi bien qualitatives et quantitatives (comme le type de régénération, la surface terrière, l'âge, la circonférence à 1,30 m), sur une variable à expliquer quantitative correspondant à un élément de la qualité du bois (ex. le module d'élasticité). L'analyse doit en outre prendre en compte la structure hiérarchique du jeu de données : les arbres sont regroupés dans des placettes. Les observations effectuées dans une même placette ne peuvent donc pas être considérées comme indépendantes. Outre les effets fixes, des effets aléatoires sont donc ajoutés aux modèles pour prendre en compte les effets « placettes » et ainsi obtenir des tests d'hypothèses plus rigoureux.

Etant donné le nombre de variables explicatives potentielles, un grand nombre de modèles peuvent être ajustés. Afin de sélectionner le meilleur modèle, nous appliquerons le protocole décrit par ZUUR *et al.* (2009). La première étape consiste à ajuster un modèle le plus complet possible intégrant l'ensemble des effets fixes (interactions comprises) et l'ensemble des effets aléatoires possibles. Ce modèle complet, pour le module d'élasticité, est le suivant :

$$\begin{aligned}
MOE_{ijt} = & b1 + b1_{t=rn} + \beta1_j + \\
& (b2 + b2_{t=rn} + \beta2_j) \times GHA_{jt} + \\
& (b3 + b3_{t=rn} + \beta3_j) \times C130_{ijt} + \\
& (b4 + b4_{t=rn} + \beta4_j) \times age_{jt} + \\
& (b5_{t=rn} + \beta5_j) \times GHA_{jt} \times C130_{ijt} + \epsilon_{ijt}
\end{aligned} \tag{8}$$

Avec MOE_{ijt} une observation du module d'élasticité effectuée sur l'arbre i dans une placette j parmi les placettes du traitement t (régénération artificielle ou naturelle) ; $b1$ un effet fixe et $\beta1_j$ un effet aléatoire distribuée suivant une distribution normale centrée et d'écart-type ajusté et ϵ_{ijt} la variabilité résiduelle distribuée suivant une distribution normale centrée et d'écart-type ajusté.

La seconde étape consiste à retirer successivement les effets aléatoires les moins importants de manière à minimiser le critère d'information de l'Akaike (AIC).

La troisième et dernière étape consiste à retirer successivement les effets fixes les moins significatifs. En partant du modèle obtenu à l'issue de la deuxième étape, les différentes variables sont retirées successivement en utilisant le test de signification partielle des coefficients fixes. Les variables possédant la P-valeur la plus élevée sont enlevées en premier. Cette procédure est répétée tant que cela mène à une diminution du AIC et que

Tableau 6 – Estimation des paramètres du modèle

	Estimation	Ecart-type	Niveau de significativité
b1	1,65	5,78	
b1 _{t=rn}	-0,47	2,08	
b2	0,15	0,04	***
$\beta 1_j$		0,02	
ϵ_{ijt}		2,76	

*** = *P-valeur* < 0.001 ; ** = *P-valeur* < 0.01 ; * = *P-valeur* < 0.05 and *n.s.* = *P-valeur* ≥ 0.05

certaines variables restent non significatives (*P-valeur* > 0.05). L'objectif étant de mettre en évidence l'effet du traitement, ce dernier est conservé, peu importe sa significativité. A partir du jeu de données simulées, on obtient ainsi le modèle 9. Les estimations des paramètres du modèle sont reprises dans le tableau 6.

$$MOE_{ijt} = b1 + \beta 1_j + b1_{t=rn} + b2 \times C130_j + \epsilon_{ijt} \quad (9)$$

Enfin, la dernière étape consiste à vérifier la normalité et l'hétéroscédasticité des résidus ainsi que l'effet aléatoire. En analysant la figure 18, la normalité et l'hétéroscédasticité des résidus peuvent être acceptées, il en est de même pour l'homogénéité de l'effet aléatoire.

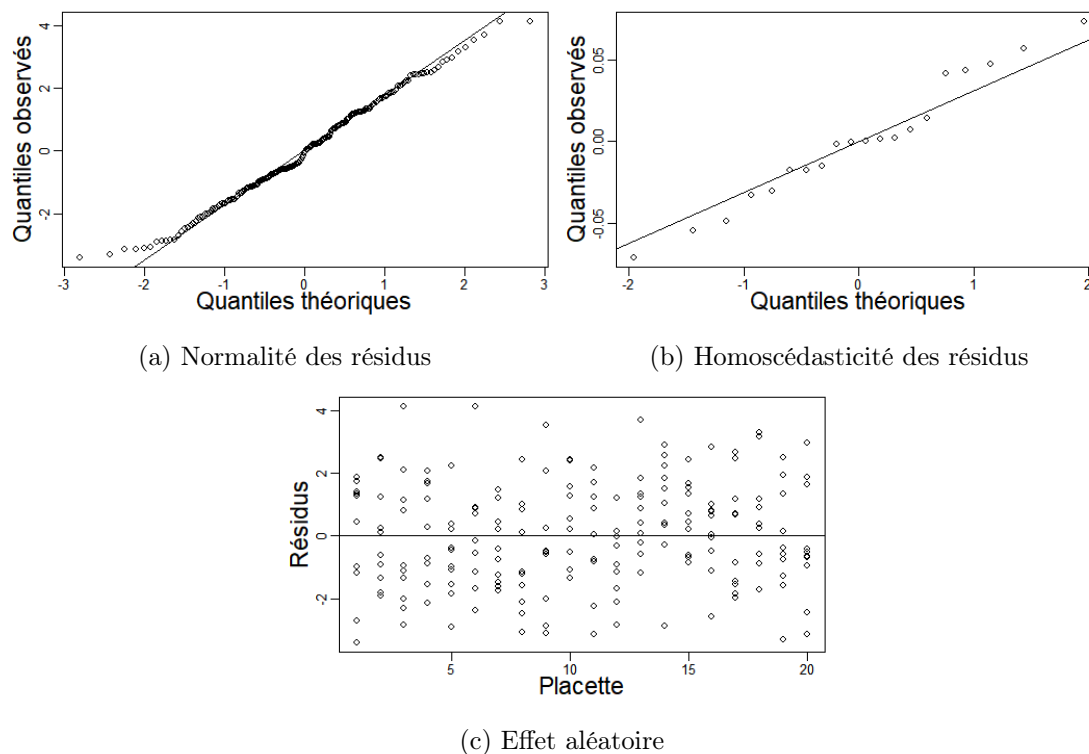


FIGURE 18 – Vérification des conditions d’application du modèle ajusté sur les données théoriques

12 Echantillonnage pilote

Quatre parcelles, deux dans un peuplement issu d’une régénération naturelle et deux dans un peuplement issu d’une plantation ont été échantillonnées dans la forêt domaniale du cantonnement de Verviers, direction de Liège en mai 2020 (Figure 19). Les deux peuplements se développent sur des sols hydromorphes avec une série objectif de production et protection de l’eau. L’âge de la régénération naturelle a été estimé par les agents forestiers à 70 ans. La plantation, quant à elle, remonte à 1945. Ces deux peuplements ont été suivis de manière équivalente. En effet, dans les deux cas, un élagage artificiel à deux mètres de haut a été réalisé. Ensuite, au sujet des éclaircies, six ont été réalisées dans la plantation, avec la dernière en 2017 et cinq dans la régénération naturelle, avec la dernière en 2016 (Tableau 7). Le type de régénération constitue donc la principale différence entre les deux peuplements.

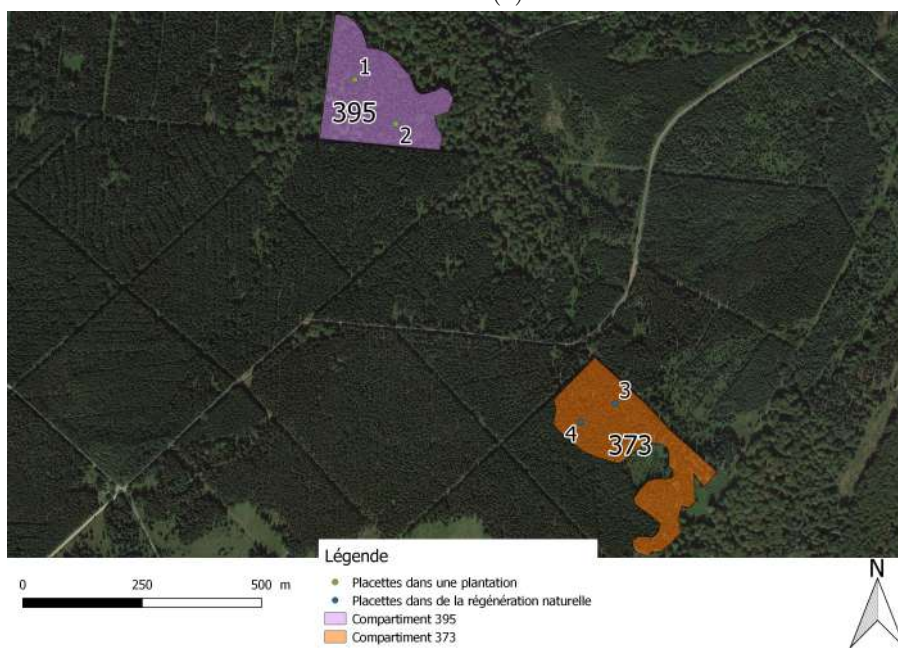
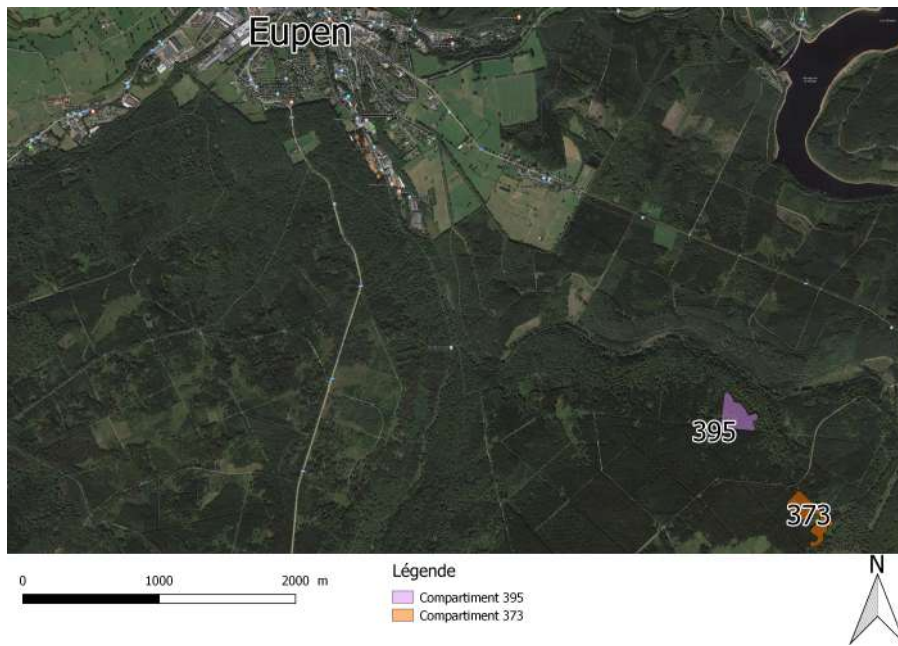


FIGURE 19 – Localisation des placettes mesurées dans le Cantonnement de Verviers à proximité d'Eupen

Tableau 7 – Caractéristiques des peuplements échantillonnés.

Cant.	Comp.	Régé.	Nb. éclaircies	Dernière écl.	Age	GHA (m ² /ha)
Verviers	395	Artificielle	6	2017	75	39
Verviers	373	Naturelle	5	2016	70	43

Tableau 8 – Description de l'échantillonnage.

Régénération	Artificielle			Naturelle		
	Moy.	Min. - max.	σ	Moy.	Min. - max.	σ
C130 (cm)	141,40	119 - 162	15,91	135,20	110 - 158	14,94
Pénétration (mm)	30,55	28 - 32	1,51	30,44	26,5 - 33,5	1,98
Tps. propag. (μ s)	215,63	191 - 244,33	17,67	218,85	207,33 - 227,33	7,54
MOE (GPa)	7,18	5,49 - 8,96	1,24	6,90	6,25 - 7,75	0,53
Circularité (m/m)	1,58	1,05 - 1,86	0,27	1,52	1,08 - 2,11	0,32
Ecc (m/cm)	0,009	0,001 - 0,026	0,008	0,006	0,001 - 0,015	0,004
Défilement (cm/m)	*			*		
Ht. élaguée (m)	10,53	8,30 - 13,60	1,88	9,70	6,30 - 12,10	1,65
Ht. défor. (cm)	120	120 - 120	0	120	120 - 120	0
Bas défor.(cm)	53,40	42 - 62	7,68	54,80	44 - 64	6,84
Dist. défor. (cm)	0	0 - 0	0	0	0 - 0	0
Décalage (cm)	4,5	2,5 - 6,5	1,45	6,70	4,50 - 10	1,85
Angle (°)	88,01	87,13 - 88,90	0,64	87,16	85,60 - 88,01	0,81
Verticilles	0,44	0 - 2	0,70	0,22	0 - 1	0,42
Nœuds	6,33	5 - 7	0,81	5	5 - 5	0
+ gros nœud (cm)	3,76	3,50 - 4	0,21	3,50	2,50 - 4,50	1,41

* Le défilement n'ayant pas pu être mesuré, aucune valeur n'est disponible pour cette variable. Aucune déformation de la base du tronc n'ayant été observée, le diamètre en haut de la déformation correspond au diamètre à 1,30 m, la hauteur de déformation est fixée à 1,20 m et la distance de déformation est encodée comme valant 0.

12.1 Analyse descriptive

En analysant le tableau 8, les arbres échantillonnés dans la régénération artificielle semblent avoir une circonférence, un module d'élasticité, une excentricité de la couronne, une hauteur élaguée, un nombre de verticilles, de noeuds en moyenne plus élevé que les arbres de la régénération naturelle. Il en est de même pour le diamètre du plus gros noeud. En revanche, la circularité de la couronne et le décalage ainsi que le diamètre à la base du tronc semblent être plus élevés pour les arbres de la régénération naturelle en comparaison avec ceux de la régénération artificielle.

Ensuite, la variabilité de la circonférence, du module d'élasticité, d'excentricité de la couronne, de la hauteur élaguée, du nombre de verticilles et de noeuds semble être plus

importante pour les arbres issus de régénération artificielle. En revanche, l'inverse semble être observé pour la circularité de la couronne, le décalage et le diamètre à la base du tronc et le diamètre du plus gros noeud. En effet, dans ce cas, la variabilité semble être plus importante pour les arbres issus de régénération naturelle.

La figure 20 illustre les différences observées entre les deux types de régénération.

12.2 Illustration de la méthode de modélisation

Étant donné que l'échantillonnage pilote ne peut pas être considéré comme suffisamment représentatif, la réalisation de l'entièreté des analyses prévues (Section 11) n'aurait pas de sens. A titre illustratif cependant, l'analyse de la variation du module d'élasticité est présentée ci-dessous.

Le modèle final obtenu est celui décrit par l'équation 10. A l'issue de la sélection des variables significative (cf. section 11), le modèle contient deux effets fixes - la circonférence et le traitement - et aucun effet aléatoire. Le modèle obtenu permet d'expliquer 31% de la variabilité (coefficient de détermination). Les conditions d'application du modèle ont bien été vérifiées (Figure 22). L'ajustement de ce modèle montre également que le module d'élasticité n'était pas significativement différent entre les placettes régénérées naturellement ou artificiellement (Tableau 9, $P - value = 0.17$). En revanche, le module d'élasticité semble diminuer légèrement mais significativement en fonction de la circonférence de l'arbre (Tableau 9, $P - value = 0.02$).

$$MOE_{ijt} = b1 + b1_{t=rn} + b2 \times C130_{it} + \epsilon_{ijt} \quad (10)$$

Tableau 9 – Estimation des paramètres du modèle décrit par l'équation 10

	Estimation	Ecart-type	Niveau de significativité
b1	11.86	1.91	***
b1 _{t=rn}	-0.59	0.41	
b2	-0.032	0.13	*
ϵ_{ijt}		0.83	

*** = P -valeur < 0.001 ; ** = P -valeur < 0.01 ; * = P -valeur < 0.05 and n.s. = P -valeur \geq 0.05

Toutes ces analyses ont été réalisées dans l'environnement statistique R version 3.6.3 (TEAM, 2018) avec les packages lmtest version 0.9-37 (ZEILEIS et HOTHORN, 2002), lmerTest version 3.1-1 (KUZNETSOVA *et al.*, 2017) et lme4 version 1.1-21 (BATES *et al.*, 2020).

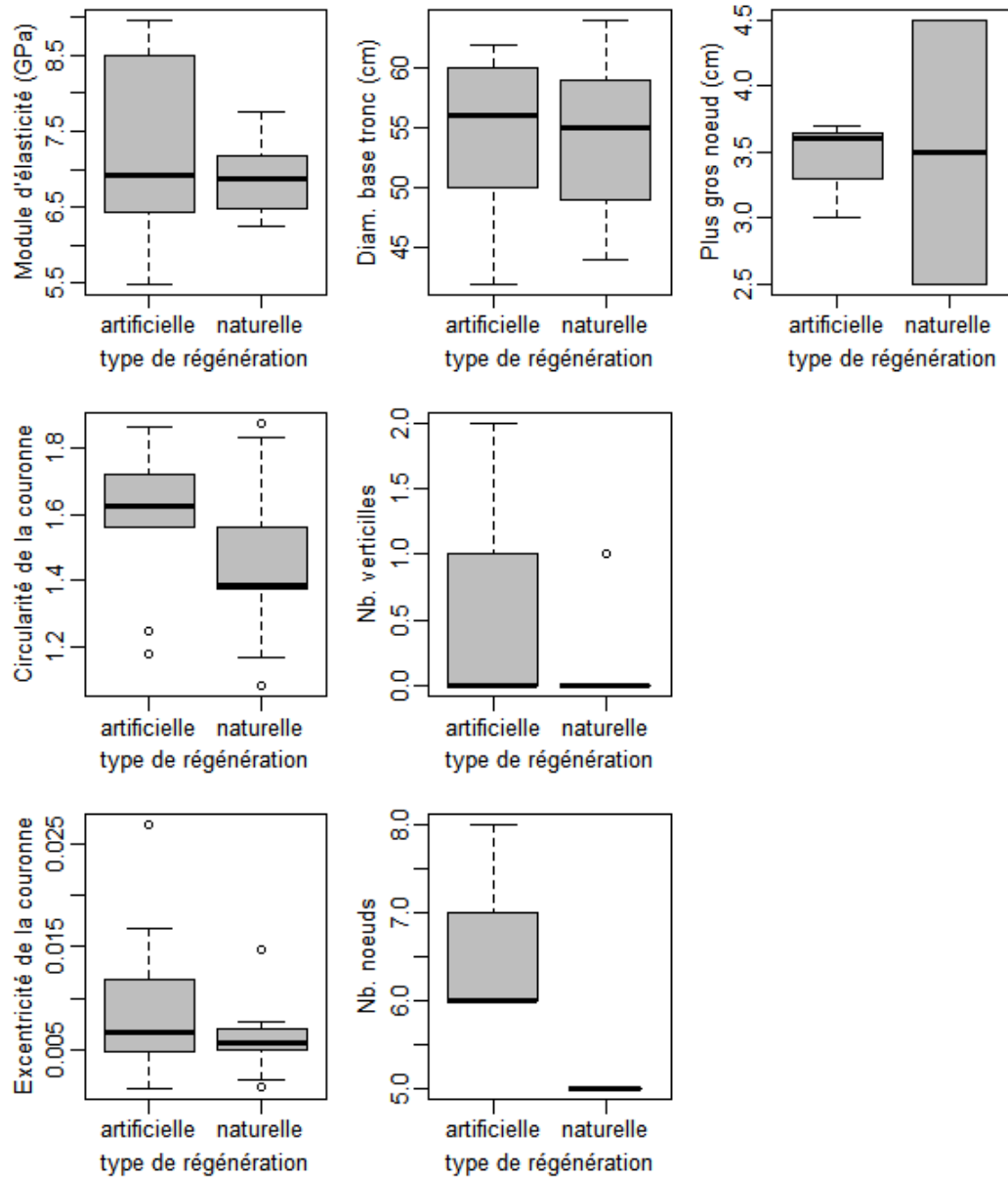


FIGURE 20 – Boxplot des différentes mesures en fonction du type de régénération

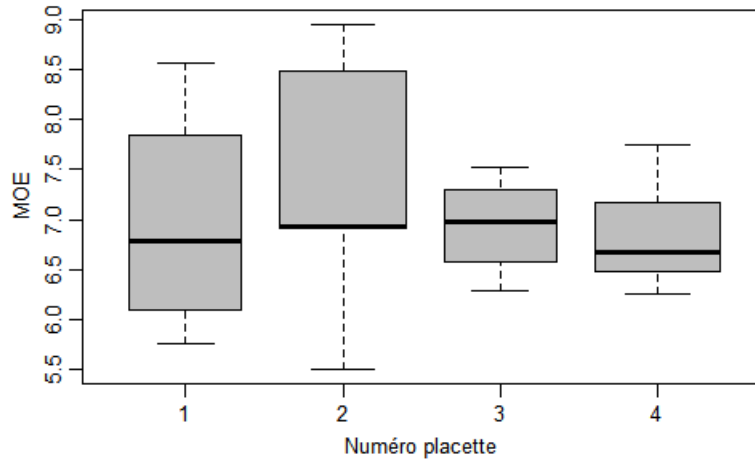


FIGURE 21 – Valeur du module d'élasticité par placette

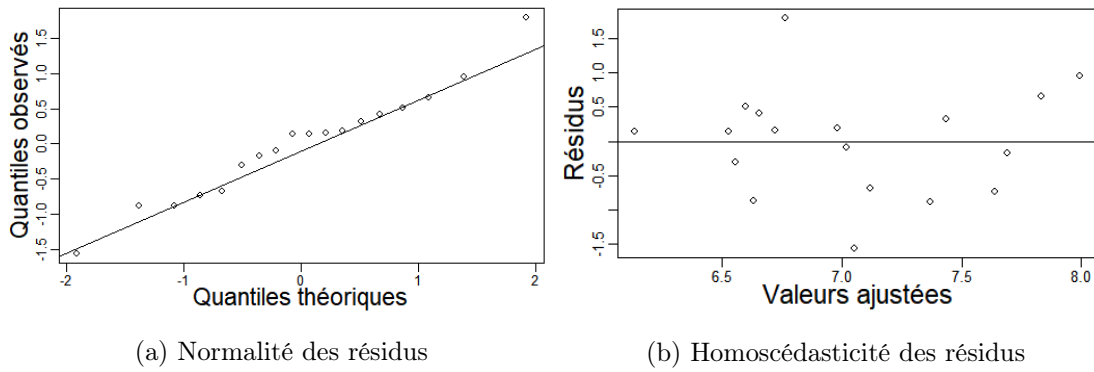


FIGURE 22 – Vérification des conditions d'application du modèle ajusté à partir des données récoltées sur le terrain.

Tableau 10 – Moyenne et écart-type des distributions normales pour le nombre de placettes et le nombre d’arbres par placette

Distribution	Moyenne	Ecart-type
Nombre de placettes	7,00	0,22
Nombres d’arbres par placette	0,00	0,92

12.3 Estimation de l’effort d’échantillonnage

Afin d’obtenir une estimation du nombre de parcelles et du nombre d’arbres par parcelle à échantillonner, plusieurs jeux de données ont été générés sur base de la variabilité observée avec l’échantillonnage pilote. Le choix du nombre de parcelles et du nombre d’arbres par parcelle a été défini en fonction de la variabilité du module d’élasticité. En effet, il est un des facteurs parmi les plus importants de la qualité du bois et intègre d’autres facteurs, comme la densité et la nodosité.

L’analyse de modélisation illustrée dans les sections 11 et 12.2 a été répétée pour différents jeux de données virtuelles en faisant varier l’effort d’échantillonnage, c’est-à-dire le nombre de parcelles échantillonnées (de 10 à 120) et le nombre d’arbres mesurés par placette (2, 5 ou 10). Similairement à la procédure utilisée dans la section 11, pour construire ces jeux de données, les valeurs des variables utilisées ont été tirées dans des distributions normales de moyennes et d’écart-type calculés à partir des données de l’échantillonnage pilote (Tableau 10).

Pour chacune de ces combinaisons caractérisant un effort d’échantillonnage, 100 répétitions ont été effectuées. Pour chaque effort d’échantillonnage, le modèle a donc été ajusté 100 fois et il a donc été possible de calculer 100 valeurs d’intervalle de confiance de l’effet du traitement ($b_{t=rn}$, équation 9). L’intervalle de confiance a été calculé avec le package lme4 en suivant une méthode itérative basée sur le calcul de la vraisemblance du modèle (BATES *et al.*, 2020). Par la suite, le demi-intervalle de confiance est utilisé pour exprimer la différence minimum de module d’élasticité qu’un effort d’échantillonnage donné permet de mettre en évidence de manière significative ($\alpha = 0.05$). La moyenne des 100 valeurs du demi-intervalle de confiance a ainsi été calculée pour chaque effort d’échantillonnage.

La figure 23 permet d’analyser l’influence du nombre de placettes et du nombre d’arbres par placette sur le demi-intervalle de confiance afin d’estimer l’effort d’échantillonnage nécessaire. Plusieurs méthodes sont possibles afin d’identifier l’effort d’échantillonnage optimum. La première méthode consiste à identifier un seuil à partir duquel l’augmentation du nombre d’échantillons ne permet plus une amélioration suffisante de la

précision du modèle. Dans le cas de cette étude, ce seuil est considéré être atteint lorsque l'amélioration de la précision obtenue par l'augmentation du nombre de placettes est inférieure à 10%. Ce seuil est ainsi atteint à partir de 60 placettes. La seconde méthode consiste à identifier le nombre de placettes et le nombre d'arbres par placette nécessaire afin de pouvoir mettre en évidence une différence de module d'élasticité donnée, et par exemple une différence de 0,28 GPa correspondant à la différence de module d'élasticité observée entre les traitements de l'échantillonnage pilote. En suivant cette logique, deux combinaisons d'effort d'échantillonnage semblent particulièrement efficaces. La première combinaison est composée de quinze placettes de dix arbres. La seconde combinaison est composée de 23 placettes de cinq arbres.

Les deux efforts d'échantillonnage sélectionnés ne demandent cependant pas le même temps à consacrer sur le terrain. En effet, en analysant le tableau 3, la combinaison de quinze placettes de dix arbres demande un peu plus de 66h afin de réaliser l'échantillonnage contre un peu plus de 61h pour la seconde combinaison. Ce n'est qu'à partir d'un demi-intervalle de confiance de 0.25 qu'augmenter le nombre d'arbres par placette devient plus intéressant qu'augmenter le nombre de placettes. Aucune combinaison composée de deux arbres par placette n'est retenue. En effet, pour obtenir la même précision que la seconde combinaison, le nombre de placettes doit être doublé, nécessitant alors un temps à consacrer trop important (80h). L'effort d'échantillonnage optimal pour obtenir un effet significatif du traitement sur le module d'élasticité semble donc être approximativement de 23 placettes de cinq arbres.

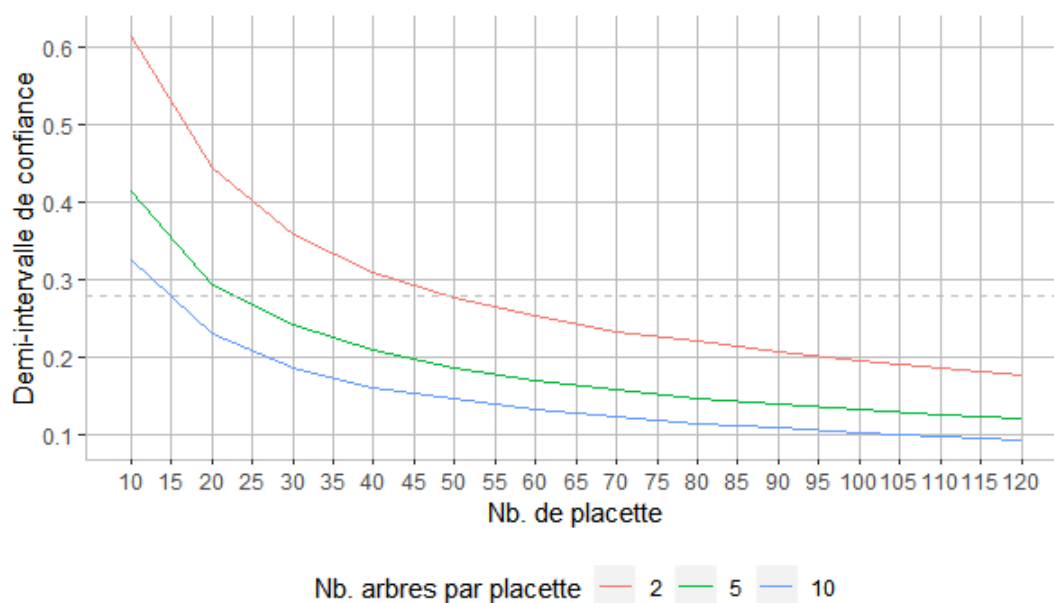


FIGURE 23 – Évolution du demi-intervalle de confiance en fonction du nombre de placettes et du nombre d'arbres par placette

Cinquième partie

Discussion

13 Qualité du bois issu de la régénération naturelle

Selon les informations recueillies dans la littérature et selon l'avis des personnes interrogées, la régénération naturelle semble présenter des atouts concernant la qualité du bois. Tout d'abord, la densité de semis est beaucoup plus importante qu'en plantation. La phase de compression est ainsi très intense au début de la vie du peuplement permettant le développement d'un grand nombre de perches d'avenir. Dans ces conditions, la croissance secondaire (croissance radiale) est généralement plus réduite et la croissance primaire (élongation) est favorisée. Les premiers cernes annuels sont alors plus étroits, réduisant le volume de bois juvénile par rapport au bois mature. Ensuite, cette densité limite le développement de la couronne réduisant ainsi le nombre et les dimensions des branches. La nodosité devrait donc diminuer (GULDIN et FITZPATRICK, 1991). Comme l'explique (JOZSA et MIDDLETON, 1994), une forte densité permet aussi de diminuer le défilement du tronc et d'augmenter la hauteur élaguée. Ces deux valeurs devraient

ainsi être supérieures en régénération naturelle qu'en plantation. Puis, une proportion de bois de compression plus faible est supposée dans la régénération naturelle que dans les plantations. En effet, les arbres vont pousser dans des conditions de croissance plus concurrentielles, réduisant ainsi l'impact du vent. Enfin, en fonction de l'intensité des interventions sylvicoles, la largeur des cernes pourrait rester faible, produisant ainsi un bois plus dense. Tous ces éléments sont favorables en termes de qualité du bois et devraient se traduire par une augmentation du module d'élasticité. Le bois devrait ainsi présenter une rigidité au moins similaire à celui issu de plantation. Cependant, en régénération naturelle, la répartition des semis dans le peuplement n'est pas contrôlée. Des zones ne présentant pas ou peu de régénération peuvent ainsi être attendues. Ces trouées peuvent alors entraîner un développement asymétrique de la couronne et ainsi conduire à une moelle non centrée. Cela aurait pour effet d'augmenter la proportion de bois de compression.

En théorie, et contrairement à un ressenti de nombreux agents de terrain, rien ne semble conclure à une diminution de la qualité du bois d'épicéa issu de régénération naturelle par rapport au bois issu de plantation. L'inverse pourrait même être observé. La discussion des résultats permettra de vérifier cette hypothèse.

14 Interprétation des résultats de l'échantillonnage pilote

Tout d'abord, d'après l'analyse des données de l'échantillonnage pilote, le module d'élasticité des arbres issus d'une plantation serait légèrement supérieur à celui des arbres issus de régénération naturelle. En analysant les composants du module d'élasticité, le temps de propagation de l'onde semblait être légèrement plus faible en plantation qu'en régénération naturelle, la vitesse de propagation était donc plus élevée. La profondeur de pénétration restait, quant à elle, similaire entre les deux types de régénération. Le bois serait donc légèrement plus rigide en plantation qu'en régénération naturelle. En effet, en présentant un module d'élasticité légèrement plus élevée, le bois issu de plantation peut supporter une contrainte plus élevée pour un même niveau de déformation que le bois issu de régénération naturelle. Cependant, selon le tableau 11, pour que la différence entre les modules d'élasticité traduise une différence de qualité, il faudrait que 1 GPa sépare les deux valeurs. Dans notre cas, une planche obtenue à partir d'un arbre issu de régénération naturelle ou de plantation se retrouverait probablement dans la même classe de résistance.

Cependant, selon le modèle 10, la différence observée entre les deux valeurs serait expliquée par la circonférence à 1,30m et non le type de régénération. En effet, le module

Tableau 11 – Classe de résistance du bois en fonction du module d'élasticité. Tableau extrait de BENOIT *et al.* (2008)

	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40
MOE (kN/mm ²)	7	8	9	9.5	10	11	11.5	12	13	14

d'élasticité serait impacté négativement par la circonférence. Dans le cas de ce travail, les arbres issus de régénération naturelle présentaient une circonférence à 1,30m inférieure à ceux de plantation. Cette différence peut provenir de la différence d'âge entre les deux peuplements. Les sept centimètres de différence peuvent aisément être expliqués par les cinq ans séparant la régénération naturelle de la plantation.

Ensuite, à partir de notre échantillonnage pilote, les valeurs du module d'élasticité n'étaient pas significativement différentes entre placettes d'un même type de régénération (Figure 21). Néanmoins, ce résultat pouvait être attendu, car pour chaque type de régénération, les deux placettes proviennent d'un même peuplement, variabilité inter-placette était donc inférieure à la variabilité intra-placette. En augmentant le nombre de placettes ou en les installant à l'intérieur de parcelles ou de peuplements différents, un effet de placette pourrait intervenir et devenir significatif.

Concernant les caractéristiques de la couronne, que ça soit la circularité ou l'excentricité, les valeurs étaient relativement proches entre la régénération naturelle et la régénération artificielle. La circularité et l'excentricité étaient légèrement meilleures en régénération naturelle qu'en plantation. Pour la plantation, le centre de gravité de la couronne serait décalé en moyenne de 0.01 fois le diamètre de l'arbre à 1,30 m contre 0.006 pour la régénération naturelle. Dans les deux cas, ce décalage est inférieur à un centimètre. Une proportion similaire de bois de compression provoqués est donc attendue dans les deux types de régénérations. Concernant de la circularité de la couronne, les couronnes étaient relativement circulaires avec la plus grande branche seulement 1,5 fois plus longue que la plus courte. Cela peut être expliqué par un itinéraire sylvicole similaire entre les deux peuplements. Ils se sont donc développés dans des conditions de croissance similaire avec un niveau de compétition proche. Cela peut aussi être expliqué par la faible plasticité morphologique de l'épicéa comme avancé par l'étude de PRETZSCH et RAIS (2016). Peu importe l'espace disponible, l'épicéa pourrait ne pas développer une couronne fortement asymétrique.

Ensuite, la hauteur élaguée semblait être plus élevée en plantation. Cette observation est contraire aux études de HÉBERT *et al.* (2002, 2003); KLANG et EKÖ (1999); PRETZSCH et RAIS (2016). Une augmentation de la compétition permet normalement de favoriser l'élagage naturel. Une hauteur élaguée plus importante est donc attendue en

régénération naturelle qu'en plantation, or l'inverse est observé. Dans le cas présent, les deux peuplements sont arrivés à maturité et ont été conduits en suivant le même itinéraire sylvicole. La surface terrière étant similaire entre les deux types de régénération, l'intensité de la compétition actuelle l'est aussi. L'élagage naturel n'aurait donc pas été plus favorisé dans un peuplement que dans l'autre. Cependant, le nombre de verticilles entre les sondes lors de la mesure de la vitesse de propagation de l'onde était plus faible en régénération naturelle qu'en plantation. Il en était de même pour le nombre et le diamètre du plus gros noeud. Ces observations peuvent ainsi être le vestige d'une compétition plus importante dans le jeune âge et ainsi être en accord avec les études précédemment citées. L'influence du type de régénération sur la hauteur élaguée ne serait donc plus observable sur les arbres sur pied à cause du stade de développement des peuplements. Seuls peuvent subsister des vestiges des conditions passées au travers des noeuds situés sur le bas du tronc.

Enfin concernant la déformation de la base du tronc, les mesures étant réalisées sur des arbres d'avenir, le risque qu'ils présentent une déformation à leur base était réduite. C'est pourquoi aucune déformation n'a pu être observée sur le terrain. L'angle de déformation est donc proche de 90° en plantation et en régénération naturelle. Il est légèrement plus faible dans le deuxième cas à cause d'une circonférence à la base en moyenne plus large qu'en plantation. C'est cette différence de circonférence qui induit la valeur du décalage à la base du tronc, sans pour autant qu'il n'induisse de décalage de la moelle au sein de l'arbre. La déformation se traduit ainsi par la présence d'empattements au pied des arbres. La déformation de la base du tronc, comme présentée dans ce protocole, ne semble donc pas être un facteur intéressant afin de comparer la qualité du bois issu de régénération naturelle et plantation.

Impact de la sylviculture : Comme le montre l'étude de WIMMER et DOWNES (2003), la qualité du bois peut être modifiée par les pratiques sylvicoles. Selon PIISPANEN *et al.* (2014); JYSKE *et al.* (2008), l'évolution de la densité du bois suit des schémas caractéristiques en fonction des conditions de croissance. Dans le cas des deux peuplements étudiés, la sylviculture a été relativement similaire depuis la régénération des peuplements. Dans les deux cas, un élagage de pénétration et un nombre d'éclaircies similaire ont été réalisés. En effet, comme le montre le tableau 7, six éclaircies ont été réalisées dans la plantation et 5 dans la régénération naturelle. Le peuplement issu de régénération naturelle a donc été suivi de la même manière que s'il avait été issu de plantation. Hormis la régénération, les deux peuplements ont donc évolué dans des conditions similaires, réduisant les différences observables lorsqu'ils arrivent à maturité. En effet, une fois la

compétition réduite, les arbres issus de régénération naturelle vont se développer de la même manière que ceux issus de plantation. La seule manière d'observer une différence serait donc d'abattre certains arbres et analyser la composition du bois. Dans ce cas, une différence de proportion de bois juvénile, entre autres, pourrait éventuellement être observable.

Critiques des résultats : Ces résultats sont basés sur l'analyse de quatre placettes au sein de deux peuplements sélectionnés afin de tester le protocole. Il n'y a donc pas assez de données que pour pouvoir évaluer la qualité du bois en fonction du type de régénération. Tous les facteurs n'ont pas pu être pris en compte lors de l'ajustement de l'équation 10, comme la surface terrière et l'âge par exemple. Les résultats présentés servent surtout à expliquer la démarche réalisée, exprimer une tendance pour formuler plus précisément de futures hypothèses et illustrer les résultats qui pourraient être obtenus.

15 Critiques et améliorations du protocole

Le protocole présenté permet, dans l'ensemble, de mesurer les facteurs impactant la qualité du bois d'épicéa sur pied. Cependant, après l'avoir testé certains points nécessitent quelques améliorations ou précisions.

Tout d'abord, aucun marquage des arbres n'était prévu initialement. Cependant, cela pourrait être utile afin de retrouver les arbres a posteriori. Par exemple, dans le cas de la mesure du temps de propagation de l'onde dans le bois, deux mesures se sont révélées aberrantes. Après ces événements, l'application d'encodage a été corrigée. Il aurait cependant été intéressant de pouvoir retourner prendre les mesures sur ces deux arbres.

Ensuite, la hauteur élaguée avait été définie en fonction de la hauteur de la première branche vivante. Cependant, bien que les branches meurent le long du tronc lorsque la lumière n'est pas suffisante, chez l'épicéa, elles peuvent rester plusieurs années attachées sur le tronc. Ce phénomène forme alors des noeuds morts ou vicieux qui peuvent être encore plus dommageables pour la qualité du bois que les noeuds sains. Prendre en compte la hauteur de la première branche morte pourrait donc être intéressant afin de traduire les conditions de croissance précédentes ainsi que la proportion du tronc concernée par ces types de noeuds. Ces deux hauteurs combinées permettent ainsi d'améliorer l'état de la connaissance de la nodosité pour un arbre donné. Elles permettent aussi d'établir si une différence dans la formation des branches est observée entre la régénération naturelle et la plantation.

Concernant la mesure de la déformation à la base du tronc, comme expliqué précédemment, ce facteur ne semble pas être un bon élément pour estimer la qualité du bois. En effet, les mesures sont réalisées sur des arbres d'avenir, donc a priori peu déformés. Cependant, ce point a permis de mettre en évidence un élément de comparaison. L'augmentation de la circonférence à la base du tronc causée par la présence d'empatement semble plus importante en régénération naturelle qu'en plantation. Si tel est vraiment le cas, le volume exploitable pourrait être réduit. En effet, lors de la transformation, le volume des dosses serait plus important afin de purger ce défaut. Cet élément serait donc intéressant à quantifier. L'amélioration du protocole consiste à mesurer la circonférence de l'arbre à dix centimètres du sol à l'aide d'un mètre ruban afin de mettre en évidence l'importance des empacements en plantation et en régénération naturelle.

Enfin, une précision doit être apportée concernant le module d'élasticité. La manière dont il est calculé dans ce protocole est surtout indicative. Le module d'élasticité calculé dans ce travail ne correspond pas exactement au module d'élasticité réel. Cette méthode permet d'établir une comparaison entre la régénération naturelle et la plantation et n'a pas pour objectif d'exprimer rigoureusement la résistance du matériau. En effet, les composants du calcul, densité et vitesse de propagation d'une onde, ne sont mesurés que dans les derniers centimètres du bois. Les valeurs obtenues partent ainsi du principe que les caractéristiques du bois sont constantes de l'écorce au cœur de l'arbre. Cette hypothèse n'est vraisemblablement pas vérifiée. Il serait cependant intéressant de pouvoir mesurer le module d'élasticité de ces arbres une fois abattus afin d'analyser les valeurs réelles avec celles obtenues dans le protocole.

16 Perspectives pour des recherches ultérieures

Ce travail a permis de mettre en place un protocole de mesure de la qualité du bois d'épicéa sur pied de manière non destructive et d'estimer l'effort d'échantillonnage à prévoir. Un système d'encodage ainsi qu'un script pour l'analyse statistique ont aussi été mis au point. Tous les outils sont ainsi disponibles afin de réaliser la dernière étape de cette étude qui consiste à réaliser les mesures et réaliser la comparaison.

De plus, les facteurs choisis dans ce protocole pour évaluer la qualité du bois présentent l'avantage de ne pas être spécifique. Cette étude pourrait donc aussi être réalisée sur d'autres essences.

Une autre perspective à la suite à cette étude serait de comparer les mesures réalisées sur le terrain avec des mesures réalisées en laboratoire afin d'évaluer la précision du protocole. Cette comparaison permettrait aussi d'établir les relations entre les résultats

obtenus de manière non destructive sur pied avec des résultats obtenus sur les produits transformés (planches, etc.).

Cette étude a aussi permis de mettre en évidence que les travaux sylvicoles et la manière de conduire le peuplement peuvent avoir un impact plus important sur la qualité du bois que le type de régénérations. Réaliser une comparaison de la qualité du bois entre des futaies irrégulières et régulières permettrait d'approfondir les enseignements obtenus par ce travail et évaluer l'impact d'une méthode de sylviculture encore peu rependu en résineux en Belgique.

Références

- ALDERWEIRELD M., BURNAY F., PITCHUGIN M., LECOMTE H. [2015]. Inventaire forestier wallon. Résultats 1994 - 2012. *SPW, DGO3, DNF, Direction des Ressources forestières, Jambes* p. 236.
- AMARASEKARA H. [2002]. Effects of crown size on wood characteristics of Corsican pine in relation to definitions of juvenile wood, crown formed wood and core wood. *Forestry* **75** (1), 51–61.
- BARTHOD C., PIGNARD G., GUERIN F., BOUILLON-PENROIS E. [1999]. Coupes fortes et coupes rases dans les forêts françaises. *Revue Forestière Française* **51** (4), 469.
- BATES D., MAECHLER M., BOLKER B., WALKER S., HAUBO R., CHRISTENSEN B., SINGMANN H., DAI B., SCHEIPL F. [2020]. Linear mixed-effects model using "Eigen" and S4.
- BENOIT Y., LEGRAND B., TASTET V. [2008]. Eurocode 5 Calcul des structures en bois - Guide d'application.
- BÉRUBÉ DESCHÊNES A. [2016]. *Modélisation de la croissance et de la qualité du bois de l'épinette blanche (Picea glauca) à l'échelle individuelle en fonction de la compétition inter- et intra-spécifique* (PhD Thesis). Université du Québec à Rimouski, 93 p.
- BÉRUBÉ-DESCHÊNES A., FRANCESCHINI T., SCHNEIDER R. [2016]. Factors Affecting Plantation Grown White Spruce (*Picea Glauca*) Acoustic Velocity. *Journal of Forestry* **114** (6), 629–637.
- BEUCHER A., LINOT M., MACIEJEWSKI L., MAURICE J. [2008]. Le bois de compressio est-il nécessairement un défaut ?
- BRÜCHERT F., BECKER G., SPECK T. [2000]. The mechanics of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst] : mechanical properties of standing trees from different thinning regimes. *Forest Ecology and Management* **135** (1-3), 45–62.
- CARTER P., WANG X., ROBERT J. [2005]. Nondestructive testing of wood : NDE of logs and standing trees using new acoustic tools : technical application and results. *In : 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. 161–169.
- CHEN Z.Q., KARLSSON B., LUNDQVIST S.O., GARCÍA GIL M.R., OLSSON L., WU H.X. [2015]. Estimating solid wood properties using Pilodyn and acoustic velocity on standing trees of Norway spruce. *Annals of Forest Science* **72** (4), 499–508.

- CLAESSENS H. [2001]. Faut-il bannir la sylviculture de l'épicéa au nom de la gestion durable. *Forêt Wallonne* **49-50**, 36–44.
- CLAESSENS H., HÉBERT J., PONETTE Q. [2017]. Analyse de l'impact économique de la sylviculture « Pro Silva » Note de synthèse. *Technical report*, ULg Gembloux Agro-Bio Tech / UCL, 1–35 p.
- CLAIR B., VERNAY M., MARTIN P. [2014]. Quelques éclaircissements s'imposent ! Le bois de réaction.
- CNDB [2000]. Les classements d'aspect et d'utilisation en structure.
- CRPF [2020]. Comment classer les bois ? Les divers modes de classement.
- DESPONTS M., PERRON M., DEBLOIS J. [2017]. Rapid assessment of wood traits for large-scale breeding selection in *Picea mariana* [Mill.] B.S.P. *Annals of Forest Science* **74** (3), 53.
- DG03 [2013]. Circulaire n° 2718 relative aux mesures sylvicoles à suivre pour une gestion selon la sylviculture Pro Silva.
- DIACI J. [2006]. *Historical development of nature-based forestry in Central Europe : Alternatives to Industrial Forestry and Strict Preservation*. Ljubljana, Biotechnical Faculty, University of Ljubljana, 1–17 p.
- DONALDSON L. [2008]. Microfibril Angle : Measurement, Variation and Relationships – A Review. *IAWA Journal* **29** (4), 345–386.
- EVANS R. [2001]. Rapid prediction of wood stiffness from MFA and density.pdf. *Forest Products Journal* **51** (3), 53–57.
- FISCHER C., VESTØL G.I., ØVRUM A., HØIBØ O.A. [2015]. Pre-sorting of Norway spruce structural timber using acoustic measurements combined with site-, tree- and log characteristics. *European Journal of Wood and Wood Products* **73** (6), 819–828.
- FRISSON G., MONTY A., MAHY G. [2011]. L'adaptation au changement climatique en région wallonne : Fiche thématique Thème. *Ecores-Tec* 1–37.
- FUNDOVA I. [2011]. *In situ wood quality assessment in interior spruce* (PhD Thesis). University of British Columbia.

- GAGNÉ L., LAVOIE L., BINOT J.M. [2012]. Croissance et propriétés mécaniques du bois après éclaircie commerciale dans une plantation d'épinette blanche (*picea glauca*) âgée de 32 ans. *Canadian Journal of Forest Research* **42** (2), 291–302.
- GAO S., WANG X., BRASHAW B.K., ROSS R.J., WANG L. [2012]. Rapid assessment of wood density of standing tre with nondestructive methods - A review. *In : Proceedings of 2012 International Conference on Biobase Material Science and Engineering*. IEEE, 262–267.
- GHERARDI HEIN P.R., TARCÍSIO LIMA J. [2012]. Relationships between microfibril angle, modulus of elasticity and compressive strength in Eucalyptus wood. *Maderas. Ciencia y tecnología* **14** (ahead), 0–0.
- GINDL W. [2002]. Comparing mechanical properties of normal and compression wood in Norway spruce : The role of lignin in compression parallel to the grain. *Holzforschung* **56** (4), 395–401.
- GREAVES B., BORRALHO N., RAYMOND C., FARRINGTON A. [1996]. Use of a Pilodyn for the indirect selection of basic density in Eucalyptus nitens. *Canadian Journal of Forest Research* **26** (9), 1643–1650.
- GULDIN J.M., FITZPATRICK M.W. [1991]. Comparison of Log Quality from Even-Aged and Uneven-Aged Loblolly Pine Stands in South Arkansas. *Southern Journal of Applied Forestry* **15** (1), 10–17.
- GULLER B., GULLER A., KAZAZ G. [2012]. Is Resistograph an Appropriate Tool for the Annual Ring Measurement of Pinus Brutia? *Defektoskopie* 89–94.
- GÜNTEKIN E., AYDIN T.Y. [2016]. Prediction of bending properties for some softwood species grown in Turkey using ultrasound. *Wood Research* **61** (6), 993–1001.
- HANSEN C.P. [2000]. Application of the Pilodyn in forest tree improvement. *DFSC Series of Technical Notes TN55* (Danida Forest Seed Centre, Humlebaek, Denmark), 16.
- HÉBERT J. [2014]. Cours de science du bois, Gembloux Agro-Bio tech.
- HÉBERT J., HERMAN M., JOUREZ B. [2002]. *Sylviculture et qualité du bois de l'épicéa en Région Wallonne*. Forêt Wallonne asbl, 157 p.
- HÉBERT J., HERMAN M., JOUREZ B. [2003]. Sylviculture et qualité du bois de l'épicéa en Région Wallonne : recommandations pratiques. *Forêt Wallonne* **62** (1), 10–13.

- HERMAN M., DUTILLEUL P., AVELLA-SHAW T. [1999]. Growth Rate Effects on Intra-Ring and Inter-Ring Trajectories of Microfibril Angle in Norway Spruce (*Picea Abies*). *IAWA Journal* **20** (1), 3–21.
- IÇEL B., GÜLER G. [2016]. Nondestructive determination of spruce lumber wood density using drilling resistance (Resistograph) method. *Turkish journal of agriculture and forestry* **40** (6), 900–907.
- JAAKKOLA T., MÄKINEN H., SARANPÄÄ P. [2005]. Wood density in Norway spruce : changes with thinning intensity and tree age. *Canadian Journal of Forest Research* **35** (7), 1767–1778.
- JOHANSSON K. [1992]. Effects of initial spacing on the stem and branch properties and graded quality of *Picea abies* (L.) karst. *Scandinavian Journal of Forest Research* **7** (1-4), 503–514.
- JOUREZ B. [2011]. Cours d’anatomie et identification des bois, Gembloux Agro-Bio tech.
- JOUREZ B., DE WOUTERS P., BIENFAIT O. [2010]. Le classement des bois feuillus sur pied. *Silva Belgica* **117** (4), 1–12.
- JOZSA L., MIDDLETON G. [1994]. A discussion of wood quality attributes and their practical implications.
- JYSKE T., MÄKINEN H., SARANPÄÄ P. [2008]. Wood density within Norway spruce stems. *Silva Fennica* **42** (3), 439–455.
- KLANG F., EKÖ P.M. [1999]. Tree Properties and Yield of *Picea abies* Planted in Shelterwoods. *Scandinavian Journal of Forest Research* **14** (3), 262–269.
- KRAJNC L. [2019]. *The influence of silvicultural practices on mechanical properties of softwood timber* (PhD Thesis). The National University of Ireland Galway.
- KRAJNC L., FARRELLY N., HARTE A.M. [2019]. The influence of crown and stem characteristics on timber quality in softwoods. *Forest Ecology and Management* **435** (September 2018), 8–17.
- KUZNETSOVA A., BROCKHOFF P.B., CHRISTENSEN R.H.B. [2017]. lmerTest Package : Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software* **82** (13).
- LAIHO O., LAHDE E., PUKKALA T. [2011]. Uneven- vs even-aged management in Finnish boreal forests. *Forestry* **84** (5), 547–556.

- LAUNAY J., ROZENBERG P., PAQUES L., DEWITTE J.M. [2000]. A new experimental device for rapid measurement of the trunk equivalent modulus of elasticity on standing trees. *Annals of Forest Science* **57** (4), 361–359.
- LAYON J., HEYNINCK C., CLAESSENS H. [2013]. L'exploitation des mises à blanc résineuses sur cloisonnements et lit de branches pour protéger la capacité productive des sols forestiers et maîtriser les coûts de reboisement. *Forêt Wallonne* **122** (janvier/février), 44–54.
- LEGG M., BRADLEY S. [2016]. Measurement of stiffness of standing trees and felled logs using acoustics : A review. *The Journal of the Acoustical Society of America* **139** (2), 588–604.
- LINDSTRÖM H. [1996a]. Basic density in Norway spruce. Part I. A literature review. *Wood and Fiber Science* **28** (1), 15–27.
- LINDSTRÖM H. [1996b]. Basic density of Norway spruce. Part II. predicted by stem taper, mean growth ring width, and factors related to crown development. *Wood and Fiber Science* **28** (2), 240–251.
- LINDSTRÖM H., REALE M., GREKIN M. [2009]. Using non-destructive testing to assess modulus of elasticity of *Pinus sylvestris* trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* **24** (3), 247–257.
- LIU C., ZHANG S., CLOUTIER A., RYCABEL T. [2007]. Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics. *Forest Ecology and Management* **242** (2-3), 648–655.
- MACDONALD E., GARDINER B. [2005]. the Implications of Transformation To Continuous Cover Forestry Systems for Conifer Timber Quality and Log Supply in the Uk. *Technical report* November, Forest research, 1–106 p.
- MACDONALD E., GARDINER B., MASON W. [2010]. The effects of transformation of even-aged stands to continuous cover forestry on conifer log quality and wood properties in the UK. *Forestry* **83** (1), 1–16.
- MANSFIELD S.D., PARISH R., OTT P.K., HART J.F., GOUDIE J.W. [2016]. Assessing the wood quality of interior spruce (*Picea glauca* × *P. engelmannii*) : variation in strength, relative density, microfibril angle, and fiber length. *Holzforschung* **70** (3), 223–234.

- MOORE J., ACHIM A., LYON A., MOCHAN S., GARDINER B. [2009]. Effects of early re-spacing on the physical and mechanical properties of Sitka spruce structural timber. *Forest Ecology and Management* **258** (7), 1174–1180.
- NOLET P., KNEESHAW D., MESSIER C., BÉLAND M. [2018]. Comparing the effects of even- and uneven-aged silviculture on ecological diversity and processes : A review. *Ecology and Evolution* **8** (2), 1217–1226.
- OEWB [2019]. panorabois.
- ØVRUM A. [2013]. In-forest assessment of timber stiffness in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *European Journal of Wood and Wood Products* **71** (4), 429–435.
- PAMERLEAU-COUTURE É., ROSSI S., POTHIER D., KRAUSE C. [2019]. Wood properties of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) in relation to ring width and tree height in even- and uneven-aged boreal stands. *Annals of Forest Science* **76** (2), 43.
- PETIT S., CLAESSENS H. [2013]. La régénération naturelle des douglasiaies a le vent en poupe. Le point sur les itinéraires techniques existants. *Forêt Wallonne* **126**, 40 – 52.
- PIISPANEN R., HEIKKINEN J., VALKONEN S. [2020]. Deformations of boards from uneven-aged Norway spruce stands. *European Journal of Wood and Wood Products* **78** (3), 533–544.
- PIISPANEN R., HEINONEN J., VALKONEN S., MÄKINEN H., LUNDQVIST S.O., SARANPÄÄ P. [2014]. Wood density of Norway spruce in uneven-aged stands. *Canadian Journal of Forest Research* **44** (2), 136–144.
- PIRI T. [1996]. The spreading of the S type of *Heterobasidion annosum* from Norway spruce stumps to the subsequent tree stand. *European Journal of Forest Pathology* **26** (4), 193–204.
- PIRI T. [2003]. Early development of root rot in young Norway spruce planted on sites infected by *Heterobasidion* in southern Finland. *Canadian Journal of Forest Research* **33** (4), 604–611.
- PIRI T., KORHONEN K. [2001]. Infection of advance regeneration of Norway spruce by *Heterobasidion parviporum*. *Canadian Journal of Forest Research* **31** (6), 937–942.
- PRETZSCH H. [2014]. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management* **327**, 251–264.

- PRETZSCH H., RAIS A. [2016]. Wood quality in complex forests versus even-aged monocultures : review and perspectives. *Wood Science and Technology* **50** (4), 845–880.
- PRÉVOT C., PETIT S. [2019]. T 'as de beaux nœuds tu sais! Retour de formation sur la qualité des bois. *Forêt.Nature* **32** (0), 60–65.
- PU S. [2017]. *Evaluation of non-destructive test methods for predicting the static bending stiffness and strength properties of thermally modified timber* (PhD Thesis). Linnaeus University, 46 p.
- P.W [2020]. CRI : Commission de l'environnement, de la nature et du bien-être animal. *Technical report*, Parlement wallon, 58 p.
- RUDNICKI M., WANG X., ROSS R.J., ALLISON R.B., PERZYNSKI K. [2017]. Measuring wood quality in standing trees—a review. *Technical report* October, United States Department of Agriculture, 11 p.
- SCHIMLECK L., DAHLEN J., APIOLAZA L.A., DOWNES G., EMMS G., EVANS R., MOORE J., PÂQUES L., VAN DEN BULCKE J., WANG X. [2019]. Non-Destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us about Wood Property Variation. *Forests* **10** (9), 728.
- SEELING U. [2001]. Transformation of plantation forests — expected wood properties of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) within the period of stand stabilisation. *Forest Ecology and Management* **151** (1-3), 195–210.
- TEAM R.C. [2018]. A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- THIBAUT K., COLSON V., LECOMTE H., CLAESSENS H. [2007]. Etat des lieux et perspectives du pin sylvestre en Wallonie. *Forêt Wallonne* **87**, 7–19.
- VEGA A., DIESTE A., GUAITA M., MAJADA J., BAÑO V. [2012]. Modelling of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. structural timber by a combination of non-destructive variables and visual grading parameters. *European Journal of Wood and Wood Products* **70** (6), 839–844.
- VESTØL G.I., HØIBØ O.A. [2001]. Prediction of knot diameter in *Picea abies* (L.) Karst. *Holz als Roh- und Werkstoff* **59** (1-2), 129–136.
- VÍTKOVÁ L., DHUBHÁIN Á. [2013]. Transformation to continuous cover forestry : a review. *Irish Forestry* **70** (1-2), 119–140.

- WANG X. [2013]. Acoustic measurements on trees and logs : a review and analysis. *Wood Science and Technology* **47** (5), 965–975.
- WANG X., ROSS R.J., MATTSON J.A., ERICKSON J.R., FORSMAN J.W., GESKE E.A., WEHR M.A. [2001]. Several Nondestructive Evaluation Techniques for Assessing Stiffness and MOE of Small- Diameter Logs. *Forest Products Journal*. **52** (79-85), 12.
- WIKBERG P.E. [2004]. *Occurrence , Morphology and Growth of Understory Saplings in Swedish Forests* (PhD Thesis). Swedish University of Agricultural Science Umea, 1–25 p.
- WILSON E., TUAMA P.O., SPAZZI J. [2020]. Continuous Cover Forestry in Ireland : update on recent developments and initiatives. *Continuous Cover Forestry Group CCFG Newsl* (41), 71–77.
- WIMMER R., DOWNES G.M. [2003]. Temporal variation of the ring width–wood density relationship in norway spruce grown under two levels of anthropogenic disturbance. *IAWA Journal* **24** (1), 53–61.
- WIMMER R., JOHANSSON M. [2014]. Effects of Reaction Wood on the Performance of Wood and Wood-Based Products. In : Gardiner B., Barnett J., Saranpää P., Gril J. (edit). *The Biology of Reaction Wood* (vol. 56). Springer, springer s edition, 225–248.
- ZEILEIS A., HOTHORN T. [2002]. Diagnostic Checking in Regression Relationships. *R News* **2** (3), 7–10.
- ZUUR A.F., IENO E.N., WALKER N., SAVELIEV A.A., SMITH G.M. [2009]. *Mixed effects models and extensions in ecology with R* (vol. 84 of *Statistics for Biology and Health*). New York, NY, Springer New York, 579 p.