AgroParisTech

NNT: 2021AGPT0025

THESE DE DOCTORAT

pour obtenir le grade de

Docteur d'AgroParisTech

Spécialité : Biologie et écologie des forêts et agrosystèmes

École doctorale n°607

Sciences et Ingénierie des Ressources Naturelles (SIReNa)

par

Rodolphe BAUER

La modélisation du volume des compartiments riches en composés chimiques extractibles (écorce et nœud) dans six essences d'intérêt des régions Grand-Est et Bourgogne Franche-Comté.

Directeur de thèse : **Francis COLIN**

Thèse présentée et soutenue à Nancy, le 14/12/21

Composition du jury :

Philippe GÉRARDIN, Professeur, Université de Lorraine	Président
Adeline FAYOLLE, Enseignante (équiv. HDR), Université de Liège	Rapporteur & Examinatrice
Mathieu FORTIN, Chercheur scientifique (HDR), Canadian Wood Fibre Centre	Rapporteur & Examinateur
Anélie PETRISSANS, Maître de conférences, Université de Lorraine	Examinatrice
Sebastian HEIN, Professeur, Hochschule für Forstwirschaft Rottenburg	Examinateur
Francis COLIN, Directeur de Recherche, INRAE	Directeur de thèse
Frédéric MOTHE, Encadrant rapproché de thèse, INRAE	Co-encadrant & Invité

UMR Silva
INRAE Centre Grand EST – Route d'Amance – 54280 Champenoux

Remerciements

Au début du rapport de cette thèse, j'aimerais présenter mes remerciements. Tout d'abord aux membres du jury Adeline Fayolle, Mathieu Fortin, Anélie Petrissans, Philippe Gérardin, Sebastian Hein et Frédéric Mothe qui ont bien accepté de critiquer et d'évaluer le travail effectué dans cette thèse. Mes remerciements vont aussi évidemment à Francis Colin qui a monté le projet ExtraFor_Est, réuni les fonds nécessaires et donc sans qui ce travail n'aurait pu avoir lieu. Merci de m'avoir choisi et de m'avoir fait confiance pour ce travail.

Merci Francis pour ton encadrement, ton aide lorsque j'en avais besoin, tes remarques sur mon écriture et même tes remontrances quand j'en avais besoin. Merci de m'avoir aidé et accompagné pendant ces quatre années de travail. Mes remerciements vont aussi à Fleur Longuetaud. Merci Fleur d'avoir été toujours là, spécialement pour tous ce qui concernait les travaux de modélisation, pour tes corrections sans fin sur tous mes rapports et pour ta rage de vivre quotidienne. Je remercie aussi tout particulièrement Frédéric Mothe. Merci Fred pour ta patience, ta force tranquille, pour la rapidité de tes réponses à toutes mes questions et aussi de tes corrections vis-à-vis de mes rapports.

Le travail de cette thèse se basant quasiment intégralement sur l'exploitation de la base de données gérée par le FCBA, je tiens particulièrement à remercier Alain Bouvet. Merci Alain pour le temps que tu as mis afin de me permettre de prendre en main ces (nombreuses) données, pour tes remarques constructives notamment sur les calculs des proportions d'écorce et pour ton aide lors des différents comités. Je remercie aussi ici Christine Deleuze, Philippe Lejeune et Laurent Saint-André. Merci à vous trois pour m'avoir suivi dans le comité, pour m'avoir recadré quand je partais dans les mauvaises directions pendant mes recherches et pour vos conseils notamment dans la rédaction des articles. Merci aussi à Philippe Saintenoise et Pierre Montpied pour votre aide lors de l'écriture du premier article, pour m'avoir appris à utiliser les tests statistiques et à gérer l'hétéroscédasticité des données.

La partie nœuds de cette thèse s'est basée sur deux échantillonnages qui ont eu lieu dans le cadre de ce projet et du projet MODELFOR. Je tiens donc à remercier tout ceux qui ont participé à l'échantillonnage d'ExtraFor_Est, Antoine Billard pour la mise au point du protocole d'échantillonnage, Vincent Rousselet, Frédéric Bordat Loïc Dailly et Adrien Contini pour leur précieuse aide dans la collecte des échantillons. Merci aussi à Francis, Fleur et Fred d'y avoir participé et de nous avoir donné un sacré coup de main. Merci à Charline Mola ensuite pour le scan de ces échantillons, ce qui représente une masse de travail assez impressionnante ! Merci à Adrien, pour s'être occupé du séchage des échantillons, nous épargnant ainsi une lourde tâche chronophage. Merci aussi à Hakima Ammour pour son aide sur le recensement des échantillons. Merci à Daniel Rittié et Adeline Motz pour les mesures optiques effectuées sur les rondelles de tronc.

Merci enfin à tout ceux qui m'ont accompagné durant cette thèse et qui ont fait de ces

quatre années un grand plaisir. Merci donc tout particulièrement à Antoine Billard et Rémi Decelle mes deux compagnons de thèse. Merci à vous deux pour ces grands moments de rires, de débats, de soutien, d'entraide, de camaraderie, de randonnées, de jeu... Un très grand merci à vous deux, vous avez su me supporter pendant toutes ces années et déjà cela n'est pas une mince affaire. J'espère vraiment que l'on pourra continuer des projets ensemble !

Merci aussi à tout le groupe de doctorant (La Beer Team), Clara Tallieux, Anna Schmitt, Soline Martin-Blangy, Sarah-Louise Filleux, Lucie Dietz, Sandrine Breteau-Amores et Baptiste Kerfrieden. Merci à vous tous pour votre bonne humeur, votre soutien dans les moments difficiles, les soirées, les jeux, les chalets, les fêtes... Vraiment dommage que l'on ait pas pu faire les pots de thèse selon la tradition mais on sait très bien que l'on pourra fêter toutes ces soutenances avec la dignité qui leur revient !

Merci aussi à mes collègues du B', Philippe Jacquin et Maxime Lacarin pour les pauses cafés, les anedoctes de voisins et de voiture, les soirées entre collègues et toute la bonne ambiance que vous avez mis dans ce bâtiment.

Merci aussi à tout ceux qui furent de passage chez nous, Adam, Chloé, Lucie, Lépolod, Hakima, Tojo, Léa, Lou, Annaëlle d'être venu égailler de votre présence ces bureaux peut-être un peu trop grands.

Un grand merci aussi à toutes les collègues de INRAE qui m'ont aidé, pour les parties administratives ou plus techniques, Nathalie Bisseux, Adeline Vuillaume, Manon Malik, Étienne Farre, Corinne Martin, Jana Dlouha, François Ningre, Alain Mercanti et Michèle Besançon.

Enfin merci à mes parents de m'avoir aussi soutenu dans cette épreuve et à ma fiancée de m'avoir supporté pendant les mois que j'ai passés chez elle à rédiger ce manuscrit ainsi que pour sa relecture attentive.

Merci à tous d'avoir contribué au succès de ce travail, quelle que fut votre contribution, c'est aussi grâce à vous que je suis arrivé au bout. Merci beaucoup !

Liste d'articles et posters réalisés durant la thèse

Articles dans des revues internationales à comité de lecture

Bauer, R., Billard, A., Mothe, F., Longuetaud, F., Houballah, M., Bouvet, A., Cuny, H., Colin, A., & Colin, F., 2021. Modelling bark volume for six main tree species in France : Assessment of models and application at regional scale. *Annals of Forest Science* (accepté).

Billard, A., Bauer, R., Mothe, F., Jonard, M., Colin, F., & Longuetaud, F., 2020. Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components. *Annals of Forest Science*, 77(4), 1-18.

Billard, A., Bauer, R., Mothe, F., Colin, F., Deleuze, C., & Longuetaud, F., 2021. Vertical variations in wood basic density for two softwood species. *European Journal of Forest Research*, 1-16.

Pichancourt, J. -B., Bauer, R., Billard, A., Brennan, M., Caurla, S., Colin, A., Contini, A., Cosgun, S., Cuny, H., Dumarçay, S., Fortin, M., Gérardin, P., Hentges, D., Longuetaud, F., Richard, B., Wernsdorfer, H., & Colin, F.. A generic information framework for decision-making in a forest-based bio-molecular economy. *Annals of Forest Science* (accepté).

Communications orales

Bauer, R., Billard, A., Longuetaud, F., Mothe, F., & Colin, F., 2019. Modelling the volume of bark from thickness measurement obtained by swedish gauge- Application to the quantification of extractives. *21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium NDTE*, 24, 25, 26 et 27 septembre, Fribourg-en-Brisgau, Allemagne.

Billard, A., Bauer, R., Mothe, F., Colin, F., & Longuetaud, F., 2019. Wood Density variations between tree components should be considered to correctly estimate tree biomass available for different uses. *21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium NDTE*, 24, 25, 26 et 27 septembre, Fribourg-en-Brisgau, Allemagne.

Posters

Bauer, R., Billard, A., Longuetaud, F., Mothe, F., Bouvet, A., & Colin, F., 2019. Étude et modélisation des volumes des écorces. *8èmes journées du GDR 3544 Sciences du bois*, 18, 19 et 20 novembre, ENSTIB, Épinal, France.

Billard, A., Colin, F., Mothe, F., Bauer, R., & Longuetaud, F., 2019. Pour une valorisation optimisée de la biomasse forestière tenant compte de la variabilité de la masse volumique du bois dans l'arbre : cas du sapin pectiné. *8èmes journées du GDR 3544 Sciences du bois*, 18, 19 et 20 novembre, ENSTIB, Épinal, France.

Table des matières

Introduction **9**

1 Généralités **11**
1.1 Les services écosystémiques de la forêt 11
1.1.1 La forêt comme source de bois d'œuvre et de bois d'industrie 12
1.1.2 La forêt comme puits de carbone 12
1.1.3 La forêt comme source d'énergie 12
1.1.4 La forêt comme lieu de biodiversité, de loisir et de détente 13
1.1.5 La forêt comme régulateur climatique 13
1.1.6 La forêt comme source de molécules d'intérêts 14
1.1.7 Les conflits entre les différents services 15
1.2 La filière forêt-bois 15
1.2.1 La récolte de bois et l'approvisionnement des unités de la première transformation 15
1.2.2 La production des connexes et leur valorisation 16
1.2.3 La situation économique de la filière forêt-bois 16
1.2.4 Une filière chimie à construire 17
1.2.5 Les conflits d'usage du bois 17
1.3 La ressource française 18
1.4 Objectifs et problématique 19

2 Etat de l'art **21**
2.1 La variabilité intraspécifique 21
2.1.1 Variabilité entre arbre 21
2.1.2 Variabilité entre compartiments 22
2.1.3 Variabilité intra-compartiment 23
2.2 Le calcul des volumes des différents compartiments 23
2.3 L'écorce 25
2.3.1 L'écorce dans l'arbre 25
2.3.2 Les méthodes de mesure de l'épaisseur d'écorce 27
2.4 Les modèles de profils d'écorce 30
2.4.1 Intérêt d'un modèle de profil d'écorce 30
2.4.2 Modèles de la littérature 30

2.5 Les nœuds . . . 31
2.5.1 Le nœud dans l'arbre . . . 31
2.5.2 Les modèles de volume des nœuds . . . 34
2.6 Les extractibles . . . 35
2.6.1 Définition d'un extractible . . . 35
2.6.2 Les différents types d'extractibles . . . 36
2.6.3 Les extractibles des écorces . . . 39
2.6.4 Les extractibles des nœuds . . . 39

3 Méthodologie **41**
3.1 Campagne de mesure . . . 42
3.1.1 Protocole d'abattage des arbres . . . 42
3.1.2 Protocole de passage au scanner . . . 44
3.2 Données déjà disponibles . . . 45
3.2.1 Présentation des données EMERGE . . . 45
3.2.2 Présentation des données IGN . . . 45
3.2.3 Présentation des données Modelfor . . . 46
3.2.4 Présentation des données de mesure optique . . . 47
3.3 Détourage des images scannées . . . 48
3.3.1 Présentation de Gourmand et CalDenQB . . . 48
3.3.2 Le détourage des nœuds . . . 50
3.3.3 Le détourage des écorces . . . 52
3.4 La méthode de modélisation . . . 53
3.4.1 Fonctions utilisées dans R . . . 53
3.4.2 Effets fixes/effets aléatoires . . . 54
3.4.3 Mise en évidence de l'influence des variables arbres . . . 54
3.4.4 Gestion de l'hétéroscédasticité . . . 55
3.5 La propagation des erreurs . . . 57
3.6 La statisiques d'ajustement des modèles . . . 58
3.6.1 Le coefficient de corrélation . . . 58
3.6.2 RMSE et RMSErel . . . 59
3.6.3 AIC . . . 59
3.7 Les modèles d'épaisseur d'écorce à 1m30 . . . 60
3.8 Les modèles de volume d'écorce . . . 60
3.9 Les modèles de profil d'écorce . . . 64
3.10 Les modèles de volume de nœuds . . . 68

4 Premier article : les modèles de volume **71**
4.1 Présentation de l'article . . . 71
4.2 Abstract . . . 73
4.3 Introduction . . . 73
4.4 Materials and Methods . . . 75
4.4.1 Datasets . . . 76

4.4.2 Calculating the bark volume . . . 79
4.4.3 $BTBH$ modelling . . . 80
4.4.4 Bark volume models . . . 81
4.4.5 Statistical methods . . . 83
4.4.6 Propagation of measurement error (PME) for Norway spruce . . . 84
4.4.7 Consistency of our model predictions with proportions of bark on over-bark trunk volume . . . 84
4.5 Results . . . 85
4.5.1 $BTBH$ modelling . . . 85
4.5.2 Models of B_v . . . 88
4.5.3 Application of BTBH and Bv models to NFI data to estimate bark resources at regional scale . . . 90
4.6 Discussion . . . 92
4.6.1 Accuracy of measurements . . . 92
4.6.2 Model application . . . 93
4.6.3 Comparison of $BTBH$ models . . . 93
4.6.4 Altitude effect . . . 93
4.6.5 Comparison of B_v models . . . 94
4.6.6 Comparison of B_p . . . 95
4.7 Conclusion . . . 95
4.8 Perspectives suite à l'article . . . 101

5 Article 2 : Modèles de variation longitudinal de la surface d'écorce. 102
5.1 Présentation de l'article . . . 102
5.2 Abstract . . . 104
5.3 Introduction . . . 104
5.4 Materials and Methods . . . 106
5.4.1 Dataset . . . 107
5.4.2 Calculation of bark area . . . 108
5.4.3 Models of bark profiles from the literature . . . 108
5.4.4 Alternative bark area profile model . . . 110
5.4.5 Statistical methods . . . 110
5.4.6 Propagation of measurement error : PME . . . 111
5.5 Results . . . 112
5.6 Discussion . . . 118
5.6.1 Effect of measurement accuracy : Norway spruce case . . . 118
5.6.2 The three best models . . . 118
5.6.3 Variation between the species . . . 119
5.7 Conclusion . . . 120
5.8 Perspectives . . . 120

6 Résultats non publiés **122**
6.1 Comparaison des protocoles de détourage de nœuds 122
6.2 Proportion de nœuds dans la tige 122
6.3 Modélisation du volume de nœuds 123

7 Discussion **129**
7.1 Protocoles de détourage de nœuds 129
7.2 Proportion de nœuds 130
7.3 Modèles de volume de nœuds 130
7.4 Modèles d'épaisseur, de surface et de volume d'écorce 131
7.4.1 Précision des mesures 131
7.4.2 L'efficacité des modèles de volume d'écorce 132
7.4.3 Les modèles de surface d'écorce 133
7.5 Calcul des volumes d'écorce 133

8 Conclusion générale et perspectives **135**
8.1 Rappel des résultats 135
8.2 Perspectives 136

Introduction

Dans ce manuscrit, nous allons décrire le travail qui a été réalisé dans le cadre de ma thèse intitulée : « La modélisation du volume des compartiments riches en composés chimiques extractibles (écorce et nœud) dans six essences d'intérêt des régions Grand-Est et Bourgogne Franche-Comté. ». Cette thèse s'inscrit dans un projet plus large nommé ExtraFor_Est. Celui-ci a été construit dans l'optique de quantifier les extractibles en fonction des différents compartiments de l'arbre (aubier, duramen, écorce, nœuds, branches). Le projet ExtraFor_Est vise à associer différentes études sur les concentrations en extractibles, sur les densités et sur les volumes des différents compartiments de l'arbre riches en ces extractibles. Ces études permettent de faire une estimation en quantité des extractibles exploitables et de les assembler dans un outil d'aide à la décision. Cela permet de voir à quel endroit dans la filière ils augmenteraient la rentabilité et quelles pratiques devraient se diffuser dans la filière afin de pouvoir exploiter cette nouvelle ressource. Le projet contribue donc à la mise au point de manière plus globale d'une bioéconomie durable. En évaluant la quantité d'extractibles cela permettra en effet d'estimer la capacité du pays à s'approvisionner de manière durable en molécules pour la chimie fine.

Le premier chapitre de cette thèse présentera la forêt et la filière bois. Cela nous permettra de décrire le contexte dans lequel prend place le projet ExtraFor_Est.

Le deuxième chapitre de cette thèse montrera l'état de l'art des connaissances actuelles sur la modélisation des volumes de nœuds et d'écorce ainsi que sur les mesures nécessaires pour obtenir les données.

Le troisième chapitre décrira la méthodologie de l'ensemble des recherches menées à bien pendant le temps alloué à ce travail.

Les quatrième et cinquième chapitres exposeront les deux articles issus des travaux menés.

Le sixième chapitre donnera un aperçu des résultats obtenus dans le cadre de cette thèse mais qui n'ont pu être publiés.

Le septième chapitre discutera les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse.

Enfin dans un dernier chapitre, nous tirerons les conclusions de ce travail et les suites à envisager.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Les services écosystémiques de la forêt

D'après la Food and Agricultural Organization (FAO), une forêt est définie de la manière suivante : "Terre occupant une superficie de plus de 0,5 hectares avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à 5 mètres et un couvert forestier de plus de 10 pour cent, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils *in situ*. Sont exclues les terres à vocation agricole ou urbaine prédominante." (FAO, 2020). Mais plus que simplement un ensemble d'arbres, la forêt est aussi un écosystème complexe exploité par l'être humain depuis la préhistoire (Arnould, 2002) pour ses ressources en gibier, en fruits et plus tard en bois et comme source de terres agricoles. Un arbre est défini par la FAO de la manière suivante : "Plante ligneuse pérenne avec une seule tige principale ou, dans le cas d'un taillis, avec plusieurs tiges présentant une cime plus ou moins distincte" (FAO, 2020). Le bois est donc une caractéristique principale de l'arbre. En effet, selon la norme NF B 50-003, le bois se définit de la façon suivante : "un ensemble de tissus résistants secondaires (de soutien, de conduction, et de mise en réserve) qui forment les troncs, branches et racines des plantes ligneuses. Issu du fonctionnement du cambium périphérique, il est situé entre celui-ci et la moelle". Les tissus résistants secondaires sont appelés xylème secondaire et sont caractérisés par leur capacité à produire des vaisseaux de xylème secondaire. Le xylème secondaire est un xylème qui se différencie du xylème primaire par sa provenance : il est issu de la différenciation des cellules du méristème secondaire, le cambium ou assise libéro-ligneuse (Trouy, 2015). Les cellules de xylème secondaire ont une paroi composée principalement de trois polymères différents, la cellulose, les hémi-celluloses et la lignine. Ces cellules forment le bois. Il peut s'y retrouver des molécules de petite taille comparativement à ces trois premières, appelées extractibles (Holmbom, 1999).

Il n'est plus possible d'envisager la forêt comme uniquement une ressource en bois pour différents usages. La forêt rend bien d'autres services dits écosystémiques qu'il est nécessaire de rappeler afin de bien resituer le service de fourniture de bois.

1.1.1 La forêt comme source de bois d'œuvre et de bois d'industrie

L'association des vaisseaux de xylème en série donne des fibres, les fibres de bois. Ce matériau va ensuite pouvoir être utilisé dans différentes applications. Le bois peut servir de matériau de construction (Natterer, 2004). Cette utilisation est attestée depuis longtemps, au néolithique (Salanova and Sohn, 2012; Yartah, 2004), en Syrie à l'âge du bronze (Amorós, 2013) ou encore chez les Romains (Adam, 1984; Clément et al., 2019). En effet, grâce à ses propriétés mécaniques remarquables, le bois est un matériau résistant qui convient à de nombreuses activités, construction, ameublement, emballage, construction navale, etc... Le bois peut aussi être utilisé pour la production de produits dérivés comme les panneaux de particules (Jaudon, 1970), les panneaux de fibres (Voreux, 1987), les panneaux de lamelles orientées (OSB) (Masson and Trouy-Triboulot, 2003) ou bien du bois lamellé-collé (Crubilé, 1972) après association avec de la colle. Ces différents produits dérivés du bois lui donnent une capacité d'utilisation dans de nombreux usages différents, tels l'ameublement, les constructions de grandes structures ou les nouvelles architectures des maisons bois. Enfin, le bois peut être utilisé comme base pour fabriquer de la pâte à papier (Venet, 1954).

1.1.2 La forêt comme puits de carbone

La forêt est aussi une réserve de carbone (Richards and Stokes, 2004). En effet, le bois est composé environ à 50% en masse de carbone (Trouy, 2015). Grâce à la photosynthèse, l'arbre transforme le dioxyde de carbone en trioses (Blankenship, 2014) en utilisant l'eau qu'il pompe dans le sol et l'énergie lumineuse qu'il capte dans ses feuilles. Ces trioses seront ensuite en partie utilisés afin de synthétiser les molécules constitutives du bois (cellulose, lignine et hémicellulose). L'arbre peut donc, de ce point de vue, être considéré comme un transformateur du carbone qui fait passer celui-ci du stock atmosphérique au stock biomassique. Malhi et al. (2002) évaluent que, tous types confondus, la forêt mondiale stocke 53 % du carbone contenu dans les écosystèmes terrestres. Une partie de ce carbone est stockée non pas directement dans la biomasse forestière mais dans le sol. Ce stockage souterrain est dû à deux mécanismes, l'humification des produits de l'arbre (écorce, feuille) et la photosynthèse des bactéries du sol (Sedjo and Sohngen, 2012). Le carbone ainsi stocké peut être relâché via la décomposition des arbres ou bien leur combustion. En revanche, ce carbone peut être séquestré plus longtemps grâce à des utilisations longue durée du bois comme l'ameublement ou le bois-construction (Gorte, 2009). Cela fait donc de la forêt un acteur majeur dans la lutte contre le changement climatique.

1.1.3 La forêt comme source d'énergie

Le bois étant composé de molécules carbonées peu oxydées (Trouy, 2015), il peut subir une oxydation. C'est une réaction chimique qui va opérer un échange d'électrons entre un réducteur (les molécules du bois) et un oxydant (généralement l'oxygène), transformant ainsi les molécules. Cette réaction produit principalement de l'eau et du CO_2 ainsi que de l'énergie, c'est la combustion (Borghi and Destriau, 1995). Le bois peut être utilisé directement

comme source de chaleur ou servir à produire de l'électricité dans des centrales spécifiques dites de co-génération (Pinta, 2003). Le bois-énergie se présente principalement sous forme de bûches, de plaquettes forestières ou de granulés (Bontoux, 2009). Ces produits peuvent être utilisés par des particuliers, particulièrement les bûches et les granulés ; ces derniers peuvent également alimenter des chaudières automatiques assurant un confort à l'usage. Les plaquettes forestières vont, quant à elles, être brûlées au sein de chaufferies collectives. Ce type de chaufferie a de grands avantages en termes de coût et d'économie d'énergie (Bontoux, 2009). De plus les compartiments de l'arbre peu valorisables autrement peuvent toujours l'être selon cette utilisation, par exemple les écorces (Pasztory et al., 2016) ou les sciures issues des découpes du bois (Koponen et al., 2015). En France, la production de bois-énergie en forêt est essentiellement issue des taillis ou des taillis-sous-futaie plutôt que des futaies (Landmann et al., 2011).

1.1.4 La forêt comme lieu de biodiversité, de loisir et de détente

Les forêts sont un formidable espace de biodiversité. En France métropolitaine, 24% des espèces végétales, plus d'un tiers des insectes et 38% des vertébrés vivent en forêt (Vallauri and Neyroumande, 2009). Cette biodiversité dépend largement de la gestion sylvicole. Une gestion forestière entièrement tournée vers la production de bois aura un impact négatif sur la biodiversité tandis qu'une sylviculture réduisant les plantations et homogénéité des peuplements aura un impact positif (Pernot, 2012). Découlant de cette biodiversité, la forêt est aussi un lieu propice à l'activité de chasse (Guiraud, 1981). En France, la Fédération Nationale des Chasseurs revendique 1,03 million de pratiquants (FNC, 2020). La forêt est aussi un lieu de loisirs pour la population qui ne chasse pas. Selon Granet and Dobré (2009), 71% des français (en 2004) se sont rendus au moins une fois dans l'année en forêt même si une baisse a été observée pendant la décennie précédente. La forêt est pour les personnes qui s'y promènent avant tout un espace de détente, de calme, de purification et de contact avec la nature.

1.1.5 La forêt comme régulateur climatique

Outre ses rôles productifs et sociaux, la forêt est aussi un formidable régulateur des paramètres climatiques. Grâce au travail de filtration des plantes, c'est un purificateur de l'air (Song et al., 2016). L'air de la forêt est moins pollué que l'air des environs, particulièrement de la ville (Bottalico et al., 2017). D'ailleurs selon Vieira et al. (2018) la présence d'espaces forestiers en ville comme les parcs, permet d'améliorer la qualité de l'air, notamment en diminuant la concentration en ozone et des microparticules. La forêt joue aussi un rôle de régulateur de l'eau dans l'atmosphère et le sol (Krieger, 2001). Deux mécanismes agissent en ce sens. L'évapotranspiration renvoie dans l'atmosphère une partie de l'humidité stockée dans le sol ce qui va provoquer de nouvelles pluies (Shukla and Mintz, 1982). De plus les plantes agissent en tant que rétenteurs d'eau (Myers, 1996) ce qui ralentit d'autant l'écoulement de l'eau. Ces deux mécanismes régulent la quantité d'eau qui ruisselle, diminuant le risque de crue et de sécheresse. La forêt contrôle aussi la qualité de l'eau (Fiquepron et al., 2013;

Vincent et al., 2016) en diminuant l'érosion du sol grâce aux racines qui maintiennent le sol en place (Myers, 1996). De plus, la présence d'un système racinaire profond et d'un humus avec une abondante micro et macro-faune augmente la porosité du sol et sa conductivité hydraulique ce qui permet de diminuer le ruissellement de surface et donc d'augmenter la filtration par le sol de ces eaux (Neary et al., 2009).

Enfin, la forêt est aussi un tampon climatique. Shukla et al. (1990) ont montré qu'une déforestation de la forêt amazonienne pourrait conduire à une augmentation de la température locale moyenne de plus de 2.5°C. La variation d'albédo qu'elle entraîne par rapport à une plaine, contribue à ce rôle (Lutz and Howarth, 2014). Au contraire, la forêt boréale tend, elle, à favoriser l'augmentation des températures en ayant un albédo moins élevé que celui de la neige (Bonan et al., 1992).

1.1.6 La forêt comme source de molécules d'intérêts

Les végétaux forestiers présentent une grande diversité de molécules. Considérant l'importance de leur biomasse, les arbres en sont un grand pourvoyeur. Ces molécules peuvent être utilisées en chimie (Guiraudie, 2015). La cellulose et les hémi-celluloses sont des polysaccharides. Ils peuvent donc être transformés, via des procédés biologiques ou chimiques en éthanol qui peut servir dans les biocarburants (Christakopoulos et al., 1989; Ballesteros et al., 1991; Badger et al., 2002), ou dans des molécules plate-formes, comme le sorbitol, les methyl-glucosides, le 5-HMF, l'acide gluconique, l'éthylène glycol ou le propylène glycol (Yabushita et al., 2014) qui peuvent ensuite conduire à de nombreuses molécules d'utilité. La lignine quant à elle est un polymère composé de trois unités monomériques d'alcools sinapyle, coniferyle et de p-coumaryle, liés par des liaisons éther et carbone-carbone. La proportion de ces trois unités monomériques peut varier en fonction des espèces (Santos et al., 2012). La lignine peut être transformée en vanilline, en acide furfuryllique ou encore en vératraldéhyde (Li et al., 2015).

Cependant les molécules les plus intéressantes sont les extractibles. D'après Holmbom (1999) le terme « extractibles » a été premièrement utilisé pour désigner les molécules que l'on peut extraire du bois avec des solvants neutres puis étendu aux molécules extraites avec de l'eau. Ce sont des molécules d'une grande diversité dans leur composition et qui peuvent donc être assemblées en plusieurs familles (tannins, flavonoïdes, quinones, isoprénoides (Umezawa, 2000)). Elles ont aussi de nombreuses fonction au sein de l'arbre, telles qu'antifongiques (Valette et al., 2017; Hammer et al., 2003), antibactériennes (Trombetta et al., 2005; Inouye et al., 2001) ou antivirales (Özçelik et al., 2009; Efferth et al., 2008). Du fait de ces nombreuses propriétés, les extractibles peuvent avoir des applications diverses tant dans l'industrie, pour la fabrication de colles (Passialis et al., 1995), mousses (Tondi and Pizzi, 2009), produits de préservation (Valette et al., 2017; Syofuna et al., 2012) qu'en médecine (par exemple pour produire de l'acide salicylique, du glycoside de flavonoïde quercétine, de l'extrait de gingko (Royer et al., 2010) ou en application anti-inflammatoire (Gautam and Jachak, 2009) ou encore anti-cancéreuse (Gould, 1997; Sari et al., 2014).), dans les cosmétiques (Royer et al., 2013), les compléments alimentaires (Yazaki, 2015; Stern, 2014) ou encore les tannins dans la fabrication de teinture et pour le tannage (Auad et al., 2020). Ces produits peuvent avoir

des valeurs ajoutées très grandes (Royer et al., 2010). La concentration en extractibles varie entre les différents compartiments de l'arbre, les nœuds, l'aubier, le duramen, les écorces ou encore les branches (Kebbi-Benkeder, 2015; Brennan et al., 2020b; Morais and Pereira, 2012). Ils se trouvent notamment en concentration plus importante dans les nœuds et les écorces. Ces deux parties étant traditionnellement des sous-produits des industries de transformation du bois, ces extractibles peuvent devenir de nouvelles sources de revenus pour ces industries. C'est dans cette optique que se place le projet ExtraFor_Est.

1.1.7 Les conflits entre les différents services

Les différents services de la forêt sont en constant conflit, et ce depuis au moins le Moyen-Âge (Larrère, 2002). La vision productive de la forêt s'oppose à l'utilité sociale de celle-ci. Cette opposition puise son origine dans les conflits entre les représentations différentes de la forêt et de ses usages (Filot, 2005) ce qui nourrit une incompréhension entre les propriétaires/gestionnaires et les défenseurs de l'environnement. Un autre conflit récurrent, découlant d'une différence de vision de la forêt, est celui entre chasseurs et protecteurs de la nature (Fabiani, 1984; Marie, 2009; Stépanoff, 2020). Au niveau de l'exploitation de la ressource il y a aussi des conflits. Ainsi les variations des prix et de la demande du marché du bois de trituration, du bois d'œuvre et du bois-énergie peuvent remettre en question la gestion forestière. En effet, chacune de ces utilisations peut être optimisée en appliquant une gestion sylvicole spécifique, parfois aux dépends des autres alors qu'une gestion optimale demande une complémentarité entre les différents prélèvements (Peyron and Guo, 1995; Drion, 2013).

1.2 La filière forêt-bois

Nous avons vu que la forêt assure de nombreux services à la population. Or dans le cadre de cette thèse, nous allons surtout nous intéresser à la production de bois et d'écorce, que cela soit pour du bois d'œuvre, du bois d'industrie, du bois-énergie et surtout pour la production de molécules d'intérêts.

1.2.1 La récolte de bois et l'approvisionnement des unités de la première transformation

En France métropolitaine, en 2018, la récolte totale de bois a été de $38,8$ millions de m^3 (Mm^3), répartie en $20,0 Mm^3$ pour le bois d'œuvre, $10,3 Mm^3$ pour le bois d'industrie, dont $9,6 Mm^3$ pour le bois de trituration et $8,5 Mm^3$ pour le bois-énergie (FCBA, 2020). Pour les deux régions Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté qui seront étudiées dans cette thèse, les productions lors de l'année 2018 sont respectivement : $7.57 Mm^3$ ($3,09 Mm^3$ de bois d'œuvre, 2.02 de bois d'industrie et 2.22 de bois énergie, Ruelle and Alemany (2020)) et $4,91 Mm^3$ ($2,96$ de bois d'œuvre, $1,01$ de bois d'industrie, 0.83 de bois énergie, Froissart and Rodriguez (2020)). Pour ces deux régions, ainsi que pour l'ensemble du territoire national métropolitain,

la production de bois a augmenté entre 2017 et 2018 même si cette augmentation est faible (respectivement, +3,4 %, +2 % et +1,4%).

1.2.2 La production des connexes et leur valorisation

Les connexes issus de la production des différents produits bois sont traditionnellement considérés comme déchets mais peuvent aujourd'hui être valorisés. On peut citer dans ce cas, les sciures, les écorces et les chutes brutes (Chalayer, 2015). Ils peuvent être valorisés de différentes façons. Tout d'abord comme écrit plus haut, la combustion de ces différents éléments ligneux est une solution. Mais cette combustion peut apporter des problèmes, notamment lorsqu'il s'agit de la combustion des écorces. En effet, celles-ci sont riches en minéraux, plus riches que le bois (Adler, 2007), ce qui nécessite des chaudières adaptées (Martin, 2015) afin de mener à bien la combustion. De plus leur pouvoir calorifique est plus faible que celui du bois, malgré leur plus haut taux d'extractibles qui ont un pouvoir calorifique plus grand que le bois (Telmo and Lousada, 2011; Tenorio and Moya, 2013; Fuwape, 1989). Enfin, l'humidité moyenne des écorces est plus importante que celle du bois (Adler, 2007), ce qui réduit le pouvoir calorifique inférieur (c'est-à-dire le pouvoir calorifique prenant en compte la perte d'énergie liée à l'évaporation de l'eau contenue dans le combustible) des écorces. Les sciures peuvent, elles, être transformées en granulés (Bontoux, 2009) et être vendues à bon prix aux particuliers (5,93 centimes/kWh contre 3,6 centimes/kWh pour le bois bûche, Agout (2021)). Enfin, les productions des taillis et les petits bois des futaies (<7 cm de diamètre), notamment les bois d'éclaircies, peuvent être transformés en plaquettes forestières en forêt ou en bord de route via des déchiqueteurs (Laurier, 2011). Ces plaquettes forestières sont donc facilement produites et peuvent être vendues à un prix intéressant pour les chaufferies collectives ou les chaufferies industrielles, de tailles plus importantes que les chaudières individuelles. Cependant, les connexes peuvent aussi être valorisés d'autres manières. Par exemple les broyats peuvent aussi être utilisés pour fabriquer des panneaux de particules (Jaudon, 1970). Les écorces peuvent être utilisées pour fabriquer des médicaments (Turner and Hebda, 1990; Anderson, 1955; Rastogi et al., 2015), des bouchons (Thomas et al., 1995) ou encore des matériaux d'isolation (Gil, 2014).

1.2.3 La situation économique de la filière forêt-bois

En 2018, la filière forêt bois, hors bois-énergie pesait environ 16 milliards d'euros (FCBA, 2020) dont 2 milliards pour les sciages, 2,5 milliards pour la filière construction bois, 3.3 milliards pour la filière ameublement et 5.7 milliards pour la filière bois de trituration. Ces chiffres sont en baisse depuis une décennie (Cevallos et al., 2019). De plus, la filière forêt-bois présente un déficit commercial. Elle importe plus qu'elle n'exporte. En terme de valeur, ce déficit se chiffre à 6 milliards d'euros en 2016. Ceci est principalement dû à l'importation de produits bois transformés (meubles en bois, panneaux, articles en papier-carton) alors que les produits d'exportation sont principalement des produits peu transformés (sciages, papiers-cartons). Pour permettre à cette filière de se redresser, il peut être alors

intéressant de trouver d'autres débouchés, notamment pour les connexes qui sont aujourd'hui peu valorisables économiquement parlant.

1.2.4 Une filière chimie à construire

La chimie aujourd'hui a de nombreux défis à relever. En effet, l'industrie chimique est principalement approvisionnée par le pétrole. Cela pose la question de la raréfaction de la ressource ainsi que celle de la transition vers une économie plus écologique qui se traduit aussi par une réglementation de plus en plus restrictive (Bewa and Le Ravalec, 2012). L'industrie chimique française est aussi concurrencée par celle de nouveaux pays, notamment l'Inde et la Chine. Déjà dès 2005 un rapport ministériel (Garrigue, 2005) proposait à la chimie de se tourner vers le développement durable afin de relever ces défis. La branche de la chimie qui se veut durable s'appelle la "chimie verte" et a été définie par Anastas and Warner (1998). Elle se base sur douze principes dont les objectifs sont de diminuer au maximum l'impact négatif de la chimie sur l'environnement. Le principe 7 stipule "Les matières premières ou ressources doivent être renouvelables plutôt que non-renouvelables lorsque la technologie et les moyens financiers le permettent". Les forêts gérées durablement sont des sources de produits renouvelables qui peuvent donc participer à ce renouvellement de l'industrie. En particulier les extractibles qui sont des molécules pouvant être très utiles à la chimie fine.

1.2.5 Les conflits d'usage du bois

Les productions des différents types de bois (bois d'œuvre, bois de trituration, bois-énergie), se concurrencent selon les valeurs données par le marché. Ainsi avec l'augmentation de la demande et donc du prix du bois-énergie, ce dernier devient de plus en plus attractif et peut concurrencer le bois d'industrie avec lequel il partage la même ressource (bois issus de taillis, bois de petits diamètres, (Drion, 2013)). Ce conflit est encore accentué dans les régions où la ressource en bois est limitée (Arnaudet, 2014). De même, la demande en connexes de scierie de plus en plus importante des entreprises de trituration engendre un conflit avec les entreprises demandeuses de sciages (Alexandre et al., 2012), l'augmentation de l'approvisionnement de l'un se faisant au détriment de l'autre. Ces différents conflits ne peuvent être résolus qu'en ayant à l'esprit une vision complète de la filière. Le bois est un matériau certes renouvelable, mais sur le long terme (plusieurs dizaines d'années de révolution, selon l'espèce) et à condition d'avoir une gestion durable de la forêt, ce qui oblige à utiliser de manière optimale la ressource afin de pourvoir à toutes les demandes. Cela se nomme l'usage en cascade (Thibaut, 2014). Ainsi utilisé, le bois devient d'abord du bois d'œuvre, son utilisation demande les plus beaux bois (ex : construction, ameublement). Les bois de plus petits diamètres, ainsi que les déchets de bois de la première utilisation peuvent ensuite être utilisés dans la trituration. Enfin, en dernier lieu, les parties de l'arbre non-utilisables dans ces deux usages ainsi que les déchets non recyclables peuvent être utilisés comme bois-énergie. En procédant ainsi, la durée de vie du matériau bois est augmentée, puisqu'il est utilisé plusieurs fois. Cela augmente directement la quantité de carbone stocké dans le bois utilisé, plus de bois étant utilisé en même temps. De plus, chaque utilisation du bois va se

substituer à un autre matériau dont la production et la mise en œuvre est en général plus productrice de carbone. Par exemple la construction d'une maison en bois à la place d'une maison en béton ou le chauffage au bois plutôt qu'au fioul. Cela augmente alors la quantité de carbone substitué.

1.3 La ressource française

La forêt a donc de nombreux rôles et une grande chaîne de production prend sa source dans l'exploitation de ses arbres. Or la ressource forestière française est diverse et variée. La forêt couvre à elle seule environ 33% du territoire de la France métropolitaine, ce qui correspond à 17 041 milliers d'hectares (FCBA, 2020). Ces forêts sont à 75 % des forêts privées (FCBA, 2020). La répartition entre les principales essences répertoriées se fait de la façon suivante : 24% de la surface est dominée par le chêne (toutes espèces confondues), 9% par le hêtre, 8% par le sapin et l'épicéa, 7% par le pin maritime, 6 % par le pin sylvestre, 5 % par le châtaignier et 3 % par le douglas, le reste de la surface (40 %) étant dominé par d'autres essences (34% par des feuillus et 6% par des résineux) (FCBA, 2020). On le voit donc, la forêt française est une forêt très majoritairement composée de feuillus. Mais celle-ci n'est pas répartie de manière homogène sur tout le territoire. En effet, sur la région Grand Est, les chênes couvrent 27 % de la surface forestière, le hêtre 19 %, le sapin et l'épicéa 14%, 4% pour le pin sylvestre et 2% pour le Douglas, le pin maritime et le châtaignier étant très peu représentés. Pour la Bourgogne-Franche-Comté, les chênes représentent 41 % de la surface forestière, le hêtre 13 %, le sapin et l'épicéa 12% et le douglas 4% alors que le châtaignier et les pins sylvestres et maritimes ne sont que peu représentés (IGN, 2021). En plus de cette hétérogénéité nationale au niveau de la ressource, il existe, dans la filière forêt-bois, une véritable dichotomie entre la ressource et les prélèvements. En effet, si les feuillus représentent 72% de la surface forestière nationale, ils ne représentent plus que 36.8% de la récolte de bois nationale (FCBA, 2020). De plus, ils sont principalement utilisés en tant que bois de trituration (32 % de la récolte) et bois énergie (26%) alors que 59% de la récolte de résineux est utilisée en tant que bois d'œuvre. Cette différenciation se retrouve dans le Grand-Est, où les feuillus représentent $2.8 Mm^3$ de bois récoltés en 2018 contre $3.62 Mm^3$ pour les conifères (hors bois-énergie). Au niveau du bois d'œuvre, les sapins-épicéas représentent plus de volume récolté que chênes et hêtres rassemblés ($1.49 Mm^3$ contre $1.00 Mm^3$ Ruelle and Alemany (2020)) alors que leur surface forestière est trois fois moindre ! En Bourgogne Franche-Comté, la différence est un peu moins importante. Le volume de bois de feuillus récolté est de $1.55 Mm^3$ contre $2.4 Mm^3$ pour les conifères (hors bois-énergie) en 2018 . On notera toutefois que le Douglas représente $0.626 Mm^3$ soit plus que le chêne qui est récolté à hauteur de $0.613 Mm^3$. Sapin et épicéa représentent toujours la première ressource forestière avec $1.24 Mm^3$.

Différentes essences impliquent différentes caractéristiques. Densité, résistance mécanique, dureté, taux d'écorce varient en fonction des essences (FCBA, 2020). Ces différences interspécifiques expliquent en partie les différences d'exploitation et de valorisation que nous venons de voir.

1.4 Objectifs et problématique

Comme nous l'avons vu, la filière forêt-bois présente des faiblesses, notamment économiques et dans l'existence des conflits entre usages de la forêt et du bois, mais aussi des points forts, par exemple son rôle dans la transition écologique comme puits de carbone ou source de molécules biosourcées. D'un autre côté, la filière chimie se trouve aussi dans une période de transition importante vers une chimie plus « verte » et moins pétro-dépendante. A l'intersection de ces problématiques se trouve le projet ExtraFor_Est. Son objectif principal est d'estimer les ressources en extractibles dans deux régions françaises, la région Bourgogne Franche Comté et la région Grand Est. Ainsi que décrit précédemment, les principales essences de ces régions sont les chênes, sessile et pédonculé, le hêtre, le sapin, l'épicéa et le Douglas et seront donc celles étudiées dans ce projet. Afin d'estimer la ressource en extractible, il est nécessaire de connaître à la fois le volume de chaque compartiment, leur masse volumique et leur concentration en extractibles. Le deux derniers points sont traités par deux autres thèses effectuées par Antoine Billard et Clément Fritsch ainsi que par un travail de post-doctorat porté par Maree Brennan. La thèse ici présentée s'inscrit dans le premier axe de recherche, l'estimation des volumes. Elle s'organise autour de trois questions :

— Quels sont les compartiments intéressants à étudier ?
— Quels sont les moyens actuels de prédire les volumes de ces compartiments ?
— Comment les appliquer à la ressource visée ?

Chapitre 2

Etat de l'art

Dans ce chapitre, nous allons aborder plus en avant les différentes notions qui seront utiles pour le travail présenté dans cette thèse.

2.1 La variabilité intraspécifique

La variabilité intra-spécifique est au moins aussi forte que la variabilité inter-spécifique (Billard et al., 2020; Patel, 1975). En effet, densité, proportion d'écorce, largeur de cernes, résistance mécanique, taux d'extractibles, etc... peuvent varier, parfois grandement entre des arbres de la même un espèce, au sein du même arbre ou encore au sein d'une même partie d'un arbre. Cela justifie que l'analyse d'une caractéristique de l'arbre se fasse spécifiquement pour chacun de ces compartiments afin d'avoir les informations les plus précises possibles.

2.1.1 Variabilité entre arbre

Tout l'art du forestier réside, outre la satisfaction des autres services écosystémiques, dans sa capacité à produire des bois dont la qualité correspond à celle qui est attendue par les consommateurs de bois (constructeurs, fabricants de meubles, papetiers...). En fonction de sa gestion, le forestier va pouvoir influer sur différentes propriétés de l'arbre. Zhang et al. (1993) et Guilley et al. (1999) ont par exemple montré qu'une sylviculture plus dynamique, avec donc des coupes plus fréquentes, augmente la croissance de l'arbre. La densité du peuplement est une variable sur laquelle le forestier peut jouer. Cela lui permet notamment de contrôler la taille des branches et donc celle des nœuds au sein de l'arbre (Grace et al., 2015; Paul et al., 1947). Comme montré par As et al. (2006) pour le pin sylvestre, la taille des nœuds influence fortement négativement les propriétés mécaniques du bois telles que le module d'élasticité ou la résistance à la flexion. Mais l'augmentation de la densité de peuplement peut aussi avoir une influence positive sur le module d'élasticité du bois, par exemple chez *Populus xiaohei* (Jiang et al., 2007). La sylviculture influe aussi la largeur de cerne de l'arbre. En effet, plus la sylviculture est intensive, plus le houppier de l'arbre est ample et donc plus la largeur de cerne est importante (Mörling, 2002; Filipescu et al., 2014). Le site de croissance de l'arbre

a aussi une influence. Par exemple, l'altitude influe négativement sur la croissance de l'arbre (Coomes and Allen, 2007). La croissance influence la densité du bois différemment selon les espèces, positivement par exemple pour l'Orme liège ou l'érable à sucre (Savidge, 2003) ou négativement pour *Abies fabri*, *Abies nephrolepis*, *Picea asperata* et *Picea koraiensis* (Zhang, 1995). De manière générale, la localisation de l'arbre dans l'espace (longitude, latitude et altitude) a une influence sur son comportement et sa production ligneuse. Cela se retrouve par exemple dans la mesure du module d'élasticité (Moore et al., 2009), de la densité (Rossi et al., 2015; Persson et al., 1995), la longueur des fibres (Watson et al., 2003) ou sur la composition chimique du bois (Lachowicz et al., 2019).

2.1.2 Variabilité entre compartiments

Comme montré par Billard et al. (2020), si la variation des propriétés entre deux arbres de la même espèce peut être importante, celle entre deux zones du même arbre peut l'être tout autant, voire plus. L'arbre peut ainsi être divisé en différent compartiments : l'aubier, le duramen, l'écorce, le nœud, la branche, la racine. Chacun des compartiments a un rôle différent au sein de l'organisme vivant qu'est l'arbre (Trouy, 2015). L'aubier est la partie du bois qui sert effectivement à la conduite de l'eau des racines vers les feuilles. Il est composé de cellules mortes, les vaisseaux de xylème et de cellules vivantes dites de parenchyme longitudinal qui assurent la protection des cellules de xylème. Le duramen est la partie du bois qui ne sert plus à la conduite du xylème. Il n'est constitué que de cellules mortes ayant éventuellement subi une transformation chimique afin d'avoir une plus grande résistance. Pour certaines essences comme le chêne et le Douglas, ce dernier est plus durable que l'aubier et donc plus apprécié. Le nœud correspond à l'insertion de la branche dans la tige. Si la branche est recouverte alors qu'elle est toujours vivante, le nœud ainsi formé est alors dit adhérent. Si la tige recouvre un branche morte, alors le nœud formé est "non-adhérent". La branche est la partie du houppier qui dérive de la tige et porte les organes photosynthétiques de l'arbre. La racine est la partie souterraine de l'arbre qui assure son approvisionnement en eau et sa stabilité. Entre ces différents compartiments les caractéristiques peuvent changer. Bert and Danjon (2006) ont par exemple observé que la concentration massique de carbone varie entre les différents compartiments. Ainsi le bois (aubier + duramen) stocke plus de carbone que les racines ou l'écorce. Kebbi-Benkeder (2015) a montré que le taux d'extractibles, lui, varie beaucoup entre la tige, les nœuds et l'écorce et est bien plus important dans ces derniers que dans la tige. Cannell and Morgan (1987) ont montré une variation du module d'élasticité entre tige et branche. La variation de la durabilité entre l'aubier et le duramen est connue depuis longtemps (Hawley et al., 1924; Bamber, 1987; Findlay, 1985), elle s'explique en partie par la différence de concentration en extractibles entre les deux, plus forte dans le duramen (Morais and Pereira, 2012; Miranda et al., 2017). La densité elle aussi varie fortement d'un compartiment à l'autre. Elle décroît des nœuds aux branches et celle de l'écorce est plus importante que celle de la tige (Billard et al., 2020).

Pour connaître la masse d'un objet, il est nécessaire d'en connaître le volume mais aussi la masse volumique. Concernant l'arbre, il existe de vastes bases de données sur les masses volumiques moyennes, mesurées à 1,30 m, par essence (par exemple : Miles and Smith (2009)).

Cependant, s'il a été prouvé que la densité varie entre les compartiments (Manwiller, 1979; McKimmy et al., 1968), la variabilité entre les compartiments ne semble pourtant pas prise en compte dans le calcul des densités moyennes de chaque essence. C'est un travail qui est fait dans le cadre d'un autre doctorat en parallèle de cette thèse (Billard et al., 2020).

2.1.3 Variabilité intra-compartiment

Enfin, au sein même d'un compartiment, il y a des variations qu'il faut prendre en compte. Aubier et duramen sont formés de cernes et ceux-ci sont eux-mêmes formés de bois de printemps qui est mis en place en début de saison et de bois d'été qui est mis en place en fin de saison. Le bois d'été est plus dense que le bois de printemps pour les feuillus et les résineux (Fries and Ericsson, 2009; Kuo and Wang, 2019; Zhang, 1997), moins efficace dans le transport de l'eau (Domec and Gartner, 2002), a un taux de carbone plus élevé (Lamlom and Savidge, 2003) et leur structure cellulaire est différente (Björklund et al., 2017). Au sein même du bois d'été et du bois de printemps d'un même cerne, des variations de propriétés comme le module d'élasticité peuvent être observées le long du cerne (Cramer et al., 2005). Entre deux cernes différents, il existe aussi des variations, notamment au niveau de la largeur de cerne (Farrar, 1961) qui correspond à la croissance annuelle d'un arbre dans les régions tempérées et est la base d'une entière discipline, la dendrochronologie (Fritts, 2012). On trouve aussi des variations de composition chimique, par exemple en azote qui diminue avec les années (Poulson et al., 1995). Les caractéristiques du bois varient aussi de bas en haut de la tige. Ainsi, selon les espèces la densité du bois (Repola, 2006), la nodosité (Pinto et al., 2003), la quantité d'extractibles dans l'écorce (Brennan et al., 2020a) ou dans le bois (Stringer and Olson, 2007) varient le long de la tige. Le bois présente aussi des caractéristiques différentes en fonction de l'âge qu'avait l'arbre lorsqu'il l'a produit. Ainsi, le bois produit lors des 20 premières années de vie de l'arbre, communément appelé "bois juvénile" présente des propriétés différentes du bois "normal" (Moore and Cown, 2017). Les cellules le composant sont plus petites et ont des parois cellulaires plus fines, la densité du bois est plus faible (10-20 % inférieure) et un plus grand angle des microfibrilles chez les gymnospermes, ce qui se traduit par une baisse de la qualité mécanique (Moore and Cown, 2017). Outre le bois juvénile, le bois de réaction est aussi un bois différent. Celui-ci se forme dans les zones soumises à des contraintes soit de compression pour les résineux, soit de tension pour les feuillus, ce qui induit des caractéristiques spécifiques. Par exemple, le bois de compression présente des trachéides de forme ronde, une paroi cellulaire plus épaisse et plus riche en lignine que celles du bois normal (Du and Yamamoto, 2007).

2.2 Le calcul des volumes des différents compartiments

Le volume de l'arbre est souvent estimé dans le cadre d'une évaluation économique de la ressource. En effet pour les forestiers comme pour les transformateurs, prédire la quantité de bois présent dans un arbre à partir des mesures externes de celui-ci est très important. C'est pourquoi il existe de nombreux travaux qui portent sur la construction de modèles de profil

de tige-sur-écorce (Gray, 1956; Czaplewski, 1989; Forslund, 1991; Rustagi and Loveless Jr, 1991; Zakrzewski, 1999; Courbet and Houllier, 2002; Wilhelmsson et al., 2002; Garber and Maguire, 2003; Zianis et al., 2005; Trincado and Burkhart, 2006; Li and Weiskittel, 2010). Ces profils permettent d'obtenir à n'importe quelle hauteur le diamètre-sur-écorce de l'arbre et donc d'en déduire le volume de la tige. Cependant toute la tige n'intéresse pas de la même manière les scieurs. L'écorce est en effet un produit qui a moins de valeur que le bois. Ainsi donc, prédire la quantité de bois produite nécessite de soustraire l'écorce du volume de la tige. Le volume d'écorce peut être estimé à l'aide de proportions d'écorce moyennes par essence (FCBA, 2020). C'est aussi l'objectif des nombreux modèles de prédiction de la double épaisseur d'écorce (Gordon, 1983b; Muhairwe, 2000; Hannrup, 2004; Van Laar, 2007). Une autre approche consiste à modéliser directement le volume sous écorce (Gordon, 1983a; Sherrill et al., 2011).

Comme nous l'avons vu auparavant, la tige sous-écorce se sépare en deux parties, l'aubier et le duramen. Ainsi, nombreuses sont les études qui ont cherché à mettre au point des modèles de prédiction du profil de duramen (Ojansuu and Maltamo, 1995; Yang and Hazenberg, 1991; Knapic and Pereira, 2005) ou d'aubier (Yang et al., 1994; Longuetaud et al., 2006; Maguire and Batista, 1996).

Les volumes des autres compartiments, moins importants économiquement, sont bien moins étudiés. Cependant, aujourd'hui les branches revêtent une importance croissante que ce soit pour le bois-énergie (Ranger et al., 2007) ou encore la comptabilité carbone (Valade et al., 2017). Ainsi de récentes études ont cherché à mettre au point des modèles de volume de branche (Zakrzewski, 1999; Ver Planck and MacFarlane, 2014; Corral-Rivas et al., 2017). En ce qui concerne les nœuds, la plupart des travaux portent sur la prédiction du volume d'un nœud en fonction de ses caractéristiques ou des caractéristiques de la branche associée (Trincado and Burkhart, 2008; Manso et al., 2020) et peu sur le volume de nœuds dans l'arbre (Pinto et al., 2003)

Plusieurs limites peuvent donc être mises en évidence dans ces travaux. Tout d'abord la portée de l'étude. En effet, comme affirmé par Jenkins et al. (2003) et Stängle et al. (2017) les équations de prédiction des caractéristiques biologiques des arbres ne sont pertinentes que dans les zones géographiques où elles ont été conçues. De nouveaux modèles adaptés à la ressource française sont donc souhaitables.

Le compartiment des nœuds a été peu étudié dans sa globalité au niveau de l'arbre. La création de nouveaux modèles est donc importante pour prédire la proportion de nœuds dans un arbre à partir de variables facilement mesurables. Enfin, les modèles de profils d'écorce peuvent être améliorés, notamment en essayant de se passer du diamètre sur écorce. Cette variable qui explique une grande partie de la variation de l'épaisseur d'écorce n'est que rarement mesurée, mis à part à 1,30 m, et sa prédiction entraîne nécessairement une baisse de la précision de ces modèles.

2.3 L'écorce

L'écorce est une partie de l'arbre qui concentre de nombreuses fonctions et intérêts. Pour l'arbre, il s'agit en effet de la première protection vis-à-vis des agressions externes (UV, herbivores, insectes, feu...) et donc d'une couche protectrice importante pour l'arbre. Pour l'industrie, l'écorce est, comme nous l'avons vu, un co-produit des scieries qui peut être utilisé en tannerie, en paillage ainsi qu'une source importante d'extractibles.

2.3.1 L'écorce dans l'arbre

L'écorce est formée de différentes couches (voir Figure 2.1) ayant des origines différentes. Sa formation se fait à partir de deux méristèmes différents, le cambium et le phellogène.

Le cambium, aussi appelé assise libéro-ligneuse, produit des cellules vers l'intérieur de l'arbre, qui vont former le bois vers l'intérieur et des cellules vers l'extérieur de l'arbre. Ces dernières vont former une partie de l'écorce, par des divisions essentiellement périclines de part et d'autre du cambium. Les cellules produites vers l'extérieur de l'arbre se divisent en deux catégories. La première est celle des cellules de phloème. Ce sont les cellules qui vont servir à la conduction de la sève élaborée depuis les organes foliaires de l'arbre vers le reste de l'organisme. La formation du phloème se fait à l'issue de la différenciation de la cellule de cambium nouvellement créée par la division cellulaire. Celle-ci va alors subir une élongation, une forte régression protoplasmique (diminution du nombre d'organites comme les ribosomes, les mitochondries ou les plastes) ainsi qu'une transformation de sa paroi afin d'acquérir ce que l'on nomme un "crible". Il s'agit d'une paroi cellulaire criblée de nombreux pores qui sert donc à faire passer la sève élaborée vers la cellule de phloème suivante. Ainsi les cellules de phloème sont aussi nommées "tubes criblés". En plus des cellules de phloème, le cambium forme aussi des cellules parenchymateuses appelées "cellules compagnes" qui sont étroitement liées aux cellules de phloème. Ces cellules compagnes et les cellules de phloème qui leur sont liées sont originaires de la même cellule cambiale. Elles approvisionnent la cellule de phloème en métabolites car elles partagent avec elle une grande surface d'échange. De plus elles jouent un rôle essentiel dans la collecte et l'accumulation des produits de la photosynthèse au sein des tissus foliaires (Bonnemain and Fromard, 1987).

Le phellogène, aussi appelé assise subéro-phellodermique est le deuxième méristème qui permet la formation de l'écorce. Il peut avoir plusieurs origines. Il peut en effet venir de la différenciation de cellules parenchymateuses de la zone hypodermique mais aussi de la zone épidermique ou encore se former directement dans le cortex (Bowes and Mauseth, 2012). Le phellogène produit deux types de cellules, les cellules de liège (ou suber) vers l'extérieur et des cellules parenchymateuses vers l'intérieur, le phelloderme. Les cellules de liège se différencient en subérisant et imperméabilisant leur parois avant de mourir. Cela donne la partie la plus externe de l'écorce, le périderme. Avec l'accroissement en épaisseur de l'arbre lors de sa croissance, le périderme finit par se craqueler et des fissures peuvent apparaître jusqu'au cortex. Cela entraîne la formation d'un nouveau phellogène vers l'intérieur.

Au fur et à mesure que le phellogène se forme et se reforme, il finit par épuiser les cellules du cortex. Lorsque cela arrive, ce sont les cellules parenchymateuses du phloème le

plus externe qui vont donner le nouveau phellogène (Pasztory et al., 2016). Le périderme se retrouve alors composé de cellules subérifiées ainsi que de cellules de phloèmes. Le tissu ainsi formé, en prenant en compte les cellules des précédentes années qui restent à l'extérieur de l'écorce se nomme le rhytidome.

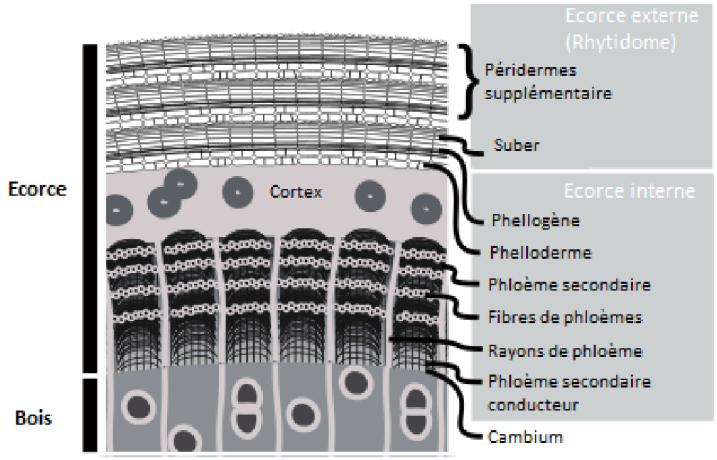


FIGURE 2.1 – Schéma de l'écorce (d'après Rosell (2019))

L'écorce n'étant pas à proprement parler du bois, ses caractéristiques varient par rapport à celles du duramen ou de l'aubier. Par exemple sa masse volumique est de 40% plus fore que celle du duramen chez le Sapin ($514 kg.m^{-3}$ contre $374 kg.m^{-3}$) ou rester quasi constante ($443 kg.m^{-3}$ contre $429 kg.^{m-3}$) (Billard et al., 2020). L'humidité des écorce est généralement très élevée. Ainsi, l'écorce de l'épicéa a une humidité sur masse humide de 55% contre 45% pour le bois (Dibdiakova et al., 2014). L'humidité varie dans les différentes parties de l'écorce. L'écorce interne est sept à dix fois plus humide que l'écorce externe (Pasztory et al., 2016).

D'un point de vue chimique, il existe aussi une grande variation entre le bois et l'écorce. Neiva et al. (2018) montrent que l'écorce de l'épicéa est plus riche en certains sucres (arabinose, acide galacturonique, rhammose) et plus pauvre en d'autres (glucose, xylose, mannose) que le bois. Les cendres des écorces présentent aussi une composition différente de celle du bois. Il y a par exemple dix fois plus de calcium dans un gramme d'écorce que dans un gramme de bois (Neiva et al., 2018). Pasztory et al. (2016) rapportent que pour l'épicéa, la composition en éléments chimiques (Tableau 2.1) varie entre l'écorce interne, l'écorce externe et le bois. De fait, la composition chimique de l'écorce varie en fonction de les proportions d'écorce interne et externe qui la compose.

En tant que couche protectrice du cambium, l'écorce agit comme barrière mécanique contre les agressions externes comme les coups, les griffures, chutes de branches, chutes de rochers, ou encore les insectes. Par exemple, l'écorce de *Streblus Asper* produit des polyphénols qui agissent contre *Dysdercus cingulatus* (Hashim and Devi, 2003), ou celle de *Illicium difengpi* qui, possédant de fortes propriétés insecticides, agit contre *Sitophilus zeamais* et *Tribolium castaneum* (Chu et al., 2011). L'écorce permet aussi de protéger la plante des

TABLE 2.1 – Composition chimique du bois et de l'écorce d'épicéa (d'après Pasztory et al. (2016))

	Carbone (%)	Hydrogène (%)	Oxygène (%)	Autres éléments (%)
Wood	50.0	6.0	43.5	0.5
Inner bark	51.5	5.7	38.8	4.0
Outer bark	44.4	6.4	45.4	3.8

attaques des herbivores. Par exemple, l'Oregonin que l'on trouve dans l'écorce d'*Alnus rubra* a une activité anti-herbivore, car toxique pour certaines espèces mangeuses de feuilles (*Orgyia leucostigma* ou encore *Trichoplusia ni*, Lea et al. (2021)). L'écorce constitue également une barrière contre le feu (Pausas, 2015; Rosell, 2016). Grâce à sa plus grande humidité, elle résiste mieux à la chaleur que le bois. De plus, si son épaisseur est conséquente, elle protège le cambium des hautes températures qui pourraient l'endommager définitivement. L'écorce agit de la même manière contre les températures basses en jouant le rôle d'isolant entre le cambium et l'air froid (De Antonio et al., 2020). Enfin, l'écorce agit aussi contre les micro-organismes, notamment grâce aux extractibles qui y sont présents (Franceschi et al., 2005).

Outre la protection de l'arbre, l'écorce est un organe qui remplit d'autres rôles. En effet, il sert au stockage de l'eau grâce aux nombreuses cellules de parenchyme qui le composent (Scholz et al., 2007). Celles-ci forment un symplasme de grand volume qui permet plus facilement le stockage de l'eau que dans d'autres tissus. On y trouve aussi de plus grands taux d'azote et de minéraux, ce qui peut suggérer que l'écorce accomplit aussi une fonction de stockage de nutriments (Schowalter and Morrell, 2002). Enfin, les cellules parenchymateuses présentes dans l'écorce peuvent aussi avoir un rôle dans la photosynthèse de l'arbre. Grâce aux rayons lumineux qui pénètrent les couches supérieures et au CO_2 présent du fait de la respiration cellulaire, ces cellules sont capables d'effectuer une photosynthèse qui pourrait récupérer de 60% à 90% de la production $C0_2$ due à la respiration de la plante dans les branches et les brindilles (Pfanz et al., 2002).

2.3.2 Les méthodes de mesure de l'épaisseur d'écorce

Pour pouvoir modéliser, ou du moins connaître la proportion d'écorce dans un arbre, il est nécessaire de pouvoir la mesurer. Avec l'évolution des techniques, de nouvelles méthodes de mesure de l'écorces sont apparues. Nous allons ici détailler ces différentes mesures, leur fonctionnement, leurs avantages et leurs inconvénients.

Jauge à écorce

La jauge à écorce (Figure 2.2) est un instrument qui permet la mesure d'une épaisseur d'écorce à un endroit précis. Elle se compose d'une tige coulissante graduée en mm pourvue d'une lame et reliée à une poignée. La lame est conçue de façon à permettre de ressentir une

différence de résistance lorsqu'elle atteint le bois. En appuyant sur la poignée, on enfonce la lame dans l'écorce. Alors il est possible de lire l'épaisseur d'écorce sur la tige.



FIGURE 2.2 – Jauge à écorce

A cause de la notion de « ressentir une différence de résistance », la mesure de l'épaisseur à la jauge à écorce est très dépendante de l'utilisateur. Ce fait a été documenté dans la

littérature notamment par Gray (1956), Mesavage (1969) et West (2009). La valeur obtenue ne dépend pas uniquement de l'utilisateur mais aussi du moment où la mesure est effectuée. En effet, comme relevé par Althen (1964), la résistance du bois nouvellement formé est plus faible et donc la jauge à écorce aura une plus grande tendance à surestimer l'épaisseur d'écorce en s'enfonçant d'avantage dans le bois si la mesure est faite en période de croissance de l'arbre. De plus, la jauge à écorce surestime toujours l'épaisseur d'écorce. En effet, en étudiant les points de mesure, Althen (1964) a relevé que le bois a souvent été pénétré par la jauge à écorce, expliquant donc la surestimation de l'épaisseur d'écorce par rapport à la méthode dite « d'écorçage ». Cette surestimation est confirmée par Stängle et al. (2016) qui a comparé les mesures à la jauge à écorce avec des mesures faite au scanner à rayon X, par Gordon (1983b) sur le *Pinus Radiata* ou encore par Laasasenaho et al. (2005).

Écorçage

La mesure de l'épaisseur d'écorce par écorçage consiste à mesure la circonférence du tronc avant et après enlèvement de l'écorce. Cela donne donc une circonférence sur-écorce et une circonférence sous-écorce desquelles il est possible de déduire l'épaisseur d'écorce. C'est la méthode qui a été utilisée par Althen (1964); Laasasenaho et al. (2005) ou encore Gordon (1983b). Althen (1964) et Laasasenaho et al. (2005) la considèrent comme plus précise que la jauge à écorce. En effet, en prenant la différence de mesure entre deux circonférences, on s'affranchit totalement de la variation locale de l'épaisseur d'écorce qui peut être importante (par exemple pour le Douglas) et surtout la différenciation entre le bois et l'écorce est plus aisée à faire. Elle est en revanche plus chronophage que la méthode de la jauge à écorce.

Scanner à rayon X

Le scanner à rayon X est une méthode relativement nouvelle dans la recherche sur le bois. En effet, comme noté par Wei et al. (2011) la première étude par tomographie du bois est celle de Davis and Wells (1992). Le développement de scanners spécifiques pour l'étude du bois a commencé au milieu des années 2000 (Oja et al., 2004; Grönlund et al., 2005). Dans leur revue, Wei et al. (2011) résument le principe de cette méthode. Des rayons X sont envoyés par un émetteur qui tourne autour de l'échantillon étudié. Ensuite un détecteur diamétralement opposé par rapport à l'émetteur mesure la radiation transmise à travers l'objet analysé. En effet, lorsqu'un rayon X traverse l'objet, une partie des photons émis est absorbée par l'objet alors que l'autre est transmise. Cette radiation transmise peut-être reliée au coefficient d'atténuation de l'objet étudié par la loi de Beer-Lambert exponentielle. Les données récoltées pendant la rotation autour de l'objet sont ensuite traitées pour reconstruire des coupes tomographiques. Cependant cette méthode présente aussi des limites. Elle ne fonctionne pas très bien pour les bois très humides et pour les échantillons épais. Dans ces cas, le matériau diffuse le rayonnement ce qui engendre un bruit dans la détection, rendant la lecture des résultats difficiles. Néanmoins, un grand avantage de cette méthode est de pouvoir détecter les défauts dans la structure du matériau. Cela permet donc de prendre en compte toutes les irrégularités du bois (Stängle et al., 2016) et d'avoir la mesure la plus précise sur

l'épaisseur moyenne de l'écorce. Cette méthode présente aussi l'avantage de pouvoir mesurer directement la densité au sein du matériau (Freyburger et al., 2009).

Mesures optiques

Les mesures optiques sont réalisées sur des rondelles de tronc préalablement nettoyées. Elles se font avec une règle ou à l'aide d'une loupe binoculaire grossissante pour avoir une meilleure précision de mesure (jusqu'au centième de mm).

2.4 Les modèles de profils d'écorce

Un profil d'écorce est la représentation de l'évolution de la quantité d'écorce avec la hauteur dans l'arbre. Cette représentation peut se faire à l'aide de différentes variables.

2.4.1 Intérêt d'un modèle de profil d'écorce

L'un des premiers travaux publiés sur le sujet est celui de Meyer (1946). Il explique que la création d'un modèle peut répondre à deux objectifs. Dans le cas des espèces dont l'écorce est intéressante financièrement (par exemple : pin canadien ou chêne liège), il s'agit de pouvoir estimer la quantité d'écorce disponible afin d'estimer le revenu qu'elle pourrait engendrer. Le deuxième objectif est à l'inverse lorsque l'écorce a moins de valeur financière que le bois, de la retirer du calcul du volume de bois afin de ne pas surestimer la valeur de la grume. Ainsi, puisque le modèle permet de connaître la quantité d'écorce à chaque hauteur de la grume, il peut être directement soustrait d'un profil de diamètre sur-écorce ; il permet d'obtenir le diamètre sous-écorce et donc la valeur recherchée. De plus, et ce dans les deux cas, avoir un profil d'écorce permet d'obtenir une estimation de la quantité d'écorce en fonction du diamètre de la tige et donc en fonction de la valorisation de chaque partie de la grume.

2.4.2 Modèles de la littérature

Depuis Meyer (1946), de nombreuses études ont été menées sur les profils d'écorce. Comme écrit plus haut, différentes variables peuvent être utilisées pour montrer la variation de la quantité d'écorce dans la tige. Les études que nous allons voir seront donc classées selon la variable prédite.

— Afin de pouvoir transformer des mesures de diamètre sur écorce en diamètre sous-écorce, la variable la plus simple à prédire est la double épaisseur d'écorce. En effet, si l'on soustrait cette variable au diamètre sur écorce, on obtient directement un diamètre sous-écorce. Gordon (1983b); Hannrup (2004); Van Laar (2007) ont fourni des modèles utilisables pour prédire la double épaisseur d'écorce pour différentes essences. Nous disposons donc de modèles pour *Pinus radiata*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris* et*Pinus patula*.

— Il est possible aussi de prédire directement le diamètre sous écorce à partir du diamètre sur écorce, par exemple grâce aux travaux de Cao and Pepper (1986) pour *Pinus echinata*, *Pinus taeda* et *Pinus palustris*.
— Enfin, les auteurs peuvent combiner ces deux variables avec les fonctions élémentaires mathématiques afin d'obtenir de nombreuses variables prédites (voir partie 5) (Gordon, 1983b; Johnson and Wood, 1987; Gordon et al., 1999; Courbet and Houllier, 2002).

2.5 Les nœuds

Le nœud est la partie de la branche qui se trouve dans le tronc de l'arbre (Figure 2.3 . Il est la base du soutien mécanique de la branche. C'est aussi lui qui assure la protection du tronc contre, entre autres, les potentielles infections venues de la branche.



FIGURE 2.3 – Délimitation d'un nœud (en noir).

2.5.1 Le nœud dans l'arbre

Formation du nœud dans l'arbre

Shigo (1985) propose une description de la croissance de la jonction arbre-branche, autrement dit le nœud, dite "ball and socket". En effet, la croissance du nœud va se diviser en deux étapes. La première consiste en la croissance de la branche. Celle-ci en prenant de l'épaisseur va élargir le nœud. La deuxième consiste en la croissance du tronc. En s'épaississant, il va venir recouvrir une partie de la branche, accroissant donc la longueur du nœud. La figure 2.4 illustre cette description. Cette structure permet une grande tenue mécanique de la branche.

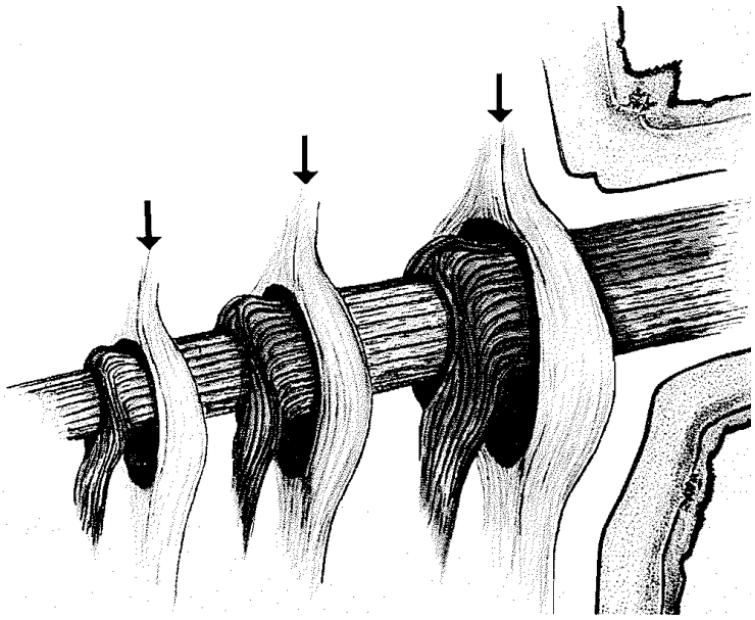


FIGURE 2.4 – La croissance du nœud, d'après Shigo (1985).

En plus de sa croissance, Shigo (1985) a aussi remarqué d'autres particularités du nœud. Le tissu du xylème change de direction de manière soudaine depuis le plan longitudinal de la branche vers le plan longitudinal du tronc. Ceci implique qu'il n'y a pas de communication directe entre les faisceaux de xylème se situant au-dessus de la branche et la branche elle-même. Le phloème suit la même forme. Cette structure des tissus présente un grand avantage, en cas de chute d'une branche ou de rupture du tronc qui se poursuit par une infection du xylème à ce niveau l'infection ne pourra pas accéder aux branches inférieures directement. Cela laisse donc celles-ci saines et leur permet de repartir pour poursuivre la croissance de l'arbre. Lors de la mort de la branche, on observe une variation dans la croissance du tronc au niveau de la branche morte. Celle-ci ralentit, ce qui finit par créer des variations dans la forme de la tige. De plus comme la branche ne croît plus, il n'y a plus de continuité entre les vaisseaux de xylème de la tige et ceux de la branche. De fait, le nœud n'est plus relié au bois de la tige qui continue de l'envelopper. Il devient donc non-adhérent (Kebbi-Benkeder, 2015).

La théorie de Shigo (1985) a été complétée par Müller et al. (2018). Dans ses travaux, ils mettent en évidence l'existence d'un tissu sacrificiel entre le bois de branche et le bois de tronc. Dans celui-ci, les vaisseaux de xylème présentent une structure en zigzag. Celle-ci constitue un point de faiblesse dans la structure du nœud. Cela permet qu'en cas de fracture de la branche, la fissure se propage à cet endroit. Ainsi, l'arbre contrôle cette rupture et évite qu'elle ne se propage de manière plus dangereuse au sein de l'organisme (Figure 2.5).

Il existe quelques différences entre le bois de nœuds et le bois de tronc. Outre la différence dans l'orientation du fil, puisque celui-ci change dans le nœud, on observe des cernes plus

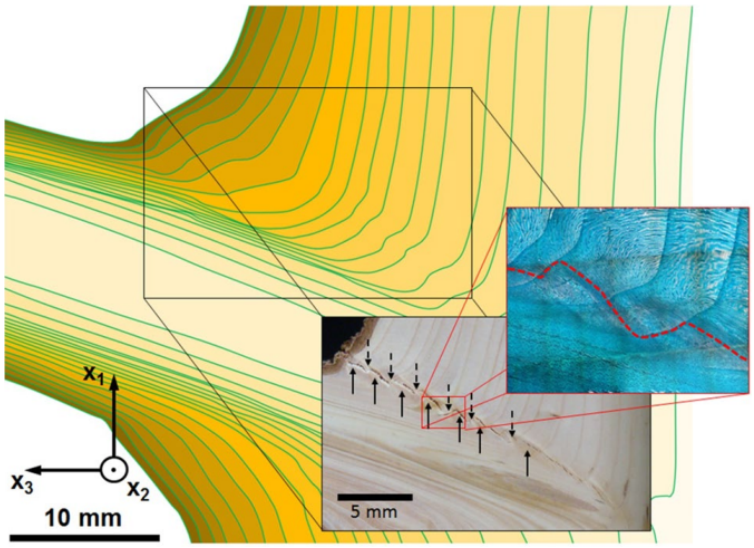


FIGURE 2.5 – Cernes au niveau de la jonction branche-arbre, montrant que les cellules de la branche et de la tige sont différenciées en parallèle par le cambium actif. La fracture à l'interface entre la branche et la tige montre un motif clair en zig-zag après une surcharge de la structure. D'après Müller et al. (2018).

fins, des parois de trachéides plus épaisses et des lumens plus petits chez les résineux (Kebbi-Benkeder et al., 2016). De plus le bois de nœuds est composé en partie de bois de réaction (Fisher and Stevenson, 1981).

Fonctions et propriétés du nœud dans l'arbre

Le nœud a trois fonctions principales, servir d'ancrage mécanique à la branche et protéger le tronc des infections qui pourraient venir lors de la mort de la branche, il sert aussi de conduit à l'eau entre la tige et la branche.

La fonction mécanique du nœud est assurée en partie par le bois de réaction. Il s'agit de bois de compression pour les résineux et de bois de tension dans le cas des feuillus. La structure globale du nœud (en "ball and socket") permet un encastrement de la branche dans la tige ce qui crée une jonction mécanique solide.

La fonction hydraulique est essentielle puisque c'est par le nœud que transite l'eau venant des racines vers les feuilles nécessaire à la photosynthèse et, dans l'autre sens, les produits photosynthétisés. Cependant, une chute de la conductivité hydraulique se produit au niveau du nœud (Zimmermann, 1978). Cela est dû à plusieurs raisons. Tout d'abord, on observe une diminution de la taille des vaisseaux dans les nœuds (Larson and Isebrands, 1978; Lev-Yadun and Aloni, 1990; Salleo et al., 1982). De plus leur structure en zigzag diminue la conductivité du xylème, celui-ci n'étant plus rectiligne (Tyree and Zimmermann, 2013). Il a en outre été montré que la conductivité hydraulique du bois de compression, chez les résineux,

était plus faible que dans le bois normal (Spicer and Gartner, 1998). Il semblerait toutefois que les trachéides normales du bois de compression assurent une conduction hydraulique suffisante vers la feuille, notamment grâce à leur nombre plus important de ponctuations (Kebbi-Benkeder et al., 2016).

Lors d'une rupture d'une branche, comme lors de n'importe quelle blessure, il risque d'y avoir une infection des vaisseaux. En effet, les spores présents dans l'atmosphère ainsi que les bactéries vont être aspirées, celles-ci étant beaucoup plus petites que les cellules de vaisseaux (Grosclaude, 1993). Il va ensuite se produire une réaction de défense de l'arbre qui va chercher à isoler l'infection dans un volume limité. La résistance naturelle du nœud grâce à sa richesse en extractibles (Kebbi-Benkeder et al., 2015) ainsi que la disposition des tissus de xylème permet notamment d'atteindre cet objectif. De plus dans le cas des feuillus, c'est une zone de protection qui se met en place autour du nœud. Celle-ci est riche en composés phénoliques qui vont empêcher l'infection par des pathogènes (Kebbi-Benkeder et al., 2016). La figure 2.6 montre clairement la résistance plus importante des nœuds face au pathogènes, comparé à la tige de l'arbre.



FIGURE 2.6 – Nœuds résiduels après détérioration d'une tige.

2.5.2 Les modèles de volume des nœuds

Le volume des nœuds est une propriété des arbres très importante pour le forestier et les transformateurs du bois. En effet, les nœuds constituent une faiblesse structurale du bois (As et al., 2006). Le changement d'orientation du fil crée une fragilité dans le bois, celui-ci étant un matériau orthotrope. Ainsi plus la surface de nœud augmente dans une planche, plus la qualité mécanique de celle-ci va se détériorer. Pouvoir connaître la géométrie de nœud permet donc d'estimer la qualité mécanique du bois.

Ces prédictions peuvent être réalisées à l'aide de mesures de branchaison (Colin and Houllier, 1991; Mäkinen and Colin, 1998; Achim et al., 2006). La méthodologie consiste à simuler la dynamique de croissance de l'arbre et de la branche grâce aux mesures de la taille et de la hauteur des branches sur des arbres d'âges différents. La taille des branches peut alors être modélisée à partir de l'âge et de la taille de l'arbre. La quantité de nœuds est déduite à partir du volume de branche inclus dans la tige. Cependant pour ce point précis, les modèles ne sont pas alimentés par des mesures.

Grâce à l'utilisation du scanner à rayon X, il est possible (Moberg, 2000; Pinto et al., 2003; Longuetaud et al., 2012; Duchateau et al., 2013; Manso et al., 2020) de directement mesurer le volume de nœud et de mettre au point des modèles le prédisant Ainsi, il devient possible de mettre au point des modèles qui relient directement le volume de nœud aux caractéristiques externes de l'arbre.

Par exemple, Duchateau et al. (2013) proposent de modéliser le volume et la forme spécifique de chaque nœud pour le pin gris et l'épinette noire, grâce à des caractéristiques de la branche qui lui sont associées, son diamètre, son angle d'inclinaison, sa position dans la tige ainsi que la hauteur totale et le diamètre de la tige. Chaque paramètre du modèle a pu ensuite être relié à une fonction de ces mesures. Cela permet donc une prédiction très précise bien que gourmande en données d'entrée. L'utilisation des rayons X permet d'évaluer très pertinemment les modèles de nœuds.

Manso et al. (2020) ont travaillé sur le même objectif, pour l'épicéa de Sitka, mais avec des modèles à effet mixte, pouvant prendre en compte l'influence des variables externes sur le diamètre du nœud. Moberg (2000) propose d'ajuster un modèle par segment du diamètre max des nœuds en fonction de la hauteur dans la tige pour le pin sylvestre. Cela permet une flexibilité accrue du modèle le long de la tige, notamment en fonction des variations des conditions de croissance. Le diamètre maximum du nœud ou de la branche d'un verticille est une variable qui est très souvent prédite par un modèle (Benjamin et al., 2009; Kershaw Jr et al., 2009; Hein et al., 2008) puisque étant le plus proche du tronc, c'est aussi le diamètre maximum du nœud, ce qui permet de le lier à celui-ci. De nombreuses études sur la tailles des branches ont aussi été menées sur l'influence de la sylviculture, en particulier la densité de peuplement (Benjamin et al., 2009; Weiskittel et al., 2007; Lula, 2016). La densité est en effet une variable de peuplement facilement manipulable et mesurable pour les gestionnaires forestiers. Il est donc d'une grande utilité de pouvoir prédire à partir de celle-ci la taille des branches, et donc par là la qualité du bois.

2.6 Les extractibles

2.6.1 Définition d'un extractible

Kebbi-Benkeder (2015) a recensé plusieurs définitions possibles des extractibles. Ainsi ceux-ci sont souvent définis par opposition aux composés structuraux du bois, la cellulose, les hémi-celluloses et la lignine. Ce sont des molécules qui sont synthétisées dans un second temps par rapport à ces composés principaux. Elles sont de poids moléculaires bien plus

faible. Leur proportion dans la composition massique du bois est inférieure. Leurs types et leurs quantités sont bien plus variables d'un individu à l'autre que les polymères.

En plus de ces différences par rapport aux composants de la matrice ligno-cellulosique, les extractibles ont certaines propriétés. Ils appartiennent à des familles chimiques très diverses. Leurs fonctions dans l'arbre sont aussi diverses, nous l'avons déjà vu. A ces propriétés, Barton (1985) ajoute la définition suivante : "Les extractibles peuvent être définis comme des substances présentes dans le bois, ne participant pas à la structure cellulaire, mais qui peuvent être extraites par des solvants comme l'eau chaude ou froide, le benzène, l'alcool, l'éther ou d'autres qui ne réagissent pas avec les composants du bois. "

2.6.2 Les différents types d'extractibles

Les terpènes

Les terpènes sont des molécules synthétisées à partir de l'isoprène (Figure 2.7) ou 2-méthylbut-1,3-diène (Zwenger and Basu, 2008). Terpènes et terpénoïdes se différencient par dqe fonctions supplémentaires chez les seconds (par exemple : carboxyle, hydroxyle ou carbonyle) alors que les premiers sont de purs hydrocarbures. Les terpènes se répartissent en différents groupes en fonction du nombre d'unités d'isoprène mises en jeu dans leur structeur. Les terpènes les plus légers sont volatils et peuvent être émis dans l'air par les plantes, par exemple pour attirer des pollinisateurs (ex. : (S)-linalool, Pichersky and Gershenzon (2002)). Les terpènes plus lourds constituent les oléorésines de bois de résineux (ex. : Larixol, Kebbi-Benkeder (2015)). De plus, certains terpènes (comme le phytol ou encore les caroténoïdes) participent au processus physiologique primaire des plantes, photosynthèse (phytol), stabilisation des membranes cellulaires (stérol) ou encore en tant qu'hormone (acide abscissique) . Ils se retrouvent donc dans toutes les plantes. La figure 2.7 donne la formule de certains terpènes.

Les phénols

Les phénols sont des composés chimiques comportant un cycle aromatique ainsi qu'au moins une fonction hydroxyle. Ils se classifient en plusieurs types suivant leur complexité.

Les stilbènes sont des composés dérivés de la phénylalanine (Figure 2.8). Ils peuvent avoir des fonctions de protections par exemple nématicide (pinosylvine), contre les herbivores (Monométhyl éther de pinosylvine) ou encore contre les maladies microbiennes (Resvératrol) (Chong et al., 2009). La figure 2.8 présente quelques stilbènes.

Les flavonoïdes sont des composés qui présentent deux cycles aromatiques reliés par un cycle pyrone (Figure 2.9). Ils en existe plus de 6 000 composés qui se trouvent de manière quasiment universelle chez les plantes vasculaires (Erlund, 2004). Ils ont des propriétés très diverses. Leur activité la mieux décrite est leur activité antioxydante (Ghedira, 2005), c'est par exemple le cas de la quercétine (Pietta, 2000). Le kaempférol a une fonction de communication entre les plantes (Sugiyama and Yazaki, 2014). Les flavonoïdes peuvent aussi attirer les pollinisateurs comme l'apigénine (Iwashina, 2003). La figure 2.9 donne la formule

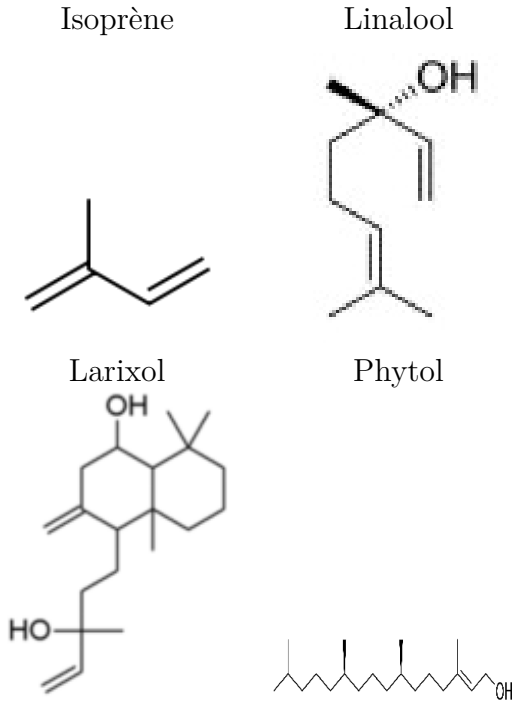


FIGURE 2.7 – Formule développée de quelques terpènes

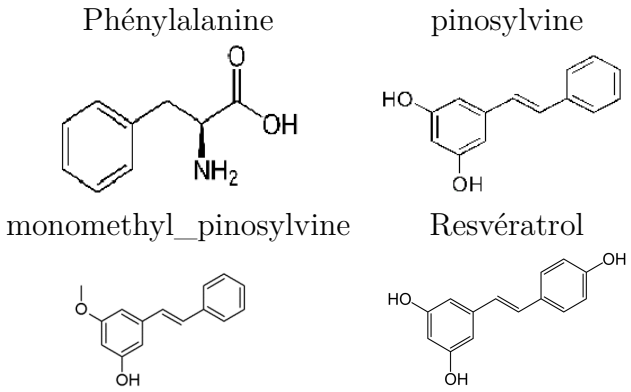
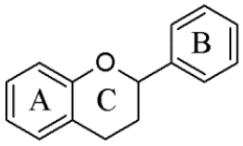


FIGURE 2.8 – Formule développée de quelques stilbènes

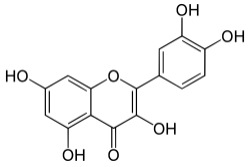
de certains flavonïdes.

Les tanins sont divisés en deux catégories, les tanins hydrolysables et les tanins condensés (Kebbi-Benkeder, 2015). Leur structure moléculaire est donnée en figure 2.10. Les tanins hydrolysables sont des esters d'acide gallique ou d'acide ellagique alors que les tanins condensés sont des oligomères d'unités flavan-3-ol. Les tanins hydrolysables se retrouvent moins souvent dans le bois que les tanins condensés (Mueller-Harvey, 2001). Les tanins ont de multiples

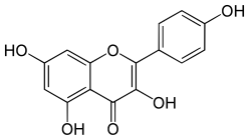
Structure basique d'un flavonoïde



Quercétine



Kaempférol



Apigénine

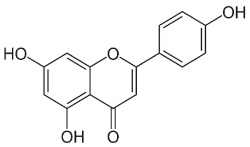
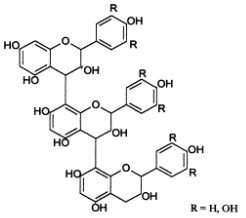


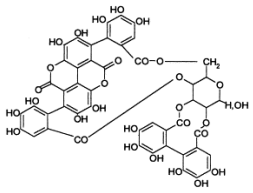
FIGURE 2.9 – Formule développée de quelques flavonoïdes

propriétés. Ils peuvent être anti-bactériens, antiviraux ou encore antioxydants (De Bruyne et al., 1999). La figure 2.10 donne la représentation de quelques tanins.

Tanins condensés



Tanins hydrolysables



Castalagine

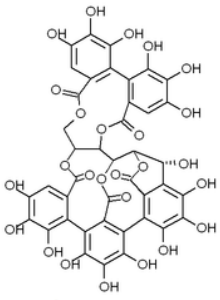


FIGURE 2.10 – Formule développée de quelques tanins. Le schéma des tanins condensés et des tanins hydrolysables vient de McSweeney et al. (2001).

Les autres composés extractibles

D'autres composés peuvent aussi se trouver parmi les extractibles, par exemple les acides gras (cires, triglycérides...), les gommes, les mono- et oligo-saccharides ou encore l'amidon

(Kebbi-Benkeder, 2015).

2.6.3 Les extractibles des écorces

L'écorce constitue la première barrière de l'arbre contre l'extérieur. Elle est donc particulièrement resistante face aux agressions. On y retrouve donc logiquement des taux d'extractibles plus grands que dans d'autres parties de l'arbre. Chez *Picea abies* le taux d'extractibles est près de 7 fois supérieur à celui qui se retrouve dans le bois. En outre la composition chimique des extractibles varie par rapport au bois. En effet, les phénols représentent plus de 85 % des extractibles que l'on retrouve dans l'écorce alors qu'ils ne représentent que 39 % des extractibles du bois. La différence est encore plus marquée pour les tanins, ceux-ci représentant une proportion des extractibles dix fois supérieure dans les écorces que dans le bois (Neiva et al., 2018). Pour *Abies alba*, c'est environ quatre fois plus d'extractibles lipophiles que l'on retrouve dans l'écorce par rapport au bois. La composition aussi diffère puisque le 4-Hydroxy-4-methyl-2-pentanone est l'extractible principal du bois tandis que celui de l'écorce est le di(2-ethylhexyl)phthalate (Salem et al., 2015). Leurs activités antioxydantes permettent de protéger l'écorce des radicaux libres produits par l'activité cellulaire. Les alkaloïdes ont eux une fonction protectrice contre les herbivores, par exemple chez le lupin blanc (Courtois et al., 2012) .

2.6.4 Les extractibles des nœuds

Assurant la jonction entre le tronc et les branches, les nœuds sont la première ligne de défense du tronc contre l'invasion des pathogènes lorsqu'une branche tombe ou est coupée. Nous avons vu que la forme même des vaisseaux de xylème empêchait l'infection de trop se propager dans le tronc en dessous de la branche coupée. Mais l'arbre a d'autres moyens de protection, parmi lesquels les extractibles.

Les extractibles des nœuds présentent une composition différente de ceux que l'on trouve dans le tronc. Par exemple chez l'épicéa, Willför et al. (2003) ont trouvé que les extractibles des nœuds étaient composés de 70 à 80 % d'hydroxymatairesinol contre 30 à 50 % pour les extractibles du tronc, ce qui est confirmé par Kebbi-Benkeder et al. (2015). Pour le sapin, Kumar et al. (2020) rapportent que les nœuds ont comme extractibles principaux, la juvabione et le secoisolariciresinal alors que l'on trouve dans le tronc plutôt du resceratrol et de l'astringenine. Kebbi-Benkeder et al. (2015) montrent pour le hêtre que le principal extractible retrouvé est la catéchine alors que pour le duramen c'est l'acide palmitique.

Ces extractibles jouent différents rôles au sein des nœuds. Par exemple, les pinsoylvines que l'on retrouve dans les nœuds des membres du genre *Pinus* (Välimaa et al., 2007; Lindberg et al., 2004) sont antibactériens et donc ralentissent voire empêchent la prolifération de bactéries dans le bois du nœud lorsque la branche est tombée ce qui préserve le reste de l'arbre. De même, les lignanes ont des propriétés protectrices vis-à-vis des intrusions microbiennes (antivirales, antimicrobiennes, Cunha et al. (2012)) et ce sont des extractibles que l'on retrouve à haute concentration dans les nœuds particulièrement ceux d'épicéa (Holmbom, 1999). Une autre fonction, suggérée par Piispanen et al. (2008) pour l'épicéa et démontrée par Grabner

et al. (2005) pour le mélèze est que les extractibles permettent une meilleure tenue mécanique du bois. Le nœud est en effet une partie très sollicitée de l'arbre puisqu'il maintient la branche, les feuilles qui y sont attachées et doit résister aux surcharges, par exemple en cas de chute de neige. Chez le mélèze c'est l'arabinogalactane qui agit comme renforcement mécanique dans la structure latérale du bois (Grabner et al., 2005). Enfin la fonction antioxydante des extractibles réduirait les dommages dus à la production de radicaux libres par les mouvements des branches (Pietarinen et al., 2006).

Chapitre 3

Méthodologie

La table 3.1 synthétise les abréviations qui seront utilisées dans ce rapport de thèse.

Tableau 3.1 – Liste des abréviations.

Abréviation	**Signification**	**Unité**
A_{su}, A_{ss}	Aire de la tige sur et sous écorce	m^2
AIC	Critère d'information d'Akaike	
alt	Altitude	m
E_p	Rapport entre le volume d'écorce et le volume de tige ($\frac{E_v}{V_{su}}$)	%
D2H	$D130^2 \cdot H_{tot}$	
Bp-test	Résultat du test de Breush-Pagan	
DN_{max}	Diamètre du plus grand nœud d'un verticille	
E_{ep}	Épaisseur d'écorce à une hauteur donnée dans la tige	m
E_s	surface d'écorce à une hauteur donée dans la tige	m^3
E_v	Volume total d'écorce	m^3
$EE130$	Épaisseur d'écorce à 1m30	m
D_{su}, D_{ss}	Diamètre de tige sur et sous écorce	m
$D0_{ss}$, $D0_{su}$	Diamètre de tige au niveau du sol sur et sous écorce	m
$D130$	Diamètre de tige à 1m30 (sur écorce)	m
LH	Longueur du Houppier, de la base du houppier au sommet de la tige	m
h	Hauteur dans l'arbre	m
HBH	Hauteur de la base du houppier	m
H_{tot}	Hauteur totale de l'arbre	m
H_{rel}	Hauteur relative (h/H_{tot})	m
PEM	Propagation de l'erreur de mesure	
$RMSErel$	Racine de l'erreur quadratique moyenne relative	%
T_s	Surface de tige	m^2
$SE130$	Surface d'écorce à 1m30	m^2
V_{su}, V_{ss}	Volume de tige sur et sous écore	m^3

3.1 Campagne de mesure

Dans le cadre du projet ExtraFor_Est, nous avons mené une campagne d'échantillonnage. Celle-ci nous a permis d'obtenir de nouvelles mesures très précises de surface d'écorce et de nœuds grâce à l'utilisation d'un scanner à rayon X pour les six essences, *Abies alba*, *Picea abies*, *Pseudotsuga menziensi*, *Quercus robur*, *Quercus patraea*, *Fagus sylvatica* étudiées dans ce travail.

3.1.1 Protocole d'abattage des arbres

Le choix des arbres à échantillonner a été tout d'abord guidé par l'existence de placettes expérimentales. Ainsi grâce aux informations obtenues auprès de l'ONF concernant ces placettes, il sera possible de tester si la sylviculture a une influence sur les volumes des compartiments. En effet, il s'agissait de parcelles expérimentales destinées à tester l'influence de plusieurs types de sylviculture sur les caractéristiques des arbres. Nous disposons donc de l'intégralité des informations concernant les opérations sylvicoles effectuées dans ces parcelles au cours de l'expérimentation. Nous n'avons malheureusement pu obtenir ces informations pour le hêtre, le chêne sessile et le chêne pédonculé. Seuls les sapins, épicéas et Douglas proviennent donc de ces placettes à sylvicultures différenciées. Une fois la sélection des arbres effectuée, le protocole reste toutefois le même pour toutes les essences. L'abattage des arbres a eu lieu pendant l'hiver 2018 pour les sapins, les épicéas et les Douglas et pendant l'hiver 2019 pour les chênes et les hêtres.

Les sapins proviennent de St-Prix, en Saône-et-Loire (71), les épicéas de Mas Dorier, dans le Cantal (35), les Douglas de Mélagues dans l'Aveyron (12) et les hêtres et les chênes viennent de Goviller en Meurthe-et-Moselle (54).

La sélection des sapins, épicéas et Douglas s'est faite de la manière suivante. Tout d'abord parmi les placettes expérimentales nous en avons choisi deux. L'une était la parcelle témoin, c'est-à-dire sans éclaircies. L'autre correspondait à la sylviculture la plus dynamique. Notons que pour cette dernière l'intensité de l'éclaircie n'est pas la même en fonction des endroits et donc des espèces, mais nous disposons des valeurs de densités de population après chaque éclaircie. Les arbres ont ensuite été choisis de façon à représenter les différentes classes d'arbres présentes sur la parcelle. Nous avons choisi quatre arbres de chaque essence pour les parcelles témoins et quatre pour les parcelles dynamiques. Ainsi, huit sapins, huit épicéas et huit Douglas ont été abattus lors de cette campagne. De plus, les Douglas ont été soumis à un scan au lidar terrestre ce qui nous a permis d'enregistrer la forme des troncs et du houppier de chacun des arbres.

Pour la sélection des chênes et hêtres, nous avons sélectionné les arbres après mesure de la circonférence à 1m30 afin d'avoir des arbres qui représentaient au mieux la plage de variation en circonférence de la parcelle. Nous devions récupérer 5 chênes et 5 hêtres en plus sur une autre parcelle mais cet échantillonnage n'a pas pu être mené à bien.

Une fois les arbres choisis, nous avons pu passer à l'échantillonnage proprement dit. Celui-ci est récapitulé sur la figure 3.1. Tout d'abord, il s'agissait de marquer à la griffe les hauteurs de 30 cm, 80 cm et 130 cm ainsi que le nord sur chacun des arbres. Nous les avons

ensuite abattus, puis nous les avons mesurés tant en circonférence qu'en hauteur. Enfin nous avons sélectionné un ensemble de branches représentant différentes classes de circonférence à l'insertion. Les classes retenues étaient 0-7 cm de diamètre à l'insertion, 4-7, 7-20 cm et plus de 20.

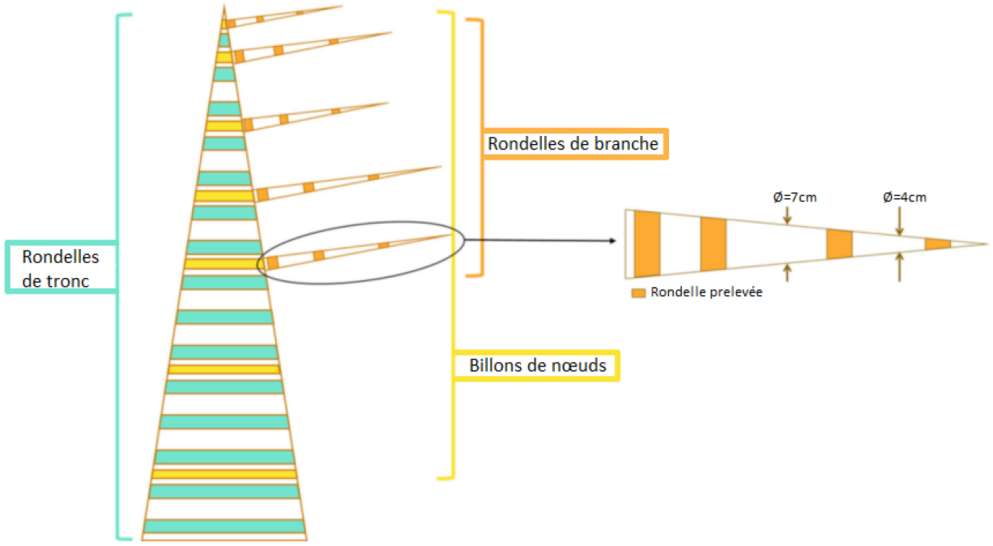


FIGURE 3.1 – Schéma du protocole d'échantillonnage d'ExtraFor_Est (d'après Billard et al. (2020))

Une fois les branches sélectionnées, nous avons pu élaguer le reste des branches afin de pouvoir travailler plus facilement. Nous avons ensuite mesuré la longueur des branches, leur circonférence à l'insertion, leur hauteur d'insertion sur le tronc ainsi que la circonférence du tronc au niveau de l'insertion. Le choix des branches s'est fait de la manière suivante.

Nous avons tout d'abord défini quatre classes de branche en fonction de leur diamètre à l'insertion : 0-4 cm, 4-7 cm, 7-20 cm et plus de 20 cm. Nous avons pris cinq branches de chaque classe de la plus grosse à la plus petite. Si nous ne pouvions prendre cinq branches dans une classe, nous en prenions dans la classe inférieure afin d'arriver à cinq branches. Enfin, nous essayions d'avoir au minimum dix branches. Ainsi si cet objectif n'était pas atteint nous avons pris le nombre de branches restantes dans la plus grosse des classes où il restait des branches à prélever. Ensuite nous avons prélevé des morceaux de branches selon la règle suivante : un prélèvement à l'insertion de la branche, puis un à mi-longueur de chacune des gammes de diamètres retenues (0-4, 4-7, 7-20, +20). Chacun des échantillons est alors numéroté afin d'assurer son suivi par la suite.

Pour les mesures du volume d'écorce, nous avons prélevé des rondelles de tronc le long de la tige. Pour cela, nous avons divisé le tronc en douze segments de longueurs identiques entre la hauteur de 1m30 et le sommet de l'arbre. Cela nous a permis de prélever des rondelles à des hauteurs régulières afin de pouvoir par la suite avoir des mesures sur l'intégralité de la tige de l'arbre. En plus de ces douze rondelles, d'autres rondelles ont aussi été prélevées à 0,3

m, 0,8 m et 1m30. Cela fait donc quinze rondelles de tronc au total par arbre. De plus, nous avons veillé au maximum à ce que ces rondelles ne comportent pas de nœuds, les intervalles de hauteur peuvent donc ne pas être rigoureusement identiques. La hauteur de rondelle a donc été relevée pour chaque rondelle.

Pour les mesures des volumes de nœuds, nous avons prélevé des billons de tige contenant les nœuds de cinq des branches sélectionnées en essayant d'en prendre sur toute la tige. Toutefois, pour certains arbres, comme les branches sélectionnées se situaient sur moins de cinq verticilles différents, il y a moins de cinq billons découpés. Mais il y a toujours au moins cinq nœuds correspondant aux cinq branches sélectionnées. En plus de ces cinq nœuds vivants, nous avons sélectionné par arbre deux nœuds morts et prélevé les billons correspondants. Pour chacun de ces billons, nous avons mesuré la hauteur dans la tige.

Par arbre nous avons donc collecté 15 rondelles de tronc, 2 billons de nœuds morts, 5 billons de nœuds vivants et un nombre de branches variant entre 10 et 20. Une fois coupées, les rondelles de tronc ont été emballées dans du cellophane afin de limiter les pertes d'eau lors du transport. Les autres ont simplement été stockées. En plus de ce protocole, qui concerne les échantillons étudiés pendant cette thèse, nous avons collecté également des échantillons pour les analyses du LERMaB (Laboratoire d'Étude et de Recherche sur le Matériau Bois), partenaire dans le cadre du projet ExtraFor_Est, qui ont servi à déterminer les concentrations en extractibles dans les nœuds et dans l'écorce à différentes hauteurs dans l'arbre. Le protocole de sélection de ces échantillons pour les études chimiques ne sera pas détaillé ici.

3.1.2 Protocole de passage au scanner

Avant de passer les échantillons dans le scanner à rayon X nous les avons préparés. Tous les échantillons, sauf les échantillons de branches, ont été marqués d'un trait de scie sur la marque du nord. Cela permet de repérer le nord sur les scans par la suite, mais aussi d'éviter le fendage de la rondelle lors du séchage. Après avoir été sciées, les rondelles de tronc ont été passées le plus vite possible au scanner afin d'éviter au maximum la perte d'humidité. Tous les autres échantillons ainsi que les rondelles de tronc une fois scannées ont été mis à sécher à l'air libre. Après environ un mois nous les avons ensuite mis à l'étuve à 103 °C afin d'obtenir un état anhydre. Nous avons considéré l'état anhydre comme étant atteint lorsque nous n'observions plus de diminution de masse de l'échantillon pendant deux jours successifs. Tous les échantillons une fois anhydres ont été passés au scanner.

Lorsque les billons sont scannés, les résultats sont obtenus sous la forme d'un certain nombre d'images en niveau de gris (coupes tomographiques). Le nombre d'images peut être ajusté ainsi que leur précision, ce qui fait aussi varier la largeur du champ de vue car le nombre de pixels enregistrés par le scanner reste le même. Une précision plus grande implique donc des pixels représentant un espace plus petit et donc un champ plus petit. L'intervalle entre chaque image a été fixé. Après passage au scanner, un ensemble d'images a donc été obtenu. Chaque pixel de chaque image représente un voxel, c'est-à-dire un pixel de 1.25 mm de profondeur. A chaque voxel est associée une valeur de niveau de gris qui correspond à la quantité de rayons X reçue par le détecteur après avoir traversé le voxel. La calibration du

scanner permet de calculer la densité du bois correspondant à ces niveaux de gris (Freyburger et al., 2009)

3.2 Données déjà disponibles

En plus de l'échantillonnage effectué dans ce projet, nous avons récupéré un certain nombre de données issues d'autres projets. Ces données sont récapitulées dans le tableau 3.2.

3.2.1 Présentation des données EMERGE

Provenant du projet EMERGE et gracieusement fournies par le FCBA qui les a archivées dans le cadre du projet ExtraFor_Est et d'une collaboration étroite avec Alain Bouvet du FCBA, ces données sont importantes en quantité au niveau européen voire mondial. EMERGE a été un projet dirigé par l'Office National des Forêts et financé par l'Agence Nationale de la Recherche (Deleuze et al., 2013). Ce projet a été achevé en 2013. Il avait pour objectif d'estimer la biomasse ligneuse disponible dans les forêts françaises. Huit organisations de recherche françaises et de R&D ont travaillé ensemble sur ce projet. Les données récoltées correspondent à de nombreuses campagnes de terrain menées pendant plus de cinquante ans au sein du FCBA, du CTFT et de l'INRA sur tout le territoire français. Cependant, contrairement aux données précédentes qui nécessitaient d'abattre les arbres afin d'en retirer des rondelles pour pouvoir mesurer l'écorce, ces données-ci ont été obtenues selon deux méthodes différentes. Une partie des données a été obtenue grâce à l'utilisation d'une jauge à écorce. Une autre partie des données a été obtenue par l'utilisation de la méthode « d'écorçage ». Pour chaque arbre nous avons donc un certain nombre de mesures d'épaisseur d'écorce (E_{ep}) ainsi que de diamètres sur écorce (D_{su}) à différentes hauteurs dans l'arbre. De plus, des données au niveau de l'arbre ontété prises comme la hauteur totale (H_{tot}), le diamètre à 1m30 ($D130$) et la position géographique de l'arbre (altitude, latitude, longitude). Cependant, quand l'épaisseur d'écorce à 1m30 ($EE130$) n'avait pas été mesurée, nous avons effectué une interpolation entre les deux plus proches valeurs de 1m30 pour l'estimer. Le principal avantage de ces données est leur grand nombre, ce qui est appréciable en vue de faire une modélisation globale. La figure 3.2 donne la localisation de ces données. On y retrouve en tout : 21 221 mesures pour 924 sapins, 22 658 mesures pour 1 032 épicéas, 4 931 mesures pour 375 Douglas, 15 222 mesures pour 1 459 chênes sessiles, 10 441 mesures pour 515 chênes pédonculés et 30 947 mesures pour 1 419 hêtres. En plus de ces mesures effectuées sur nos essences d'intérêt, 5 473 arbres de 86 autres espèces ont été mesurées.

3.2.2 Présentation des données IGN

Ces données ont été obtenues par l'Institut Géographique National dans le cadre de l'inventaire forestier. C'est une base de données conséquente puisqu'elle rassemble 215 316

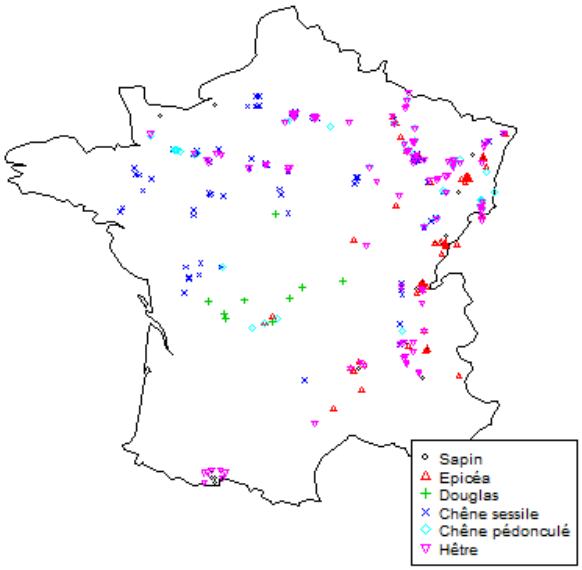


FIGURE 3.2 – Localisation des données EMERGE.

arbres de nos six essences sur l'ensemble du territoire français. Pour chaque arbre nous connaissons la position de l'arbre ainsi que ses $D130$, H_{tot} et $EE130$.

3.2.3 Présentation des données Modelfor

Modelfor est un autre projet ayant permis de réaliser des scans de rondelles (Longuetaud et al., 2016). Ces données concernent des sapins et des Douglas. Des rondelles de tronc ont été prélevées tous les 2 mètres depuis le sol. Les rondelles ont ensuite été emballées dans du cellophane afin d'éviter la perte d'humidité. Un trait de scie a été pratiqué sur les rondelles afin d'empêcher le fendage pendant le séchage et de connaître l'orientation des rondelles dans l'espace. Puis les rondelles ont été scannées fraîches puis séchées 24h à l'étuve à 103°C avant d'être scannées de nouveau à l'état anhydre. Nous avons ainsi pu récupérer 104 rondelles pour 30 Douglas et 344 rondelles pour 29 sapins. En plus de ces prélèvements, 9 Douglas et 6 sapins ont été scannés intégralement. Ils pourront donc être utilisés afin de mesurer les volumes de nœuds dans la tige.

3.2.4 Présentation des données de mesure optique

Nous appelons données dendrologiques, des données qui sont obtenues à partir d'un banc de mesure optique. Ces mesures sont réalisées sur des rondelles de tronc. Celles-ci sont polies en surface afin d'obtenir un démarquage net des cernes et de l'écorce. Ensuite, le rayon-sous-écorce et E_{ep} sont mesurées au dixième de millimètre près. Cette mesure est faite sur deux diamètres perpendiculaires, de chaque côté de la moelle. Cela nous donne donc quatre mesures de rayon sur écorce et de E_{ep} par rondelle. Il s'agit de rondelles de hêtre et de chêne. Cela correspond à 1 084 rondelles de hêtre pour 65 arbres et à 1 044 rondelles de chêne pour 80 arbres.

Tableau 3.2 – Composition des différentes bases de données utilisées

Base de données	Essence	Nombre de mesures	Nombre d'arbres	Type de mesures
EMERGE	Sapin	16 074	705	Jauge à écorce
		5 179	228	Écorçage
	Epicéa	19 116	809	Jauge à écorce
		1285	53	Écorçage
	Douglas	4 618	313	Jauge à écorce
		944	67	Écorçage
	Chêne sessile	15 222	1 459	Jauge à écorce
		0	0	Écorçage
	Chêne pédonculé	10 441	515	Jauge à écorce
		0	0	Écorçage
	Hêtre	29 231	1 352	Jauge à écorce
		0	0	Écorçage
IGN	Sapin	25 258	25 258	Jauge à écorce
	Epicéa	41 950	41 950	Jauge à écorce
	Douglas	17 537	17 537	Jauge à écorce
	Chêne sessile	46 540	46 540	Jauge à écorce
	Chêne pédonculé	41 291	41 291	Jauge à écorce
	Hêtre	42 740	42 740	Jauge à écorce
ExtraFor_Est	Sapin	120	8	Scanner
	Epicéa	120	8	Scanner
	Douglas	120	8	Scanner
	Chêne	75	5	Scanner
	Hêtre	75	5	Scanner
Modelfor	Sapin	344	29	Scanner
	Douglas	404	30	Scanner
Autres projets	Chêne	1 044	84	Banc de mesure optique
	Hêtre	1 084	65	Banc de mesure optique

3.3 Détourage des images scannées

Le détourage est l'action qui permet de séparer deux parties de l'image sur les images obtenues du scanner. Cela se fait pour les nœuds qui sont virtuellement séparés de la tige afin de connaître leur volume et pour l'écorce qui est séparée de la tige pour mesurer sa surface. Nous avons fait ce travail pour les billons de nœuds et les rondelles de tronc que nous avons obtenus dans le cadre de l'échantillonnage d'ExtraFor_Est et du projet Modelfor. Nous allons présenter au paragraphe 4.3.2 les différents protocoles de détourage que nous avons testé au long de ce travail.

3.3.1 Présentation de Gourmand et CalDenQB

a. b.

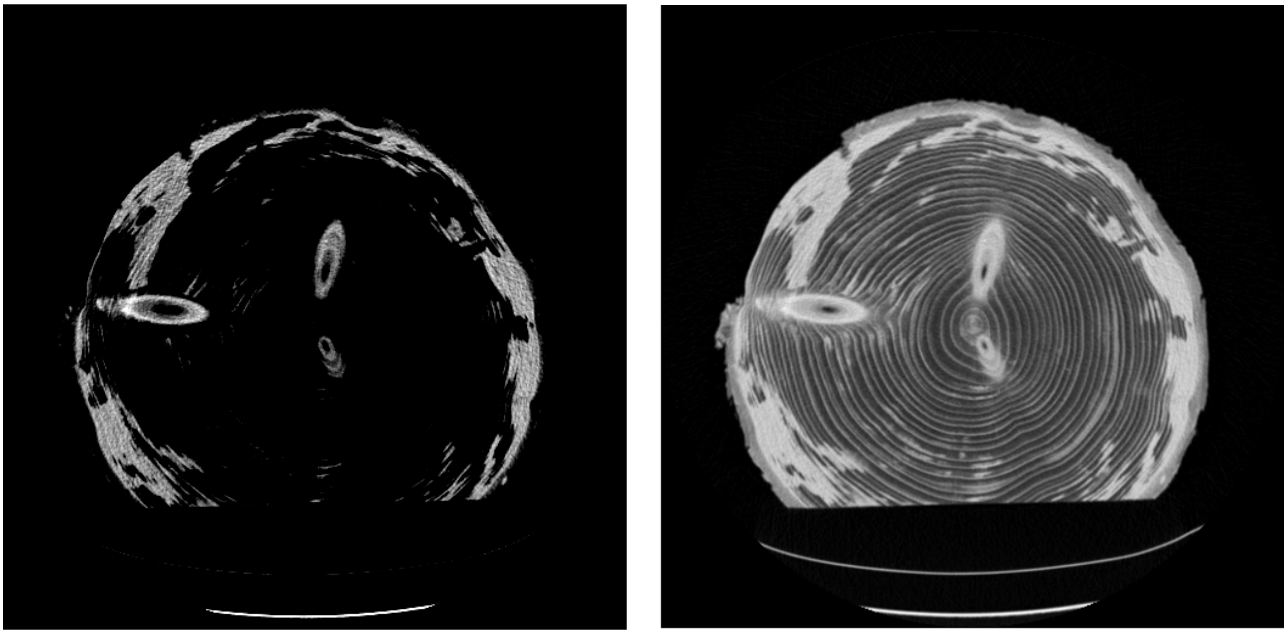


FIGURE 3.3 – Image obtenue par scanner avant (a) et après (b) application de CaldenQB.

Gourmand et CaldenQb sont deux plugins pour le logiciel ImageJ qui ont été développés par Frédéric Mothe. Nous avons utilisé ImageJ pour le traitement des images scannées obtenues parce qu'il permet d'analyser une « pile » d'images. Une pile d'images est l'ensemble des images issues du scan d'un même billon ou rondelle. Lorsqu'elles sont ramenées dans une pile il est alors possible de se « déplacer » à l'intérieur du billon en changeant d'image et cela facilite donc le détourage des nœuds en trois dimensions. CalDenQB, est un plugin qui a pour but de transformer les niveaux de gris des images scannées en valeurs de masse volumique. Il se base sur le travail effectué par Freyburger et al. (2009). Le plugin ajuste

aussi le contraste de l'image. Nous obtenons ainsi une image facilement utilisable. La figure 3.3 montre la différence entre avant et après l'application du plugin.

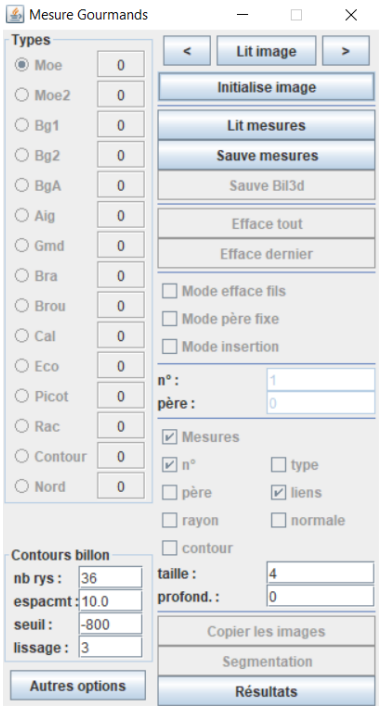


FIGURE 3.4 – Interface du plugin gourmand

Gourmand (Figure 3.4) a lui plusieurs fonctionnalités. Dans le cadre de ce travail, nous en avons utilisé une seule, la fonctionnalité « branche ». Celle-ci permet de placer des points de part et d'autre du nœud comme montré dans la Figure 3.5a. Lorsque ces détourages sont effectués, le pluginajuste à partir de la position des points sur la figure un cône représentant le volume de nœud détouré. Un autre programme, Bil3D permet de représenter ce nœud. La figure 3.5b est la représentation 3D du nœud détouré dans la figure 3.5a. Une fois ce cône modélisé, le plugin est capable d'en calculer le volume. Une autre fonctionnalité a été utilisée, appelée « contour ». Celle-ci permet de séparer l'écorce de la tige sur les rondelles de nœuds. Une fois le contour posé, le plugin va calculer le nombre de pixels d'écorce entre le contour et le « vide » représenté les pixels dons la masse volumique associée est inférieure à 100 $kg.m^{-3}$. Ensuite, le nombre de pixels est converti en surface. Ce procédé permet de prendre en compte toutes les irrégularités de l'écorce dans le calcul de sa surface.

a. b.

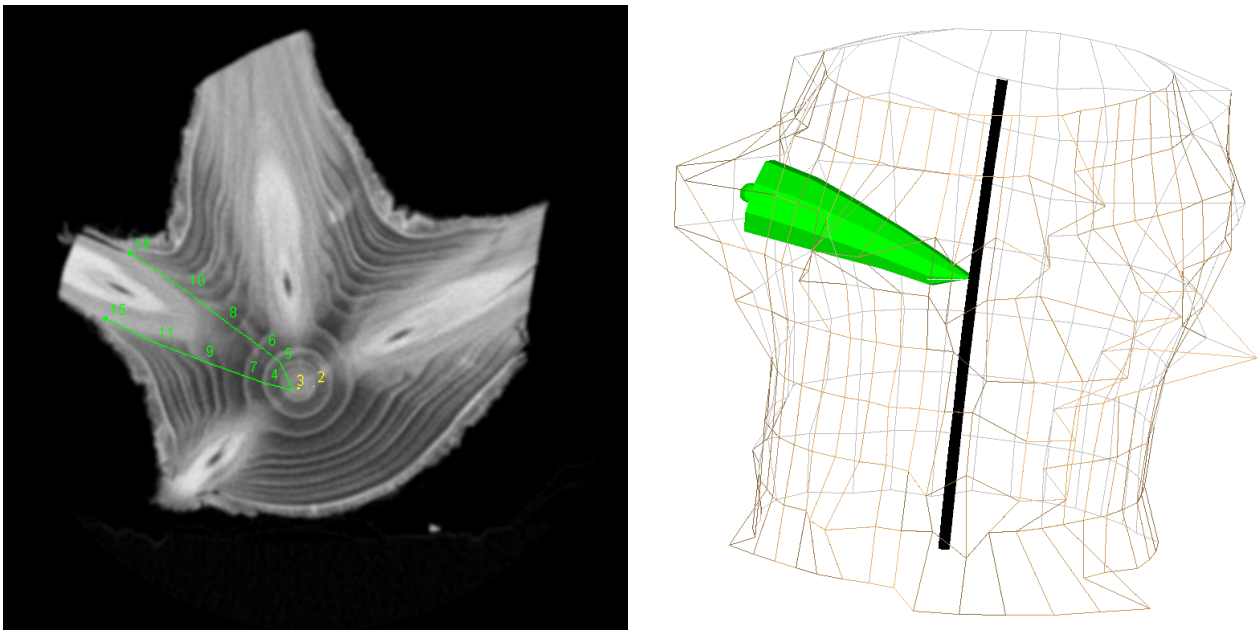


FIGURE 3.5 – Exemple de détourage d'un nœud (ici d'épicéa) sous imageJ (a) et représenté par Bil3D (b)

3.3.2 Le détourage des nœuds

Le problème principal que nous avons rencontré lors de la mise au point du protocole de détourage fut sa répétabilité. En effet, nous avons fait une première comparaison entre cinq opérateurs sur six nœuds d'épicéa. Cela montrait une importante variabilité entre les opérateurs. Ainsi pour un même nœud, certains opérateurs trouvaient des valeurs de volumes qui variaient du simple au décuple. Ce n'était donc évidemment pas exploitable, et il fallait mettre au point un protocole qui puisse être répétable entre les différents opérateurs et engendrer des résultats relativement proches.

Nous devions tout d'abord définir la différenciation entre ce qui est du bois du nœud et ce qui est du bois du tronc. Cette différenciation se fait lors du placement des points de la fonctionnalité « gourmand ». Ce placement était laissé au début au libre choix de l'utilisateur, ce qui engendrait forcément des différences d'interprétation. En effet la seule manière de différencier un nœud du bois réside dans les différences de niveaux de gris. En fonction des essences, cela peut se faire de deux manières différentes. Soit il existe une véritable différence de masse volumique entre le nœud et la branche, comme par exemple chez l'épicéa, et alors, il est possible de déterminer la limite par la différence de niveau de gris. Ou bien cette différence n'est pas perceptible, ou n'existe tout simplement pas, par exemple chez le hêtre, et alors il faut se baser sur la forme des cernes pour déterminer l'emplacement du nœud.

Nous avons tout d'abord étudié le premier cas. Il fallait donc écrire un protocole qui détermine de manière fiable le niveau de gris à considérer comme faisant partie du nœud. Nous sommes passés par plusieurs étapes. Tout d'abord, nous avons posé une règle de base concernant le placement des points. Le placement des points doit se faire de part et d'autre de la moelle et de façon à ce que la droite définie par ces deux points soit orthogonale à la droite modélisant la moelle de la branche. En second lieu, nous avons étudié la possibilité d'utiliser un filtre de canny pour rehausser les contours. Le filtre Canny Edge d'image a pour effet de marquer d'une ligne blanche les endroits de forte variation de niveaux de gris comme montré sur la figure 3.6 . Ainsi il permet de visualiser plus facilement ces différentiels de densité et donc de placer les points de manière plus répétable. En outre, comme il se base sur la variation de masse volumique et non pas sur la valeur de masse volumique, il ne fausse pas les mesures par le rejet arbitraire de certaines valeurs. Les résultats obtenus avec ces méthodes étaient insuffisamment proches pour en valider la pertinence. Si Canny Edge permet une meilleure vision des variations de masse volumique, les lignes de contour sont trop nombreuses pour que l'utilisateur ait une précision parfaite lors de son détourage.



FIGURE 3.6 – Application de Canny edge

De plus, cette technique ne tentait de résoudre qu'un seul problème, celui de la limite entre le nœud et le tronc. Mais la question de la limite entre la branche et le nœud n'était pas abordée. Ce problème a été résolu en posant arbitrairement une limite entre le nœud et la branche qui soit la même pour tout le monde. La limite nœud/branche a été abordée par

la méthode nommée « méthode du point triple ». Ce que ne nous appelons « point triple » correspond à la rencontre entre le bois du nœud, le bois du tronc et l'écorce. C'est par exemple les points n° 14 et 15 de la figure 3.5 a. Il en existe donc deux par nœud sur une coupe transversale, un de chaque côté. Pour bien placer ces deux points, il faut en outre ajouter la condition d'équidistance de ces deux points avec la moelle. En effet, dans une pile d'images il existe pour chaque nœud une paire de points triples sur chaque coupe.

La méthode a été étoffée d'une nouvelle technique de détourage. Après plusieurs discussions, nous avons conclu que le plus simple pour détourer reviendrait à faire un détourage à partir de l'extérieur du nœud. En effet, à cet endroit, la différence entre le nœud et le tronc est bien plus visible. Et cela permet de travailler dans le prolongement de la branche jusqu'à la moelle du tronc. Mais cela outrepassait les limites de Gourmand. En effet, celui-ci a besoin de liens entre les différents points de détourage du nœud et le point indiquant la présence de la moelle. Nous avons donc contourné ce problème en faisant un détourage en deux étapes. La première étape consistait à placer les points jusqu'aux points triples. Ceux-ci définissaient réellement le début du détourage qui a lieu à la seconde étape où l'opérateur doit revenir en arrière pour replacer les points autour de la moelle en suivant la limitation définie par les deux points triples. Cette méthode a commencé à donner de bons résultats mais une question restait toujours en suspens : la délimitation entre le nœud et la branche est-elle valable ? En effet, cette technique impose de considérer un nœud très large qui peut, à bien des égards, aller jusqu'à la branche, puisque sur certains nœuds nous allions jusqu'au-delà du bourrelet d'insertion de la branche. Ce qui peut poser des problèmes par la suite lors de l'estimation des biomasses et des quantités d'extractibles. Il nous a donc fallu chercher une autre méthode pour pouvoir avoir des résultats plus pertinents.

Ainsi, nous avons testé une dernière méthode. Elle reprend le principe du détourage « à rebours » mis au point lors de la méthode du point triple. Mais nous avons changé la méthode de détermination de la délimitation nœud/branche. En effet, nous avons pour cela considéré la distance qui sépare la moelle du tronc de l'écorce selon l'orientation du nœud dans le tronc au bas du verticille, en-dessous de l'insertion du nœud dans la moelle de la tige. Cette technique permet de modéliser la largeur de la tige si celle-ci n'avait pas de nœuds. Et donc de trouver l'endroit où la branche commence à sortir du tronc même s'il y a encore de la présence de bois de tronc autour d'icelle.

3.3.3 Le détourage des écorces

Le protocole pour détourer les écorces a été plus simple à mettre en place que celui pour détourer les nœuds. En effet, la séparation entre écorce et bois se fait à l'aide du repérage du cambium. Ceci est rendu possible grâce à la différence de densitée entre écorce et bois. La fonctionnalité « contour » du plugin gourmand permet de positionner manuellement des points sur le cambium. Une fois le tour du cambium effectué, un autre plugin (Sectoriseur, destiné aux mesures de densité) calcule automatiquement la surface. Pour chaque rondelle nous avons mesuré la surface d'écorce sur la première image complète du haut de la rondelle. La figure 3.7 montre le résultat du détourage d'une rondelle d'écorce.

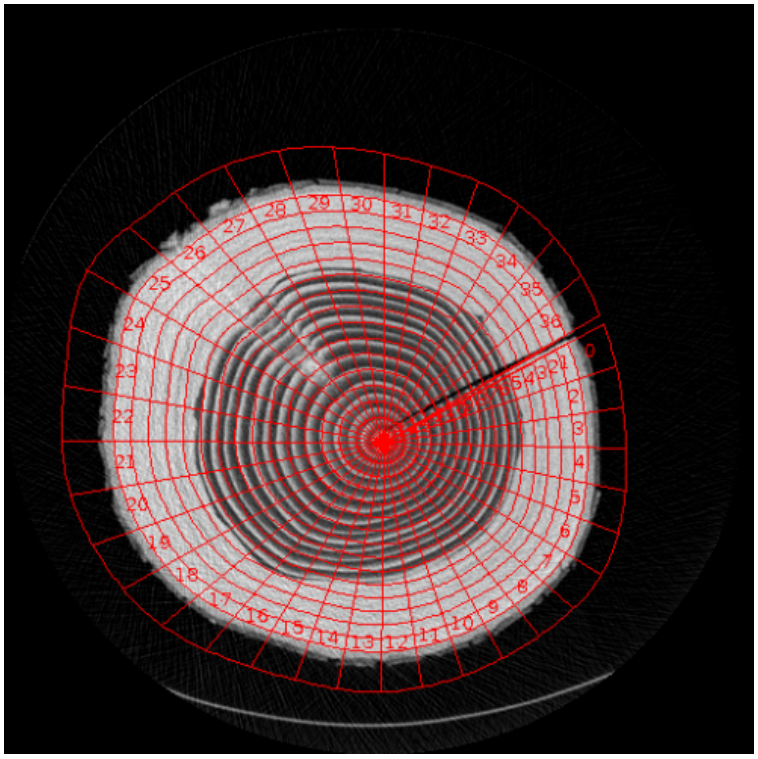


FIGURE 3.7 – Détourage des écorces à l'aide des plugins Gourmand et Sectoriseur. La limite bois écorce est matérialisée par le second contour le plus externe.

3.4 La méthode de modélisation

Lorsque les mesures ont été réalisées et collectées, nous nous sommes engagés dans un processus de modélisation qui a constitué le cœur de travail de cette thèse. L'objectif de ce travail était de mettre au point des modèles de prédiction grâce au language R (R Core Team, 2018). Nous allons dans cette partie décrire la méthodologie mise en place avec R.

3.4.1 Fonctions utilisées dans R

Le language R dispose de plusieurs fonctions qui vont nous permettre d'ajuster les modèles. Nous avons utilisé principalement trois fonctions, les fonctions « gnls », « nls » et « nlme » ainsi que dans certains cas, « nlsLM ». Les fonctions « nls », « gnls » et « nlsLM » sont trois fonctions qui permettent de calculer les valeurs des paramètres pour un modèle non-linéaire. La fonction « nls » se base sur l'utilisation de l'estimateur des moindres carrés (Gauss, 1809; Legendre, 1805) afin de déterminer la valeur des coefficients des modèles les plus optimaux. Les fonctions « gnls » et « nlsLM » utilisent l'estimateur des moindres carrés généralisés (Aitken, 1936). Ainsi si l'une des méthodes échoue à calculer les coefficients d'un modèle nous pourrons varier les méthodes d'approximation utilisées avant de déclarer un

modèle inapte à représenter nos données. La fonction « nlme » nous permet d'ajouter des effets aléatoires sur les paramètres des modèles ; cette fonction n'a donc été utilisée que lors du calcul des coefficients des modèles mixtes.

La fonction « nlsList » a été utilisée dans un cadre particulier. En effet, celle-ci permet la comparaison des résultats d'un même modèle en fonction du groupe de données utilisé pour la modélisation. Ainsi, nous pouvons voir s'il est pertinent de distinguer deux essences, par exemple le chêne pédonculé et le chêne sessile, et de faire un modèle pour chacune d'elles. De plus il permet aussi de tester la pertinence d'introduire des effets aléatoires.

3.4.2 Effets fixes/effets aléatoires

Les effets fixes correspondent aux effets qui vont influencer la moyenne des valeurs prédites. Ce sont donc des constantes inconnues qui doivent être estimées grâce aux données. Les effets aléatoires sont les erreurs qui s'appliquent à des sujets qui représentent des niveaux hiérarchiques plus élevés que celui de l'unité d'observation. Nous avons appliqué les modèles à effets mixtes uniquement sur les modèles de prédiction internes de l'arbre comme les modèles de surface d'écorce en fonction de la hauteur. Ainsi nous pouvons voir s'il existe des effets aléatoires liés à l'arbre montrant donc des variations significatives entre les arbres et éventuellement les mettre en lien avec d'autres paramètres.

3.4.3 Mise en évidence de l'influence des variables arbres

Les variables « arbre » sont des variables à valeur unique au sein d'un arbre, par exemple $EE130$, $D130$ ou encore H_{tot}. Une fois les modèles ajustés, nous pouvons regarder si l'un ou l'autre des paramètres calculés pourrait être lié à une de ces variables arbre. Deux méthodes sont alors possibles. La première consiste à utiliser les effets mixtes comme expliqué plus haut. C'est la méthode qui a été utilisée pour les modèles de surface d'écorce. Cela a l'avantage d'identifier directement les valeurs des paramètres évoluant en fonction de l'arbre considéré. En revanche comme il est parfois nécessaire, afin de faire converger le modèle, de supprimer les effets aléatoires sur certaines variables, des influences peuvent alors ne pas être remarquées. Une autre méthode qui a aussi été utilisée consiste à faire converger le modèle étudié arbre par arbre. Nous obtenons alors une valeur de chaque paramètre pour chaque arbre. Il suffit ensuite d'afficher graphiquement la relation entre les variables et les paramètres afin de voir si une relation semble se dégager. L'utilisation de la fonction « pairs » de R permet notamment d'automatiser cette partie ainsi que d'avoir le résultat d'une régression linéaire entre paramètres et variables. Par rapport à la première méthode, celle-ci a l'avantage de pouvoir être mieux contrôlée mais elle prend plus de temps de calcul et il n'est pas toujours certain qu'un modèle global puisse converger sur tous les arbres individuellement. Enfin nous avons utilisé une troisième méthode pour déterminer l'influence de l'altitude sur $EE130$. Pour ce faire, nous avons réparti les arbres en différentes catégories en fonction de leur altitude. Chaque catégorie devait contenir au moins 5% des arbres sinon elle était ajoutée à la catégorie la plus proche. Nous avons ensuite calculé l'altitude moyenne de chaque catégorie ainsi que la valeur du paramètre étudié. Ainsi nous avons pu obtenir une régression linéaire.

Cette méthodologie peut être utilisée lorsqu'un effet précis à déjà été remarqué et que l'on cherche uniquement à le quantifier. En effet, en s'affranchissant des valeurs extrêmes il devient plus facile de mettre en évidence la relation. Il convient toutefois de rester prudent avec la relation obtenue et de vérifier par la suite dans le modèle étudié qu'elle l'améliore bien significativement.

3.4.4 Gestion de l'hétéroscédasticité

Gérer l'hétéroscédasticité des données est un point primordial dans la mise au point de nos modèles au niveau de l'arbre, comme les modèles de volume d'écorce. En effet, à l'instar de beaucoup de résultats biologiques, nous avons une disposition en V de ceux-ci : ils sont très semblables pour les petites valeurs et plus les valeurs augmentent, plus la dispersion des mesures augmente (Figure 3.8). Il existe plusieurs manières de gérer les situations d'hétéroscédasticité, nous allons ici voir les quelques-unes qui ont été testées pendant ce travail. De plus, afin de vérifier le postulat d'homogénité de la variance, nous allons utiliser le test statistique de Breush-Pagan (Breusch and Pagan, 1979). Celui-ci prend comme hypothèse nulle l'homogénité de la variance. Il nous permettra donc de réperer les cas où le postulat d'homogénité de la variance n'est pas respecté.

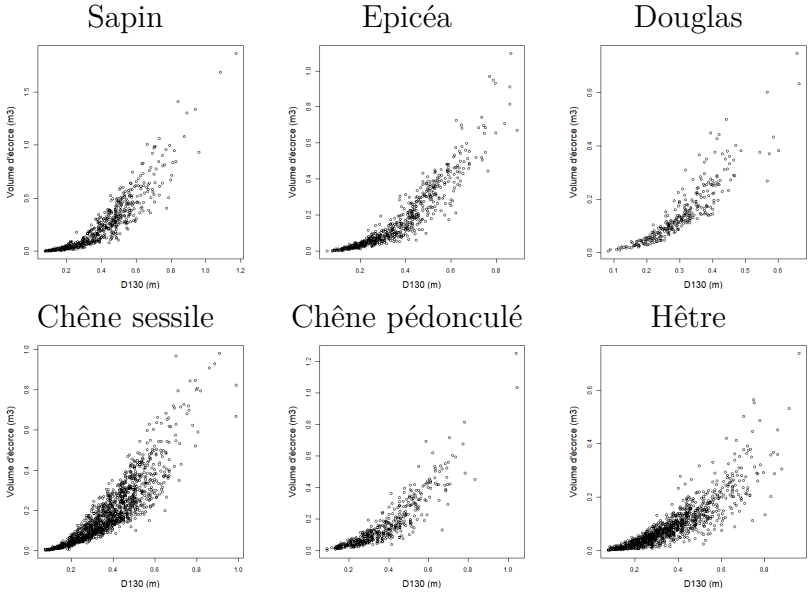


FIGURE 3.8 – Relation entre le volume d'écorce et le d130 pour le sapin, l'épicéa, le Douglas, les chênes sessile et pédonculé et le hêtre .

Transformation de variable

Une des méthodes que nous avons appliquée pour gérer l'hétéroscédasticité est l'utilisation de variables explicatives supplémentaires. Ici pour ajuster un modèle du volume d'écorce à

partir de la variable D2H, qui est homogène à un volume, nous avons testé une transformation de variable suivant l'Équation 3.1.

$$V_t = \frac{V_e}{D2H} \cdot 4\pi \tag{3.1}$$

avec V_t la variable transformée et V_e le volume d'écorce

Grâce à ce calcul, nous pouvons étudier la relation de la variable transformée avec D2H (Figure 3.9). Il s'agit d'une relation log/log qui, représentée en tant que telle, suggère d'appliquer une régression linéaire. Cependant, cette régression n'obtient qu'un faible R^2 (0.28) et de plus les résidus sont toujours considérés comme hétéroscédastiques par le test de Breush-Pagan. Cela montre très clairement que l'hétéroscédasticité est toujours présente. Nous n'avons donc pas retenu cette méthode.

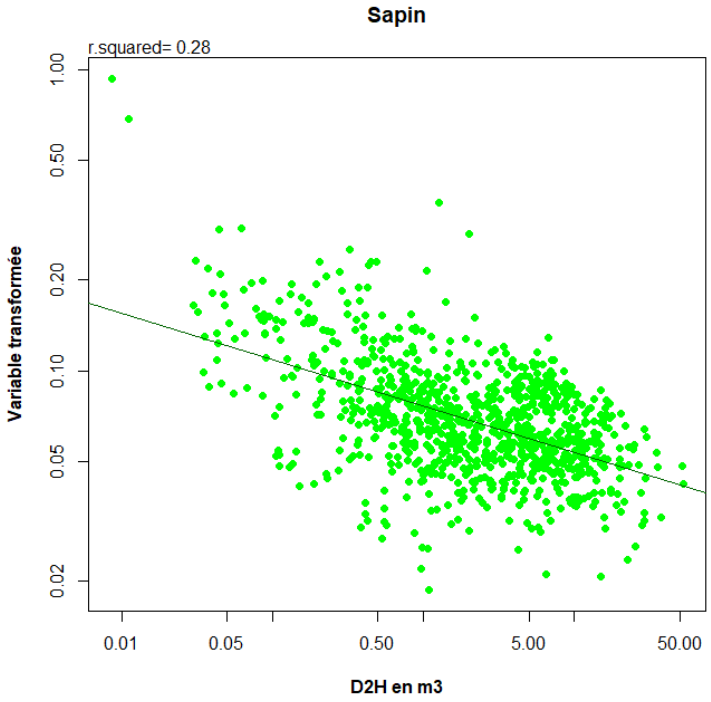


FIGURE 3.9 – Relation entre la variable transformée et D2H pour le sapin.

Structuration de la variance

Afin de corriger l'hétéroscédasticité nous allons utiliser la méthode des moindres carrés généralisés. Avec cete méthode, il est possible de proposer une fonction de la variance. Celle-ci est présentée par Équation 3.2 ; Cette méthode ajuste les paramètres à déterminer avec l'écart-type des valeurs.

$$Var(V_e) = \alpha^2 \cdot D2H^{2\theta} \tag{3.2}$$

avec Var la variance.

On notera juste que l'on peut remplacer la variable D2H par d'autres variables. La Figure 3.10 montre le résultat de cette modélisation avec l'utilisation de la fonction de variance. Nous pouvons y voir notamment que la variance des résidus standardisés, c'est à dire des résidus divisées par la variance de la variable à observer, semble moins évoluer avec la valeur de volume d'écorce prédite. Nous validons donc cette méthode pour la suite de nos travaux. Toutefois, nous vérifierons à chaque fois avec le test de Breush-Pagan que les résultats soient bien homoscédastiques.

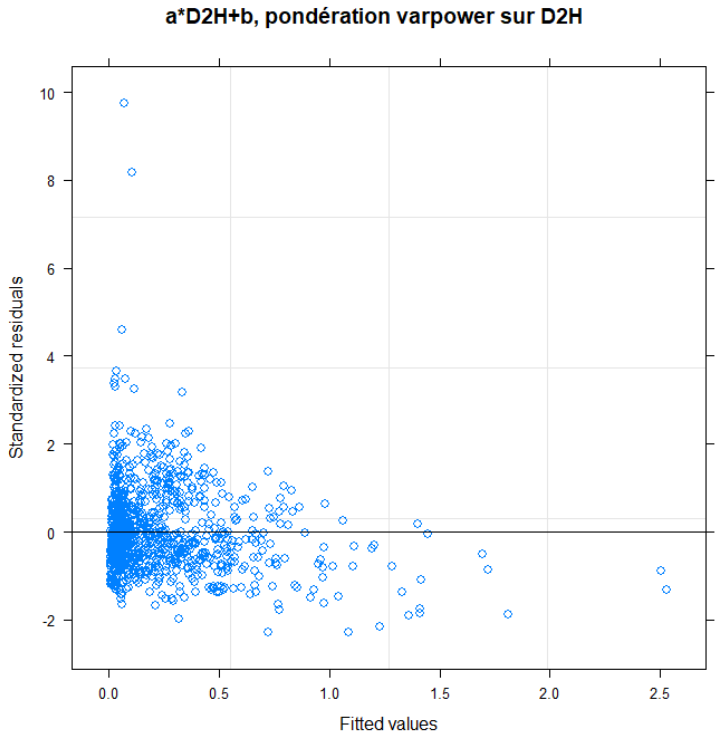


FIGURE 3.10 – Relation entre les résidus du modèle $V_e = a \cdot D2H + b$ et le volume d'écorce prédit pour le sapin.

3.5 La propagation des erreurs

Comme nous l'avons vu précédemment, la mesure à la jauge à écorce de l'épaisseur d'écorce engendre une erreur de mesure systématique (biais). Cette erreur impacte les modèles car, à cause de l'erreur systématique de la jauge à écorce, les variables modélisées ne

correspondent pas aux valeurs réelles. Le modèle a donc un biais systématique. Dans cette partie du travail, nous allons essayer d'estimer l'imprécision du modèle liée à la variance de l'épaisseur d'écorce, due à l'imprécision de la jauge à écorce.

Pour calculer cette propagation des erreurs nous nous sommes basés sur le travail effectué par Stängle et al. (2016). Celui-ci a permis de mesurer la variation de précision entre l'usage d'une jauge à écorce et du scanner à rayon X pour l'épicéa commun. Ainsi nous savons qu'une jauge à écorce surestime la valeur d'épaisseur d'écorce de 0.52 ± 1.59 mm. En utilisant cette valeur nous sommes donc capables de calculer deux valeurs, E_{epsup} et E_{epinf}, respectivement l'épaisseur d'écorce supérieure et l'épaisseur d'écorce inférieure. A partir des ces deux valeurs nous pouvons en déduire les valeurs supérieures et inférieures des variables à modéliser, le volume d'écorce et la surface d'écorce.

Afin de calculer la variance induite sur les paramètres, nous avons suivi une méthode basée sur l'approche de « Monte Carlo ». Cette approche a été construite à partir des travaux de Rocha and Nogueira (2012); Clarkson (2014) et Mahmoud and Hegazy (2017). Une fois les valeurs extrêmes des variables calculées nous avons procédé comme suit :

- Nous avons pris une valeur générée aléatoirement selon une loi gaussienne entre les deux valeurs extrêmes des variables à modéliser ;
- Nous avons ajusté le modèle selon ces valeurs aléatoires ;
- Nous avons répété les deux premières étapes mille fois. Cela nous donne mille valeurs pour chaque paramètre dont nous pouvons calculer la moyenne et l'erreur ;
- Nous avons utilisé la formule (Équation 3.3) de la propagation d'erreur (Ku, 1966) afin de calculer la propagation de l'erreur au sein de chacun des paramètres du modèle ;

$$E_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 s_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 s_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 s_z^2 + \cdots} \tag{3.3}$$

Avec f une fonction, qui correspond au modèle étudié.

3.6 La statisiques d'ajustement des modèles

Pour comparer nos modèles, nous avons calculé trois indicateurs différents, le coefficient de corélation (R^2), le Root Mean Square Error ($RMSE$) et l'Akaike Information Criterion (AIC).

3.6.1 Le coefficient de corrélation

Le R^2, appelé coefficient de corrélation, est une variable qui indique la proportion de la variance expliqué par le modèle. Elle est calculée par l'équation 3.4 (Miles, 2014).

$$R^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2 - \sum (y - \widehat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \tag{3.4}$$

avec y la valeur mesurée et $\widehat{y}$ la valeur prédite et $\bar{y}$ la moyenne des valeurs mesurées.

Le calcul de cet indicateur nécessite l'utilisation d'un modèle linéaire. Afin de pouvoir tout de même calculer R^2 pour les modèles non-linéaires que nous allons tester, nous avons suivi les recommandations de Piñeiro et al. (2008) et calculé le R^2 lors d'une régression linéaire entre les valeurs observées et les valeurs prédites.

Cependant, le R^2 d'un échantillon tendra à être plus élevé que celui de la population. En effet, l'ajout de variables explicatives au modèle augmente mécaniquement le R^2. Un nombre suffisant de variables donnera donc une valeur de $R^2 = 1$ pour l'échantillon étudié, ce qui ne sera pas le cas pour la population totale. En moyenne, cet indicateur surestimera donc la précision du modèle sur la population totale (Miles, 2014).

3.6.2 RMSE et RMSErel

Le RMSE pour *Root Mean Square Errror* soit en français, la racine de l'erreur quadratique moyenne et le RMSErel pour *relative Root Mean Square Error* soit la racine de l'erreur quadratique moyenne relative se calculent suivant les équations 3.5 et 3.6 respectivement.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y - \widehat{y})^2}{n}} \tag{3.5}$$

$$RMSErel = \frac{RMSE}{\bar{y}} \cdot 100 \tag{3.6}$$

Le RMSE donne donc une valeur absolue de l'erreur commise par le modèle, dans l'unité de la variable modélisée, tandis que le RMSErel donne cette valeur rapportée à la valeur moyenne des valeurs mesurées, en pourcentages.

Cet indicateur permet de mesurer la déviation entre les valeurs prédites et mesurées et donc une mesure combinée de la précision et de l'exactitude du modèle (Mayer and Butler, 1993).

3.6.3 AIC

L'AIC pour *Akaike Information Criterion* (Akaike, 1973) est un indicateur de la vraisemblance du modèle. La vraisemblance de la valeur d'un paramètre correspond à la propabilité d'observer la totalité des mesures si ce paramètre avait effectivement cette valeur (Fisher, 1922). L'AIC permet de comparer les différents modèles en considérant à la fois la qualité de leur ajustement et la complexité du modèle. En effet, les modèles présentant un grand nombre de variables seront pénalisés par cet indicateur.

3.7 Les modèles d'épaisseur d'écorce à 1m30

Dans les inventaires forestiers, $EE130$ n'est pas souvent mesurée. Or, comme nous le verrons plus tard, elle donne beaucoup d'informations concernant la quantité d'écorce de manière générale, que cela soit du volume ou de la surface. Afin que les modèles qui bénéficient de l'utilisation d'$EE130$ comme variable prédictive puissent aussi être utilisés par ceux qui n'ont pas cette mesure, nous avons cherché à mettre au point un modèle de prédiction d'$EE130$.

Nous avons testé plusieurs équations (Équations 3.7 à 3.10) afin de prédire $EE130$. La figure 3.11 montre, pour le sapin, la forme de ces différents modèles.

$$EE130 = a \cdot D130 \tag{3.7}$$

$$EE130 = a \cdot D130 + b \tag{3.8}$$

$$EE130 = a \cdot D130^b + c \tag{3.9}$$

$$EE130 = a \cdot D130^b \tag{3.10}$$

Sur chacune de ces équations nous avons ensuite essayé de remplacer les paramètres a, b et/ou c par une fonction de l'altitude typiquement suivant l'Équation 3.11.

$$paramètre = a \cdot alt + b \tag{3.11}$$

En effet l'altitude a été montré comme ayant une influence sur l'épaisseur d'écorce par Bouvet and Deleuze (2013). D'autres variables ont aussi été regardées, longitude, latitude et type de forêt (taillis, taillis sous futaie, futaie), sans résultats.

Nous avons remarqué que pour toutes les essences, l'équation 3.10 restait la meilleure. Aussi c'est elle que nous avons gardée dans nos analyses ultérieures.

3.8 Les modèles de volume d'écorce

La modélisation des volumes d'écorce est la première modélisation qui a été menée pendant ce travail de thèse. Nous avons donc tout d'abord recherché des relations simples entre les différentes données que nous avions à notre disposition. Nous nous sommes rapidement aperçus que la variable qui semblait la plus liée au E_v est D2H. Le premier modèle que nous avons proposé est donc celui suivant l'Équation 3.12.

$$E_v = a \cdot D2H + b \tag{3.12}$$

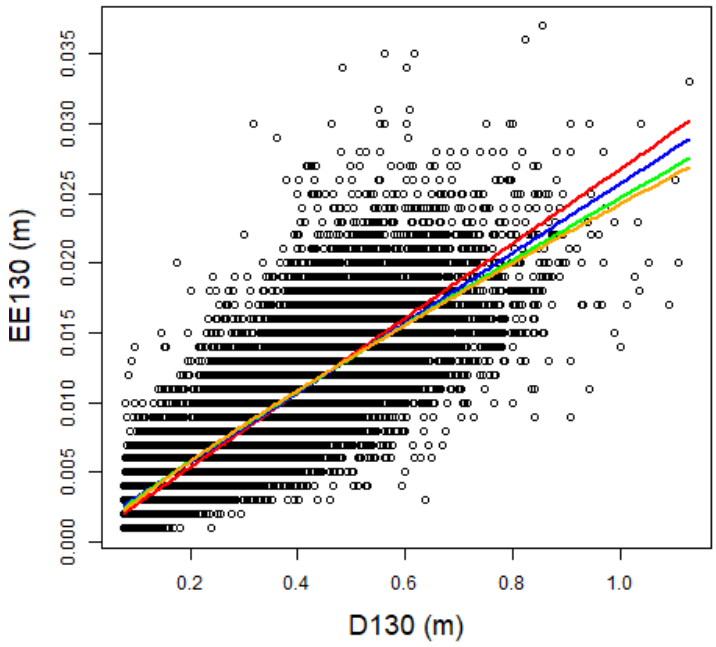


FIGURE 3.11 – Évolution de EE130 mesuré (noir) et prédit avec l'équation 3.7 (rouge), 3.8 (bleu), 3.9 (orange) et 3.10 (vert) pour le sapin.

Ce modèle, très simple, mais qui pourtant permet un bon ajustement, sera notre base de comparaison pour les modèles que nous allons élaborer par la suite. La figure 3.12 présente la forme du modèle pour le sapin.

En analysant les résidus du modèle suivant l'Équation 3.12, il devenait évident que ceux-ci étaient reliés à la variable $EE130$ mesurée. Nous avons donc proposé un modèle qui prenait en compte ces résidus, c'est celui suivant l'équation 3.13

$$E_v = a \cdot D2H + b \cdot EE130^2 + c \cdot EE130 + d \tag{3.13}$$

La figure 3.13 montre la forme du modèle pour le sapin.

Cependant, nous avons pu remarquer que la relation entre E_v et $D2H$ n'était pas totalement linéaire. Il était donc nécessaire de trouver une relation non-linéaire qui permettrait de mieux ajuster la relation entre E_v et le D2H. D'ailleurs, la variable explicative D2H est elle-même une variable construite à partir de deux autres variables. Il y avait donc possibilité de jouer sur les puissances associées aux deux variables et obtenir ainsi un modèle plus proche de la réalité.

L'Équation 3.14 a été construite dans le but de décrire plus précisément l'évolution de

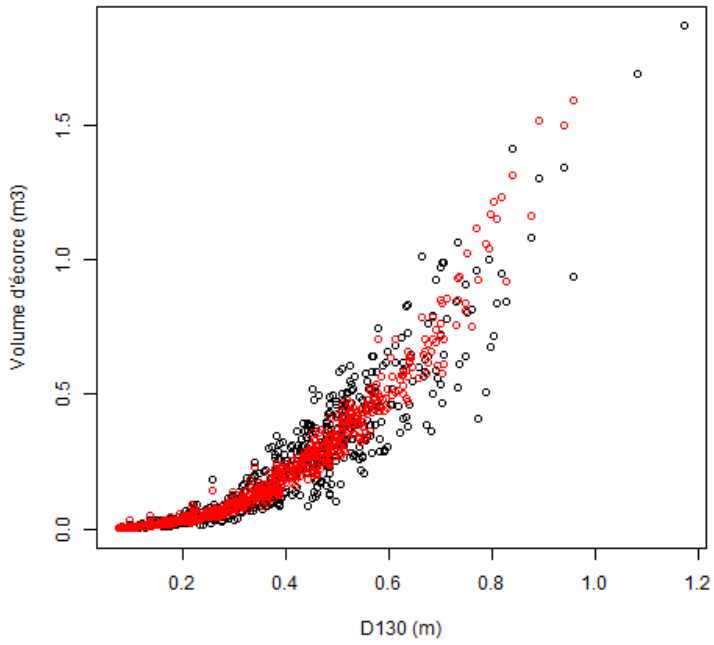


FIGURE 3.12 – Évolution du volume d'écorce mesuré (en noir) et prédit par l'Équation 3.12 (en rouge) avec D130 pour le sapin.

E_v avec D2H.

$$E_v = \frac{a \cdot D2H^b}{exp(i \cdot D2H + h)} + c \cdot D2H + d - \frac{e \cdot D2H + f}{exp(j \cdot D2H + g + 1)} \tag{3.14}$$

Afin de le faire converger, certaines variables ont été fixées (g=800, h=-0.5, i=2, j=-50). L'Équation 3.14 est divisée en trois parties. Nous reconnaissons l'Équation 3.12 au milieu. La première partie ($\frac{a \cdot D2H^b}{e^{i \cdot D2H+h}}$) est là pour représenter les grandes valeurs de D2H. Elle devient négligeable pour les petites valeurs de D2H car i>0 et h<0. D'un autre côté la troisième partie ($-\frac{e \cdot D2H+f}{e^{j \cdot D2H+g+1}}$) représente la variation pour les plus petites valeurs car, avec j<0 et g>0, elle devient négligeable pour les grandes valeurs de D2H.

La figure 3.14 montre la forme du modèle pour le Sapin.

L'Équation 3.15 a été construite autour de l'idée d'expliciter directement l'asymptote oblique vers laquelle semble tendre E_v pour les hautes valeurs de D2H.

$$E_v = a \cdot (1 - e^{-b \cdot d130}) + c \cdot d130 \tag{3.15}$$

La figure 3.15 montre la forme du modèle pour le Sapin.

Un autre modèle a été imaginé (Équation 3.17) à partir d'une considération géométrique. Nous avons modélisé l'arbre comme étant la superposition de deux cônes, l'un représentant la tige sous-écorce et l'autre la tige sur écorce, tel que représenté en figure 3.16.

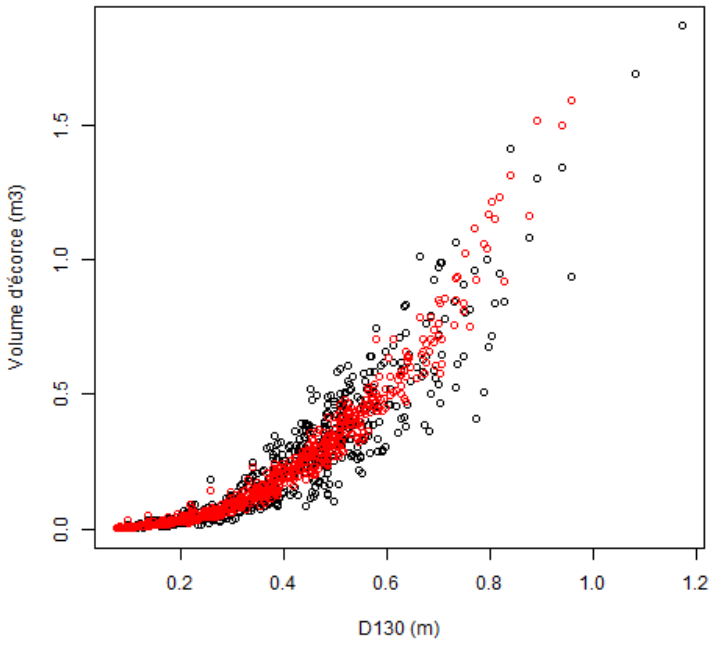


FIGURE 3.13 – Évolution du volume d'écorce mesuré (en noir) et prédit par l'Équation 3.13 (en rouge) avec D130 pour le sapin.

Ainsi donc par un simple calcul mathématique en utilisant le théorème de Thalès, nous avons obtenu l'Équation 3.16.

$$E_v = \frac{12 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{H_{tot}^3}{(H_{tot} - 1.3)^2} \cdot EE130 \cdot [d130 - EE130] \tag{3.16}$$

Puis, en supposant $H_{tot} >> 1.3$ et$d130 >> EE130$, ce qui se vérifie pour un arbre mature, nous avons obtenu l'Équation 3.17.

$$E_v = a \cdot EE130 \cdot D130 \cdot H_{tot} + b \tag{3.17}$$

Enfin, le modèle suivant l'Équation 3.18 a été proposé par Kozak (2004). Nous l'avons aussi étudié tel quel ou en fixant les paramètres b, c et d soit à 1 soit à 0 et en ajoutant une constante. Cela nous a permis de vérifier la pertinence de tous ces paramètres.

$$E_v = a \cdot EE130^b \cdot D130^c \cdot H_{tot}^d \tag{3.18}$$

Les modèles suivant les équations 3.17 et 3.18 sont apparus comme étant les deux meilleurs parmi tous ces modèles. C'est pour cela que ce sont les seuls qui ont été conservés par la suite et fournis dans l'article présenté au chapitre 4.

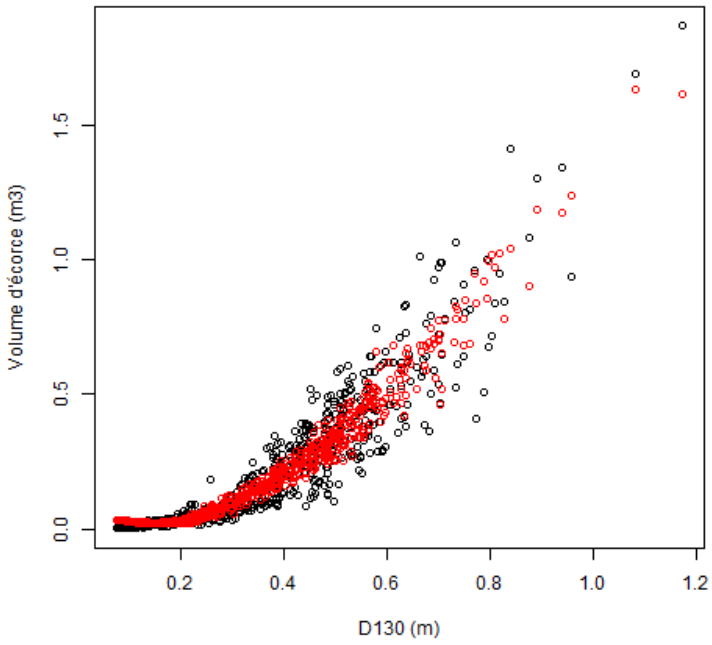


FIGURE 3.14 – Évolution du volume d'écorce mesuré (en noir) et prédit par l'Équation 3.14 (en rouge) avec D130 pour le sapin.

3.9 Les modèles de profil d'écorce

A la suite du travail effectué sur les modèles d'épaisseur à 1m30, nous nous sommes intéressés à la modélisation du profil longitudinal d'écorce. Il s'agit donc de modéliser la variation de la quantité d'écorce le long de la tige. L'objectif de ces modèles est de pouvoir calculer des volumes d'écorce jusqu'à différentes découpes. Or, l'utilisation de l'épaisseur d'écorce à elle seule ne permet pas de calculer un volume d'écorce dans un segment de tige. Celui-ci se calcule en effet suivant l'Équation 3.19 où intervient le diamètre sur écorce (D_{su}).

$$Volume = \int_{h_1}^{h_2} \pi/4 \cdot (D_{su}(h) - 2 \cdot E_{ep}(h))^2 dh \tag{3.19}$$

Il est donc nécessaire de connaître la variation de D_{su} avec la hauteur soit grâce à des mesures, soit grâce à un modèle de profil de tige. Comme D_{su} est rarement mesuré tout le long de la tige lors des inventaires forestiers, c'est la seconde option qui sera le plus souvent retenue. Il faut donc prendre en compte la précision du modèle de profil de tige en plus de celle du modèle d'E_{ep} afin de connaître la précision lors du calcul du volume. Cela n'est pas le cas si l'on prédit la surface d'écorce (E_s), puisque pour avoir le volume il faut utiliser

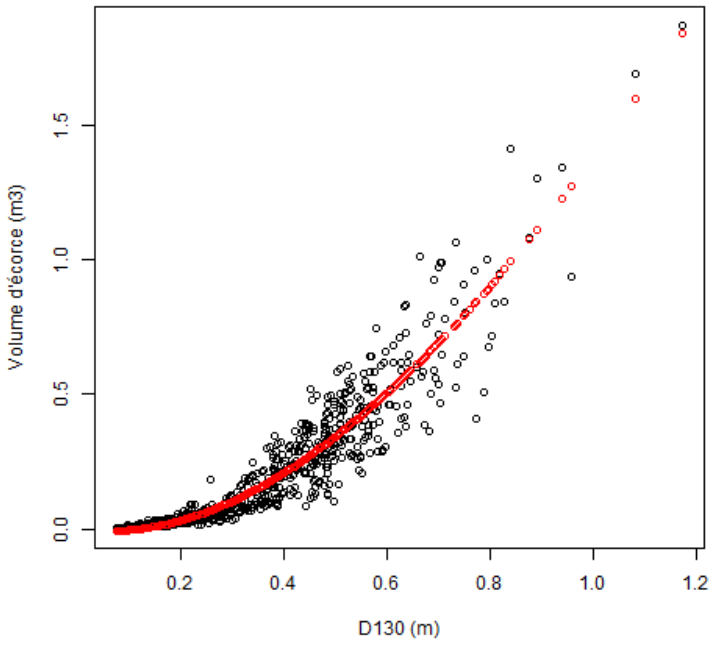


FIGURE 3.15 – Évolution du volume d'écorce mesuré (en noir) et prédit par l'Équation 3.15 (en rouge) avec D130 pour le sapin.

l'équation 3.20 qui est donc indépendante de D_{su} et ne nécessite donc pas l'utilisation d'un modèle de profil de tige.

$$Volume = \int_{h_1}^{h_2} E_s(h)dh \tag{3.20}$$

En plus de ces considérations sur la méthode de calcul du volume d'écorce à partir du profil d'écorce, d'autres arguments soutiennent ce choix de modélisation. Tout d'abord c'est une variable qui semble moins sujette à variation, une fois les variations dûes à la hauteur et au diamêtre de l'arbre éliminées, comme nous pouvons le voir entre la figure 3.17 a et b. Enfin, elle n'a, à notre connaissance, pas encore été modélisée.

Comme nous avions trouvé des modèles prédisant DBT en fonction de D_{su}, il semblait intéressant de tester si les mêmes modèles pouvaient fonctionner pour prédire E_s à partir de la surface de tige (T_s). Cela nous a donné les modèles suivant les équations 3.21 à 3.25.

$$E_s = a \cdot T_s^3 + b \cdot T_s^2 + c \cdot T_s + d \tag{3.21}$$

$$E_s = a \cdot T_s + b \tag{3.22}$$

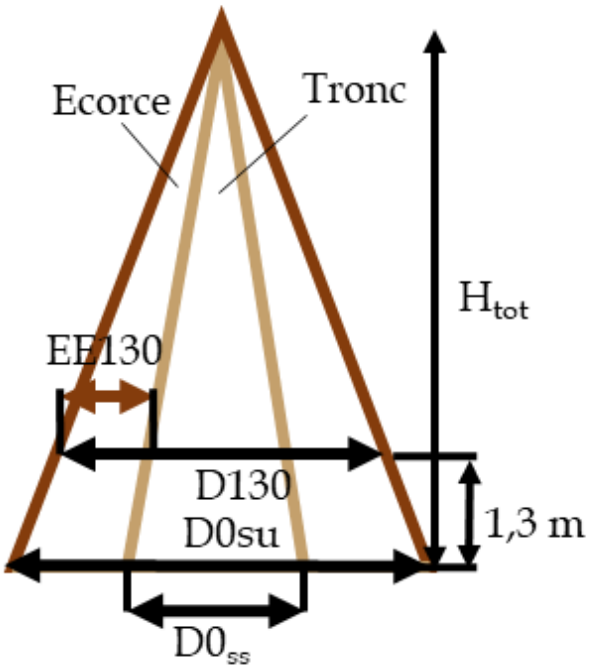


FIGURE 3.16 – Modélisation de la tige d'un arbre par la superposition de deux cônes.

$$E_s = a \cdot T_s + b \cdot D130 \tag{3.23}$$

$$E_s = T_s \cdot (b \cdot h/H_{tot} + c \cdot (h/H_{tot})^2 + d \cdot H_{tot}) \tag{3.24}$$

$$E_s = T_s - (a \cdot (1 - H_{rel})^2 - (a - 2) \cdot (1 - H_{rel}))^3 - b \cdot (1 - H_{rel}))^{90}) \cdot ((d130)^2) \tag{3.25}$$

En plus de ces modèles, nous avons essayé un modèle de surface d'écorce dérivé d'un modèle de volume d'écorce cumulatif. L'objectif ici était d'abord d'essayer de modéliser l'évolution du volume d'écorce avec la hauteur dans l'arbre. Une fois cette modélisation effectuée, il nous suffirait de dériver le modèle obtenu afin d'obtenir un modèle de surface d'écorce. Nous avons d'abord testé trois modèles de volume cumulé d'écorce suivant les Équations 3.26, 3.27 et 3.28.

$$V_e(h) = V_e \cdot (-exp(-b \cdot h) + 1) \tag{3.26}$$

a. b.

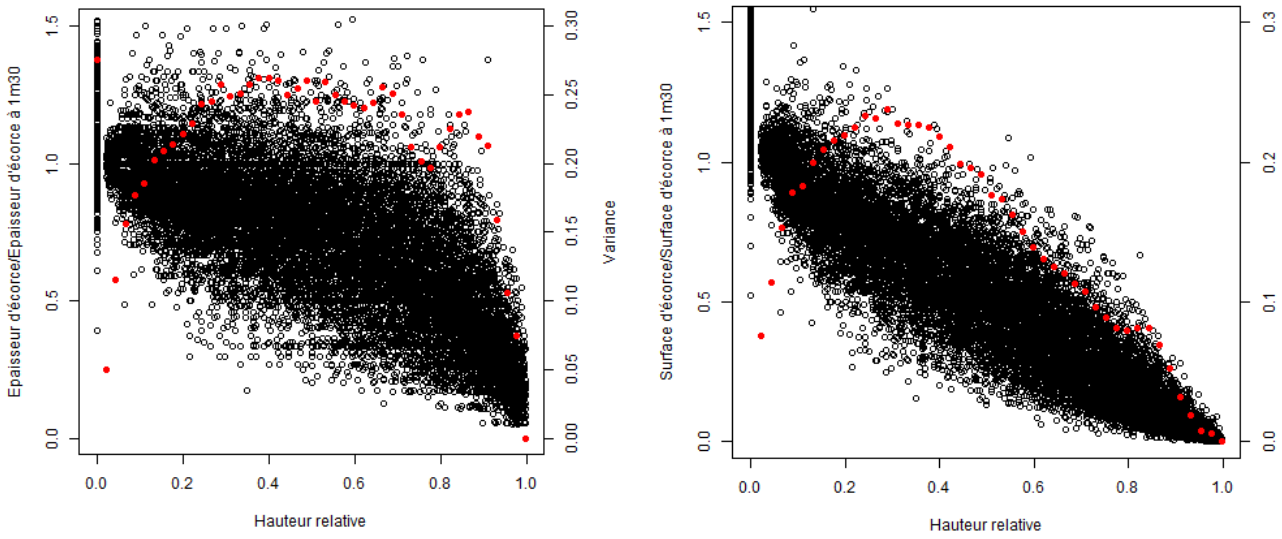


FIGURE 3.17 – Évolution du rapport $E_{ep}/EE130$ (a) et du rapport $E_s/SE130$ (b) en fonction de la hauteur relative pour le sapin (en noir, axe de gauche) et variation de l'écart-type avec la hauteur (en rouge, axe de droite.)

$$V_e(h) = a \cdot h + b \tag{3.27}$$

$$V_e(h) = V_e(1 - (1 - H_{rel})^2 \cdot a^{-2 \cdot H_{rel}}) \tag{3.28}$$

Le modèle suivant l'Équation 3.26 correspond à un modèle simple qui tend vers une limite finie en l'infini. Le modèle suivant l'Équation 3.27 est un simple modèle linéaire dépendant de la hauteur qui nous a servi de point de comparaison. Enfin le modèle suivant l'Équation 3.28 est un modèle qui a été formé à la suite de tâtonnements à partir de l'Équation 3.26. Finalement, de ces trois modèles, comme nous le verrons plus tard, c'est le modèle suivant l'Équation 3.28 qui est apparu le meilleur. Ainsi, c'est celui que nous avons dérivé afin d'obtenir le modèle suivant l'Équation 3.29

$$E_s(h) = (2 + b \cdot ln(|a|) \cdot (1 - H_{rel})) \cdot V_e \cdot (1 - H_{rel}) \cdot a^{-b \cdot H_{rel}} \tag{3.29}$$

avec ln le logarithme népérien.

Nous avons proposé un dernier modèle basé sur les travaux de Kozak (2004). Celui-ci propose divers modèles afin de prédire D_{ss} à partir de D_{su}. Ceux-ci ont la forme générale décrite par l'Équation 3.30.

$$D_{ss} = f(d130) \cdot X(h)^{g(X(h))} \tag{3.30}$$

avec f une fonction de $d130$, X une fonction de h et g une fonction de X.

Les différents travaux menés par Kozak (2004) concernaient la détermination des fonctions f, g et X afin d'approximer au mieux d_{ss} pour différentes espèces. Nous avons donc repris cette forme globale en remplaçant D_{ss} par E_{ec} et $d130$ par $SE130$. De plus nous avons posé $f = \alpha_1 \cdot SE130 + \alpha_2$, $g = \beta_1 + \beta_2 \cdot X^{\beta_3}$ et $X = \frac{1-(\frac{h}{H_{tot}})^{\gamma}}{1-(\frac{h_0}{H_{tot}})^{\gamma}}$. X est donc une forme alternative de la hauteur relative (H_{rel}). Elle varie de 0 pour $h = H_{tot}$ à 1 pour $h = h_0$. Nous avons obtenu ainsi l'Équation 3.31.

$$E_s = (\alpha_1 \cdot SE130 + \alpha_2) \cdot X^{\beta_1 + \beta_2 \cdot X^{\beta_3}} \tag{3.31}$$

Finalement le modèle suivant l'équation 3.31 s'est révélé le meilleur et c'est celui-ci qui est présenté dans l'article présenté au chapitre 5.

3.10 Les modèles de volume de nœuds

Comme nous l'avons vu plus haut, nous avons détouré tous les nœuds des arbres récoltés dans le cadre des projets Extra_For_Est et Modelfor. Le tableau 3.3 présente le nombre de nœuds et de verticilles qui ont été mesurés et utilisés pour calibrer les modèles de volume de nœuds.

Tableau 3.3 – Nombre de nœuds et de verticilles détourés pour le sapin et le Douglas.

Essence	**Nombre de verticille**	**Nombre nœuds**
sapin	44	178
douglas	41	212

Dans la littérature il n'existe que peu de modèles de volumes de nœuds à proprement parler. Dans le cadre de cette thèse, nous avons testé le modèle suivant l'équation 3.32. Il a été proposé par Pinto et al. (2003).

$$Volume = a \cdot h_{rel}^4 + b \cdot h_{rel}^3 + c \cdot h_{rel}^2 + d \cdot h_{rel} + e \tag{3.32}$$

Un autre modèle, correspondant plus à ce que nous souhaitions car prenant pour donnée d'entrée des données externes, est celui proposé par Moberg (2000). Il est présenté par l'équation 3.33.

$$DN_{max} = H_{test}\left[\alpha + \left(\beta(h_{21}\cdot LH)^2 - \gamma\cdot h_{21}\cdot LH - \alpha\right)\left(\frac{h-h_1}{(H_{tot}-h_{21}\cdot LH)-h_1}\right)^2\right] + (1-H_{test})\left[\gamma\cdot(h-H_{tot}) + \beta\cdot(h-H_{tot})^2\right] \tag{3.33}$$

avec

$$\alpha = (a\cdot\frac{H_{rel}}{b+H_{rel}}) \tag{3.34}$$

et

$$\beta = \frac{\frac{c\cdot(h_{21}\cdot LH)+\frac{a\cdot h_1}{b+h_1}}{(H_{tot}-h_{21}\cdot LH)-h_1} + \frac{\gamma}{2}}{h_{21}\cdot LH + \frac{(h_{21}\cdot LH)^2}{(H_{tot}-h_{21}\cdot LH)-h_1}} \tag{3.35}$$

et

$$\gamma = c_1\cdot Age + c_2\cdot D130 + c_3\cdot LH \tag{3.36}$$

et DN_{max} le diamètre de noœud maximum d'un verticille, LH la longueur du houppier, Age l'âge de l'arbre, h la hauteur du nœud dans l'arbre, H_{test} une variable binomiale qui vaut 1 si h<HBH (Hauteur de base du houppier) 0 sinon et a, b, c_1, c_2, c_3, h_1 et h_{21} les paramètres.

Ce modèle a aussi été testé en remplaçant la variable prédite DN_{max} par la somme des volume de nœud d'un verticille. Mais aucun des deux tests n'a donné de résultat intéressant. Seuls les résultats obtenus avec le modèle suivant l'équation 3.32 seront présenté dans la partie 6.

Chapitre 4

Premier article : les modèles de volume

4.1 Présentation de l'article

Les travaux effectués sur les modèles de volume d'écorce ont été publiés dans Annals of Forest Science (Bauer et al., 2021). Cet article présente la méthode utilisée afin de calculer le volume d'écorce des arbres à partir de mesures ponctuelles d'épaisseur d'écorce. Ces mesures réalisées avec une jauge à écorce à différentes hauteurs dans l'arbre, font partie de la base de données EMERGE.

Ce travail a été effectué sur les six essences de cette thèse, *Abies alba*, *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii*, *Quercus robur*, *Quercus patraea* et *Fagus sylvatica*. Il met ensuite en comparaison différents modèles de volume d'écorce issus de la littérature et un nouveau modèle mis au point pour cet article. La construction de ce modèle a mis en lumière l'importance de la variable $EE130$ dans la prédiction du volume d'écorce. Aussi commme celle-ci n'est que peu souvent mesurée dans les inventaires forestiers, des modèles de prédiction de $EE130$ ont aussi été mis au point à partir de la base de données IGN et comparés à des modèles issus de la littérature. Les modèles étudiés permettent de mettre en relation le volume d'écorce avec des variables arbres ($EE130$,H_{tot},$D130$,alt qui dans l'article sont nommées respectivement $BTBH$, H_{tot}, DBH, alt). De plus, les modèles ont été appliqués à la ressource afin d'estimer la quantité d'écorce puis d'extractibles disponibles sur les deux régions étudiées par le projet $ExtraFor_Est$, le Grand Est et la Bourgogne-Franche-Comté.

L'étude des modélisations de $EE130$ ont mis en évidence une influence de l'altitude sur $EE130$. Celui-ci augmente d'autant plus rapidement avec $D130$ que l'arbre se situe à une altitude importante. Une des raisons proposées pour expliquer cette influence serait la nécessité de protéger le cambium du gel étant donnée l'importance des températures froides en altitude. Une seconde raison proposée serait liée aux réserves en eau utile plus faible des montagnes françaises, demandant donc un stockage d'eau, en particulier dans l'écorce, plus important. Les modèles permettent de prédire avec une certaine précision (RMSErel de 22%) le volume d'écorce des arbres. Cependant cette précision est considérablement réduite

si $EE130$ est modélisé et non pas mesuré (RMSErel de 40%). Parmi les différentes essences, c'est le Douglas dont le volume d'écorce peut le plus facilement être prédit (RMSErel de 16%) tandis que le chêne pédonculé est l'essence pour laquelle le modèle s'ajuste le moins bien (RMSErel 27%).

Modelling bark volume for six main tree species in France : Assessment of models and application at regional scale.

4.2 Abstract

Key message **A set of models of bark thickness at breast height and bark volume are now available for six species in France. A small but significant altitude effect on bark thickness at breast height was detected. An application was made to North-Eastern France.**

Context The growing demand for wood energy and bio-molecules requires a thoroughly evaluation of forest biomass, particularly bark.

Aims The objective of this study is to have statistical models of bark volumes for the six main forest species present in Eastern France and to be able to estimate regional bark biomasses and quantities of chemical extractives at regional scale.

Methods A large databank gathering bark thickness measured at different heights in France was used for selecting literature or new alternative models of tree bark volume. These models were applied on the available forest inventory data to estimate the regional bark volume. Secondly, by multiplying these volumes by basic density data and extractive content recently obtained, bark biomasses and extractives quantities were deduced.

Results They consist in a set of species-specific models of bark thickness at breast height (accuracy of around 30%), of tree bark volumes (accuracy of around 22%), estimates of regional bark volumes, biomasses and extratives quantities and propagation of measurement error. A significant relation between bark thickness at breast height and altitude is also quantified.

Conclusion These results constitute an important contribution for a better knowledge of the bark resource at a regional scale and may help to optimise bark valuation by the forest-wood sector.

Keywords : bark thickness ; bark gauge ; altitude ; bark biomass ; softwood ; hardwood

4.3 Introduction

The bark is a multifunctional structure absolutely necessary for the tree life (Rosell, 2019). It protects living tissues, i.e., sapwood, phloem, dormant buds (Charles-Dominique et al., 2015), from high temperatures (Pausas, 2015; Rosell, 2016) or very low ones (De Antonio et al., 2020), superficial injuries due to rock falls, harvesting, herbivores and insects (Theander, 1985; Harun and Labosky, 1985), or pathogenic micro-organisms (Franceschi et al., 2005). The bark also has lesser known functions as storage of water (Levia and Herwitz, 2005) or mineral reserves (Schowalter and Morrell, 2002), and is involved in tree biomechanics (Clair et al., 2019). Consequently, bark, through its multiple functions, participates in

the fitness of trees onto different ecosystems (Rosell et al., 2014).

To fulfill these different functions, bark is composed of different tissues and cells that can be described by different variables : its thickness at different heights (Gordon, 1983b), its total tree volume (Wehenkel et al., 2012; Rosell et al., 2017), its proportion in the volume of the stem (Cellini et al., 2012), its density (Miles and Smith, 2009), its structure particularly different in young or old bark (Dedrie et al., 2015), its structure in phloem zones included in phelloderma layers as in Douglas fir (Patel, 1975), its yields and quantities of different chemical compounds (Jyske et al., 2014; Trivelato et al., 2016; Feng et al., 2013; Brennan et al., 2020a), especially carbon (Jones and O'Hara, 2018; Castaño-Santamaría and Bravo, 2012) and minerals (Buamscha et al., 2007). All these variables not only participate in relating structures and functions in living trees but are also critical in determining the different valuations of the harvested timber.

The bark is thus a rich and very accessible raw material and man has exploited it for a very long time (Pasztory et al., 2016; Harkin and Rowe, 1971) to produce for instance medicines (Turner and Hebda, 1990; Anderson, 1955; Rastogi et al., 2015), perfume (e.g. cinnamon), latex corks (Thomas et al., 1995) or insulating material (Gil, 2014). In the current economy of the forest-wood sectors, bark is a by-product of the primary wood processing industries which contributes in fact not much to their total turnover that may reach 15% for all by-products pooled together (Chalayer, 2015). The bark is valued essentially as horticultural substrate or as fuel (Lu et al., 2006). Not all softwood bark is suitable for use as horticultural substrate and compared to wood, bark is a second choice fuel due to its high humidity and high mineral composition (Adler, 2007) despite its high extractive content which improves its calorific power (Telmo and Lousada, 2011; Tenorio and Moya, 2013; Fuwape, 1989). Only boilers specifically designed to burn biomass with a high moisture content, impurities (soil, gravel, etc.), and mineral matter (and therefore ash) can burn it efficiently (Martin, 2015).

It turns out that society is increasingly demanding biomolecules that are considered less harmful to health than petro-sourced products and a production more environmentally friendly. Industries want to take advantage of this trend. They need consequently to answer questions about the volume of the different markets, the availability of raw materials rich in these biomolecules and the industrial processing of the raw material.

To estimate the available raw material, it is possible to make advantage of data and information already available. Bouvet and Deleuze (2013) have made available percentage bark values to calculate stem bark volumes from the stem volume There are also data on basic density to convert fresh wood volumes into dry biomasses (Billard et al., 2020). Moreover, the rate of extractable chemical compounds (Brennan et al., 2020a) expressed in gram of extractives / gram of dry matter can be used to obtain the mass of extractives.

Depending on the intended purpose, bark quantity has been estimated either from bark thickness (Stängle et al., 2017; Muhairwe, 2000; Laasasenaho et al., 2005), bark area (or proportion in bark area) or from whole stem bark biomass (e.g., Zianis et al., 2005). There are numerous studies that design bark thickness models (Gordon, 1983b; Muhairwe, 2000; Hannrup, 2004; Van Laar, 2007). However, few studies have provided models to directly predict the volume of bark from tree variables such as diameter at breast height, tree height,

and bark thickness at breast height when it is available (e.g., Kozak and Yang, 1981). Often cited, Meyer (1946) computed the bark volume of a tree on the basis of a proportionality constant between over-bark and under-bark stem diameters generally measured at breast height. More recently, Wehenkel et al. (2012) and Liepiņš et al. (2015) have modeled the proportion of bark volume.

Modelling bark volume (B_v) and bark thickness at breast height ($BTBH$) for France is the central objective of this article. On the one hand, when models exist but are not adapted to the French resource they must be readjusted as advised by Jenkins et al. (2003) and Stängle et al. (2017). On the other hand, if the models do not exist, new ones must be developed. In addition, models of $BTBH$ will also be designed since $BTBH$ can be used as an input variable in bark volume models, yet they are not always measured in the field. Numerous bark data have been collected by French research and R&D organisations : INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement), FCBA (institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction, Ameublement), ONF (Office National des Forêts), IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière). This database is managed by the FCBA (Bouvet and Deleuze, 2013).

As a secondary objective, we apply the best models found on forest inventory data to provide an initial estimate of the resources available for the chemical industry. The ressources must be delivered in terms of volume, bark biomass, and quantities of extractives. We decided to provide this estimate at the scale of two French regions : Grand-Est and Bourgogne Franche-Comté. For the sake of clarity, we will consider only the total content of extractives and not the content of specific chemical families.

This study concerns six temperate tree species that are particularly present and industrially processed in Eastern France : silver fir (*Abies alba*), Norway spruce (*Picea abies*), Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*), European beech (*Fagus sylvatica*), sessile oak (*Quercus petraea*), and pedunculate oak (*Quercus robur*).

4.4 Materials and Methods

$BTBH$ models were developed from the data recorded during several campaigns of the IGN. Since 2008, these measurements are no longer carried out as the database has been considered complete. B_v models were developed from a "research" dataset called EMERGE. Both datasets are described in details in Section 4.4.1.

Table 4.1 summarises the abbreviations used in this paper.

Table 4.1 – List of abbreviations.

Abbreviation	Meaning	Unit
A_{ob}, A_{ub}	Stem area over and under bark	m^2
AIC	Akaike Information Criterion	
alt	Altitude	m (above see level)
B_p	Bark proportion on stem over bark volume	%
Bp-test	Result of a Breusch-Pagan test	
B_t	Bark thickness at a given height	m
B_v	Total bark volume	m^3
$BTBH$	Bark thickness at breast height (height of 1.30 m)	m
D_{ob}, D_{ub}	Stem diameter over and under bark	m
$D0_{ob}$, $D0_{ub}$	Stem diameter at ground level over and under bark	m
DBH	Stem diameter at breast height (over bark)	m
H_{tot}	Total tree height	m
PME	Propagation of measurement error	
$RMSErel$	Relative root mean square error	%
V_{ob}, V_{ub}	Stem volume over and under bark	m^3

4.4.1 Datasets

In this work, three different databases were used namely EMERGE, IGN, and French NFI.

EMERGE dataset

EMERGE was a project led by the French National Forest Office (ONF) and supported by the French National Research Agency (ANR) (Deleuze et al., 2013). Its purpose was to estimate the available biomass in French forests. Eight French research and R&D organisations worked together on this project. The EMERGE dataset combined several subsets of data collected by the various partners. This dataset contained bark thickness (B_t) measurements performed in several French regions (Fig. 4.1), statistically representative of the French resource. The measurements were made using a Swedish bark gauge at several heights along the stem but often not at breast height. In the latter case, a linear interpolation between the two closest values of 1.3m allowed for an estimation at the same height.

Usual tree variables (total tree height, H_{tot} and diameter at breast height, DBH) were measured and additional information about the corresponding plots such as geographic coordinates and altitude were recorded. Re-partition in term of DBH are given in Annexe 1. The composition of EMERGE database is given in Table 4.2

IGN dataset

The second dataset, called IGN is a "resource" dataset. $BTBH$ was measured on a large number of trees everywhere in France. This dataset includes only one measurement at breast

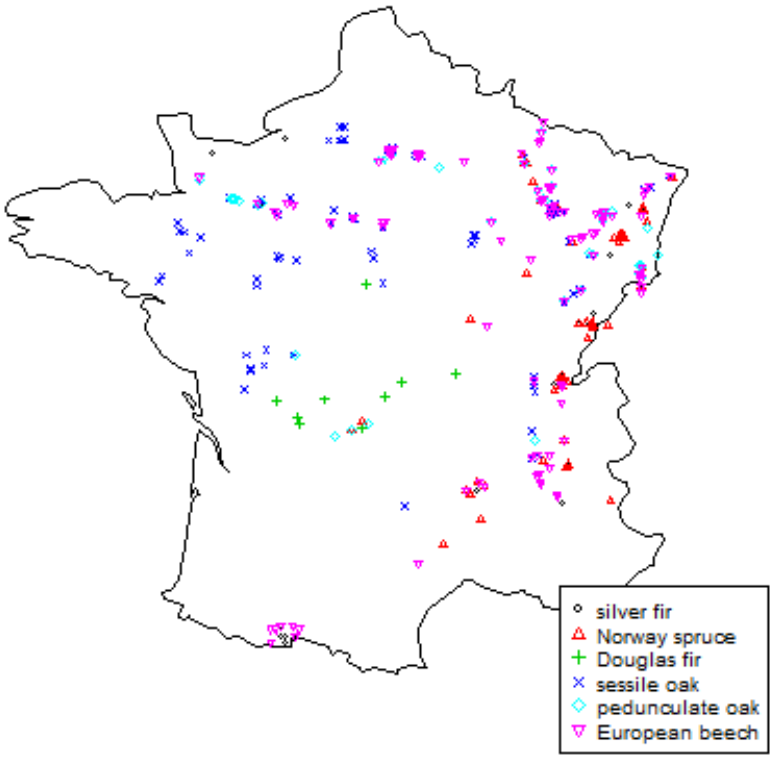


FIGURE 4.1 – Location of the sites where the EMERGE data were recorded.

height made with a Swedish bark gauge as well as DBH, H_{tot} and location of the trees (latitude, longitude and altitude). Table 4.3 shows the composition of the IGN dataset.

French NFI data in Grand Est and Bourgogne-Franche-Comté

The National Forest Inventory (NFI) is a continuous statistical survey of French metropolitan forests, undertaken by the IGN. The NFI is carried out in public and private forests, regardless of whether they are available for wood supply. The NFI design features a systematic sampling grid with squared cells of 1 km side (Colin et al., 2017; Hervé, 2016). Each year, 10 % of the cells are sampled according to two phases. In the first phase, approximately 80 000 photo plots are interpreted to assess land cover and land use. In the second phase, approximately 7 000 temporary ground plots are established at a sub-sample of first phase photo plot locations that have forest land use. On each plot, every tree with a DBH of at

Table 4.2 – Composition of EMERGE dataset.

Species	Number of measures	Number of trees
silver fir	15 222	658
Norway spruce	16 541	692
Douglas fir	4 618	313
sessile oak	30 193	1 445
pedunculate oak	9 628	481
European beech	26 946	1 246

Table 4.3 – Composition of IGN dataset.

Species	Number of measures	Number of trees
silver fir	25 258	25 258
Norway spruce	41 950	41 950
Douglas fir	17 537	17 537
sessile oak	46 540	46 540
pedunculate oak	41 291	41 291
European beech	42 740	42 740

least 7.5 cm is measured. Measurements include DBH and H_{tot}. Typically, five annual NFI samples are combined to calculate statistics for the forest resource. Moreover, since 2010, the French NFI provides direct measurements of logging based on a re-inventory of temporary plots placed in the inventory 5 years earlier. For example, in 2014, the NFI returned data on plots for the inventory in 2009, which can serve as an objective for giving an estimate of the mean annual harvest between 2009 and 2014.

French NFI visits approximately 1 650 new inventory plots each year in the Grand Est and Bourgogne-Franche-Comté regions (870 plots and 780 plots, respectively). In this paper, we used the observations performed on cut trees during the 2014-2018 periods to infer the amount of bark volumes harvested each year in the two regions between 2009 and 2018. For that, the best $BTBH$ models developed for each species were applied on all felling trees recorded by the NFI to estimate $BTBH$ from tree DBH and altitude whenever significant. Then, the best B_v models were applied to estimate stem bark volume of felling trees based

on estimated $BTBH$, tree DBH and tree H_{tot}. Finally, the five annual NFI samples (2014-2018) were combined to estimate the volume of bark harvested each year, between 2009 and 2018, from the forest resource in the two regions.

4.4.2 Calculating the bark volume

First, all B_t measurements from the EMERGE dataset were used to compute over- and under- bark cross-sectional areas at different heights. Over- and under-bark stem area, respectively A_{ob} and A_{ub} at a given height were calculated with Equations 4.1 and 4.2.

$$A_{ob} = \frac{D_{ob}^2}{4} \cdot \pi \tag{4.1}$$

$$A_{ub} = \frac{(D_{ob} - 2B_t)^2}{4} \cdot \pi \tag{4.2}$$

where D_{ob} is the over-bark stem diameter and B_t the bark thickness.

To calculate the bark volume of each tree, over- or under- trunk portions were considered as a stack of truncated cones with a volume given by Equation 4.3 with the tree top portion considered as a cone (thus with A2 = 0) and the stump portion calculated by extrapolation from the areas calculated from the two lowest measures :

$$V_{truncated\ cone} = \frac{H_c}{3} \cdot (A_1 + \sqrt{A_1 \cdot A_2} + A_2) \tag{4.3}$$

where H_c is the truncated cone height and A_1 and A_2 the area of, respectively, its lower section and upper sections.

The sum of over- and under- bark volumes of all truncated cones gives the total over- and under- bark stem volumes for the tree (Fig. 4.2 a.). And as a consequence, their difference gives the bark volume.

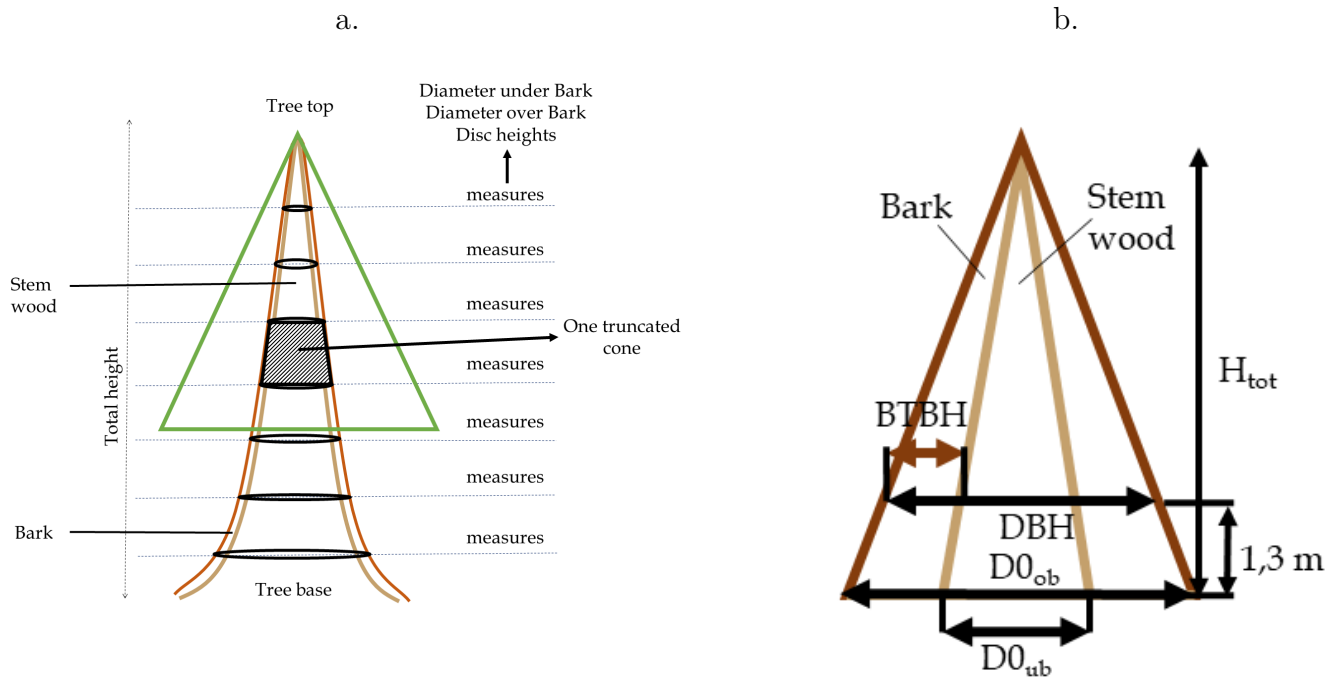


FIGURE 4.2 – a. : Sequence of truncated cones modelling a stem. b. : Simplified geometric calculation of bark volume. $BTBH$: Bark thickness at breast height ; DBH : Diameter at breast height ; $D0_{ob}$ and $D0_{ub}$: Diameters at ground level over and under bark ; H_{tot} : total tree height.

4.4.3 $BTBH$ modelling

We first adjusted literature models on the FCBA database and then design alternative models. Finally, we selected the most relevant models based on the lowest Akaike Information Criterion (AIC) and relative root mean square error ($RMSErel$).

$BTBH$ models from the literature

We selected three models from : Wilhelmsson et al. (2002) for *Picea abies* and *Pinus sylvestris* (Equation 4.4) ; Cao and Pepper (1986) for North-America species (*Pinus echinata*, *Pinus taeda* and *Pinus palustris*) (Equation 4.5) and Gordon (1983b) for *Pinus radiata* in New-Zealand (Equation 4.6).

$$BTBH = exp(a + b \cdot DBH + c \cdot ln(DBH)) \tag{4.4}$$

$$BTBH = DBH(a + b \cdot \frac{1.3}{H_{tot}} + c \cdot (\frac{1.3}{H_{tot}})^2 + d \cdot H_{tot}) \tag{4.5}$$

$$BTBH = a + b \cdot DBH + c \cdot DBH^2 + d \cdot DBH^3 \tag{4.6}$$

Alternative $BTBH$ models

After carefully analysing several equations we selected Equation 4.7 as a base for our modelling, reflecting the strong relationship with DBH.

$$BTBH = a \cdot DBH^b \tag{4.7}$$

The addition of an intercept to Equation 4.7 was studied but we preferred to remove it, even if this parameter was significant, because we considered that a tree with $DBH = 0$ should logically have $BTBH = 0$.

For assessing whether a relation between altitude and $BTBH$ could be introduced, quantitative altitude values were transformed into ten increasing altitude classes and their mean was assigned to each tree belonging to their corresponding class. To make sure the classes were approximatively of comparable size, we merged classes representing less than 5% of our data with their closest class. The parameters a and b in Equation 4.7 were then adjusted according to altitude class. We thus obtained around ten values of a and b, for each species, that were analysed in relation with the mean altitude of trees from each class. Sometimes and only on a, we observed a significant altitude effect. In this case Equation 4.7 becomes Equation 4.8.

$$BTBH = (c \cdot alt + d) \cdot DBH^b \tag{4.8}$$

with alt as the altitude

4.4.4 Bark volume models

Bark volume models from the literature

Meyer (1946) proposed a method to calculate B_v using the a coefficient according to Equation 4.9.

$$a = \frac{\sum DBH - 2 * \sum BTBH}{\sum DBH} \tag{4.9}$$

where the sum is calculated on data from a pool of trees of the same species.

Bark volume for one tree may therefore be computed using equation 4.10.

$$B_v = V_{ob} \cdot (1 - a^2) \tag{4.10}$$

We determined the a coefficient from the IGN dataset for each species. We then calculated the bark volume of the trees from the EMERGE dataset using the a coefficient for this species and Equation 4.10. This method was developed by Meyer (1946) for Cinchona but he also proposed an application for other species such as hemlock, white pine, white oak, or red maple.

Kozak and Yang (1981) proposed a model of bark volume following Equation 4.11. This model was applied on 32 species including both hardwood species and softwood species.

$$B_v = a \cdot DBH^c \cdot BTBH^d \cdot H_{tot}^e \tag{4.11}$$

Alternative model of bark volume

We built a new model of B_v by considering the difference between two cones V_{ob} and V_{ub} which are the over-bark and under-bark stem volumes assuming the trunk is cone-shaped (Equation 4.12 and Fig. 4.2 b.).

$$B_v = V_{ob} - V_{ub} = \frac{\pi}{12} \cdot H_{tot} \cdot (D0_{ob}^2 - D0_{ub}^2) \tag{4.12}$$

where $D0_{ob}$ and $D0_{ub}$ are the over bark and under bark diameters at the ground level.

$D0_{ob}$ and $D0_{ub}$ can be calculated from DBH and $BTBH$ with Equations 4.13 and 4.14, respectively, on the basis of the Thales' theorem.

$$D0_{ob} = DBH \cdot \frac{H_{tot}}{H_{tot} - 1.3} \tag{4.13}$$

$$D0_{ub} = (DBH - 2BTBH) \cdot \frac{H_{tot}}{H_{tot} - 1.3} \tag{4.14}$$

We obtained the theoretical Equation 4.15.

$$B_v = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{H_{tot}^3}{(H_{tot} - 1.3)^2} \cdot BTBH \cdot [DBH - BTBH] \tag{4.15}$$

For mature trees, by assuming that $H_{tot} \gg 1.3$ m and $DBH \gg BTBH$, Equation 4.15 can be simplified to give Equation 4.16.

$$B_v = \frac{\pi}{3} \cdot H_{tot} \cdot BTBH \cdot DBH \tag{4.16}$$

Models following Equations 4.17 and 4.18 were designed from Equations 4.15 and 4.16, respectively.

Nevertheless, Equations 4.15 and 4.16 are only exact for a perfectly cone shaped stem, both over bark and under bark. To account for the geometric difference with a real stem the two models following Equations 4.17 and 4.18, in which parameters a and b can be adjusted statistically, were designed.

$$B_v = a \cdot \frac{H_{tot}^3}{(H_{tot} - 1.3)^2} \cdot BTBH \cdot [DBH - BTBH] + b \tag{4.17}$$

$$B_v = a \cdot H_{tot} \cdot BTBH \cdot DBH + b \tag{4.18}$$

Finally, we obtained the model following Equation 4.19 by replacing $BTBH$ by its prediction $\widehat{BTBH}$.

$$B_v = a \cdot H_{tot} \cdot \widehat{BTBH} \cdot DBH + b \tag{4.19}$$

$\widehat{BTBH}$ is the predicted value obtained with the best $BTBH$ models depending on the species.

4.4.5 Statistical methods

Modelling

All the regressions were carried out using the R software (R Core Team, 2018). Two methods have been applied, depending on the modelled variable.

For $BTBH$, the R function `nls` was used to fit the model. A total of 13 outliers were removed from the datapool, (0 observation for silver fir and for Norway spruce, 7 for Douglas fir, 2 for European beech, 2 for sessile oak, and 2 for pedunculate oak). These observations were removed based on graphical analysis.

For B_v, bark volume measurements showed strong heteroscedasticity with variance increasing with tree size. For handling heteroscedasticity in the non linear regression analyses, we used the `gnls` function, provided by the `nlme` package (Pinheiro et al., 2019) with a variance structure described by the function `varPower` (Equation 4.20) :

$$Var(\epsilon) = \sigma^2 \cdot (DBH^2 \cdot H_{tot})^{2\theta} \tag{4.20}$$

The Breusch-Pagan test (BP-test) was used to verify the efficiency of this formulation by analysing the heteroscedasticity of the model residuals.

The model has been considered without heteroscedasticity if the obtained p-value is above 0.1.

In order to assess if species-specific models were required especially for distinguishing the two oak species, the R function `nlsList` provided by the `nlme` package (Pinheiro et al., 2019) was used.

This function partitions the data according to the levels of a grouping factor, in our case, the species, and gives specific fits for each data partition, using same models for different factors.

Cross-validation

All models, either from the literature or alternative ones, were validated through a cross-validation method as follows : The data were separated according to their plot of origin. Then these parts were merged randomly to form ten groups of approximatively the same size. Each group was used as validation set, the remaining observations being used as training set. A fitted value was thus obtained from a validation set for each measure made. These two datasets were used to calculate $RMSE$ and relative $RMSE$ ($RMSErel$) in %, as recommended by Mayer and Butler (1993), using Equation 4.21 and 4.22, respectively.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y - \widehat{y})^2}{n}} \tag{4.21}$$

$$RMSErel = \frac{RMSE}{\bar{y}} \cdot 100 \tag{4.22}$$

where y is the measured value, $\widehat{y}$ the fitted value, $\bar{y}$ the mean of observed values and n the number of observations.

The R^2 value of the model was obtained by fitting a linear regression between observed and fitted value, as recommended by Piñeiro et al. (2008). This R^2 was taken to characterize the quality of this modelling.

Then our data were split again, calibration and validation performed twice more. Three values of the indicators $RMSE$, $RMSErel$, and R^2 were thus obtained. Finally, these three values were used to calculate their mean value, which are presented in part 4.5. However, the parameter values are issued from the model adjustment made on all datasets.

We also calculated the AIC (Akaike, 1973) for each model. We used for this a model adjusted on all data, without cross-validation.

4.4.6 Propagation of measurement error (PME) for Norway spruce

According to the analysis done by Stängle et al. (2016), measuring B_t using a Swedish bark gauge is subject to an error. This measurement error was identified for Norway spruce species in the same analysis as an overestimation of the B_t by 13.6%±28.4% (mean ± standard deviation) relative to its true value. The relevance of this systematic error calls for considering it within the fitted model. To this end, we use a "toy" Monte Carlo method based approach. Its design is based on the rationale found in different references (Rocha and Nogueira, 2012; Clarkson, 2014; Mahmoud and Hegazy, 2017). The method can be summarized in four steps.

The first step is to define a bound for each measurement we have of the B_t, based on the identified measurement error. The second step is to take random values of errors (according to a Gaussian generation) at each measurement we have of B_t within the defined bounds. The third step is to fit the model according to these random values. Then, we repeat for a sufficient number of times (> 1000), where at each simulation we get different values for the regression parameters, and eventually determine their mean and standard error. Finally, the fourth step is to use the formula (Equation 4.23) of error propagation Ku (1966) to calculate the propagation from each regression parameter onto the model.

$$E_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 s_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 s_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 s_z^2 + \cdots} \tag{4.23}$$

where f is a function, which in our case, is the model we are interested in.

4.4.7 Consistency of our model predictions with proportions of bark on over-bark trunk volume

In order to check the relevance of our modelling results, we translated results from the IGN dataset into bark proportions (B_p, calculated with Equation 4.24) using bark volume estimated by our selected models and over-bark stem volume estimated following Tran-Ha et al. (2007) (Equation 4.25). We translated the results from Emerge dataset into B_p using either the bark volume and over-bark trunk volume calculated according to the procedure

found in paragraph 4.4.2 and Figure 4.2 (Method 1), or the bark volume estimated by our selected models with $BTBH$ measured and over-bark stem volume calculated as previously (Method 2). We then compared the results obtained according to these procedures with the results published in FCBA (2019) and adapted them to our dataset (Emerge or IGN) according to the repartition of tree's DBH and obtained by Meyer (1946) where, according to Equation 10, B_p corresponds to $(1 - a^2)$. To calculate the B_p, FCBA (2019) used the Emerge dataset to build a relation between ratio between bark thickness and log radius at 1.3 m and B_p on the tree, then applied it to the IGN dataset.

$$B_p = \frac{B_v}{V_{ob}} \tag{4.24}$$

$$V_{ob} = a \cdot DBH + b \cdot \pi \left(\frac{DBH}{2}\right)^2 \cdot H_{tot} \tag{4.25}$$

The a and b coefficients were estimated by Tran-Ha et al. (2007) for several species including our six targeted species.

For all these comparisons, we used Equation 4.26 in order to calculate a mean B_p of all our trees.

$$B_p = \frac{\sum \frac{B_v}{V_{ob}}}{n} \tag{4.26}$$

where n is the number of observations.

4.5 Results

4.5.1 $BTBH$ modelling

The detailed plots showing data, trend lines and models for each species are given in Appendix A.1 to E.1.

Fit of literature models

Table 4.4 summarises the results obtained for models following Equations 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 and 4.8.

TABLE 4.4 – Attributes of the different models of bark thickness at breast height ($BTBH$). Model following Equation 4.8 is shown when altitude effect is significant. The statistical significance is indicated by : NS : $p \geq 0.1$; * :$p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$. R^2 is the coefficient of determination. $RMSErel$ is the relative Root Mean Square Error. AIC is the Akaike Information Criterion. PME is the propagation of measurement error for Norway spruce only. The models in bold correspond to the model finally retained in this study. It must be remembered that the different parameters a to d are model-dependent.

Species	Model	a	b	c	d	R^2	RMSE rel (%)	AIC	PME
silver fir	Eq. 4.4	-2.691 ***	-0.4013 ***	1.057 ****	/	0.71	30.3	-228055	/
	Eq. 4.5	0.04036 ***	-0.1022 ***	0.4081 ***	-0.0003595 ***	0.72	30	-228593	/
	Eq. 4.6	0.000844 ***	0.02087 ***	0.01906 ***	-0.02074 ***	0.72	30.3	-228170	/
	Eq. 4.7	0.02473 ***	0.9021 ***	/	/	0.71	30.4	-227940	/
	Eq. 4.8	/	**0.892 *** **	**$5.838 \cdot 10^{-06}$ *** **	**0.0199 *** **	**0.73**	**29.5**	**-229444**	/
Norway spruce	Eq. 4.4	-3.227 ***	0.2666 ***	0.7861 ***	/	0.69	32.3	-391076	4.49
	Eq. 4.5	0.02452 ***	0.08554 ***	-0.04756 NS	$-8.34 \cdot 10^{-05}$ NS	0.71	31.5	-393323	5.12
	Eq. 4.6	0.00187 ***	0.01356 ***	0.03483 ***	-0.03145 ***	0.7	32.2	-391443	5.67
	Eq. 4.7	0.02408 ***	0.8723 ***	/	/	0.69	32.4	-391007	0.84
	Eq. 4.8	/	**0.8178 *** **	**$5.218 \cdot 10^{-06}$*** **	**0.01859 *** **	**0.72**	**30.7**	**-395525**	**0.19**
Douglas fir	Eq. 4.4	-2.996 ***	0.8389 ***	0.8468 ***	/	0.76	32	-152100	/
	Eq. 4.5	0.01911 ***	0.1259 ***	-0.1548 NS	0.0005875 ***	0.76	32.3	-151799	/
	Eq. 4.6	0.001364 ***	0.02312 ***	0.03851 ***	-0.009671 *	0.76	32	-152133	/
	Eq. 4.7	**0.04552 *** **	**1.1180 *** **	/	/	**0.77**	**30.5**	**-153769**	/
sessile oak	Eq. 4.4	-2.878 ***	-0.0314 NS	0.6863 ***	/	0.66	27.9	-401069	/
	Eq. 4.5	**0.01264 *** **	**0.4552 *** **	**-0.9218 *** **	/	**0.68**	**27.5**	**-402398**	/
	Eq. 4.6	0.002125 ***	0.03915 ***	-0.02089***	0.006342 ***	0.66	27.9	-401006	/
	Eq. 4.7	0.02748 ***	0.6759 ***	/	/	0.67	27.9	-401172	/
pedoncule oak	Eq. 4.4	-2.777 ***	-0.1084 ***	0.7357 ***	/	0.68	27	-351586	/
	Eq. 4.5	0.02695 ***	0.2846 ***	-0.5018 ***	-0.0002738 ***	0.69	27	-351588	/
	Eq. 4.6	0.00166 ***	0.04279 ***	-0.02609***	0.009523 ***	0.68	27	-351552	/
	Eq. 4.7	**0.02858 *** **	**0.6958 *** **	/	/	**0.68**	**26.8**	**-351992**	/
European beech	Eq. 4.4	-3.775 ***	0.00143 NS	0.8498 ***	/	0.64	38.7	-431527	/
	Eq. 4.5	0.01327 ***	0.05339 ***	-0.1006 **	-0.0001094 ***	0.66	37.6	-434014	/
	Eq. 4.6	0.0004547***	0.01204 ***	0.0008586 NS	-0.002298 ***	0.64	38.7	-431563	/
	Eq. 4.7	0.01149 ***	0.8516 ***	/	/	0.65	37.3	-434761	/
	Eq. 4.8	/	**0.8844 *** **	**$3.134 \cdot 10^{-06}$ *** **	**0.01023 *** **	**0.68**	**36**	**-437788**	/

With regard to the model proposed by Cao and Pepper (1986) for the sessile oak species, d parameter was found insignificant. The model was thus recalibrated without this parameter. This new model is the one presented here. In terms of R^2, $RMSErel$ and AIC, all models presented in Table 4.4 are quite similar. It can be observed that except for pedunculate oak and Norway Spruce, the model proposed by Cao and Pepper (1986) is slightly better than others. For pedunculate oak, the three models are really equivalent. The PME calculation, which is possible in the case of the Norway spruce species, showed a 5.12%, 4.49%, and 5.67% error propagation in the case of Cao and Pepper (1986), Wilhelmsson et al. (2002),

and Gordon (1983b), respectively. For models following Equation 4.7 and 4.8, PME were 0.84% and 0.19%.

Models following Equation 4.7 appeared to be rather good, with R^2 of 0.65 for European beech, 0.67 for sessile oak, 0.68 for pedunculate oak, 0.69 for Norway spruce, 0.71 for silver fir, and 0.77 for Douglas fir. However, the $RMSErel$ around 30% (up to 37.3% for European beech) shows that the natural variation of B_t cannot be perfectly described by a simple model. For all species, the model according to Equation 4.7 were thus not better than the best models found in the literature except for Douglas fir, pedunculate oak and European beech. The new models had an accuracy close to that of the literature models but had the advantage of having only two parameters and better results in terms of propagation of measurement error for the Norway spruce species.

After adjusting the model on altitude classes, we observed a significant relation between a and altitude only for silver fir, Norway spruce and European beech. Furthermore, it can be seen that models following Equation 4.8 are better than models of the literature. At the end we selected the model following Equation 4.8 for silver fir, Norway spruce, and European beech, models following Equation 4.7 for Douglas fir and pedunculate oak, and model following Equation 4.5 for sessile oak (Table 4.4). Figure 4.3 shows the form of the selected models predicting $BTBH$ for each species.

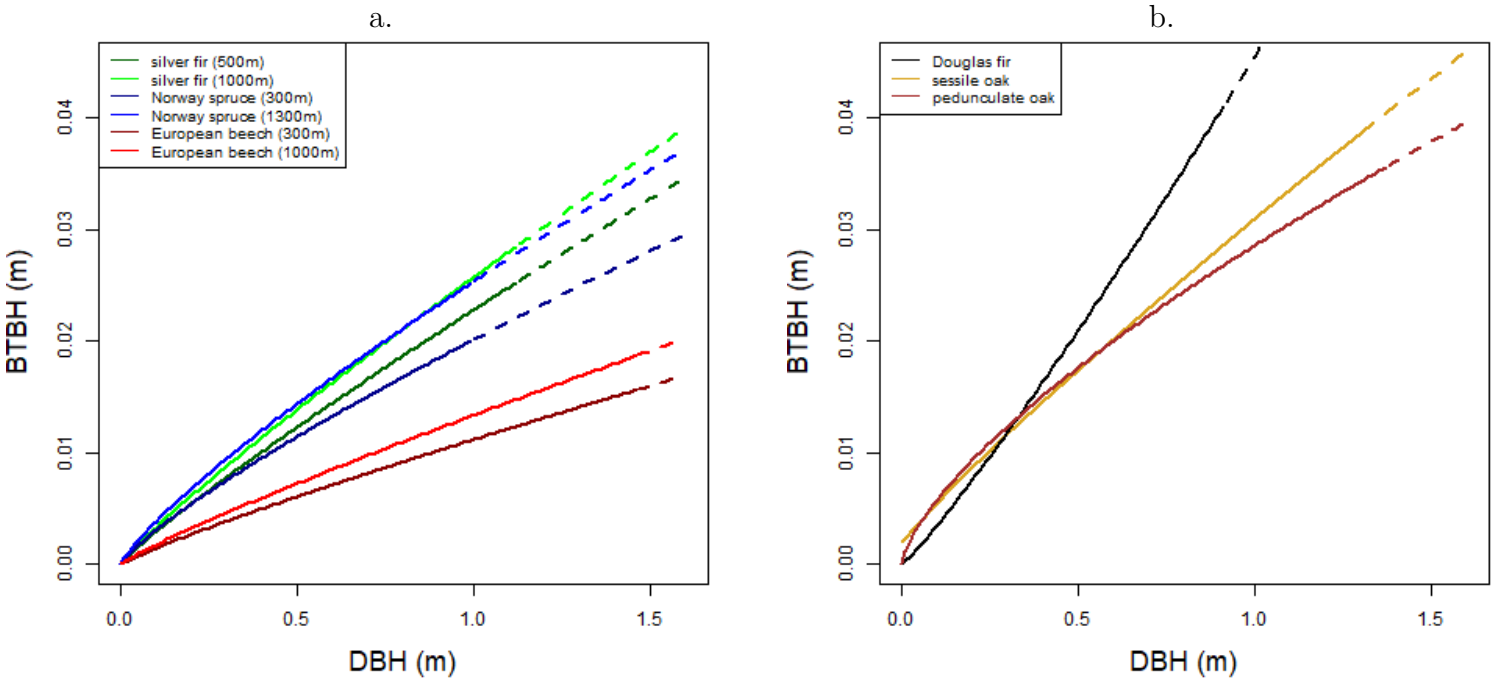


FIGURE 4.3 – Prediction of bark thickness at breast height ($BTBH$) from diameter at breast height (DBH) according to models selected in Table 4.4. a. : Models depending on altitude for silver fir, Norway spruce and European beech ; b. : Models without altitude for Douglas fir, pedunculate oak and sessile oak. The dotted lines show the extrapolated parts of the $BTBH$.

4.5.2 Models of B_v

Table 4.5 shows the modelling results for all species.

TABLE 4.5 – Models of bark volume (B_v) with bark thickness at breast height ($BTBH$) and stem volume over-bark (V_{ob}) for Eq. 4.10 (Meyer, 1946). The statistical significance is indicated by : NS : $p \geq 0.1$; * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$. R^2 is the coefficient of determination. $RMSErel$ is the relative Root Mean Square Error. AIC is the Akaike Information Criterion. PME is the propagation of measurement error for Norway spruce only. BP-test is the p-value of the Breusch-Pagan test *without* the structuration of the variance and *with* the structuration of the variance. The models in bold correspond to the models finally retained in this study.

Species	Model	a	b	c	d	e	σ	θ	R^2	RMSE rel (%)	AIC	PME	BP-test without	BP-test with
silver fir	Eq. 4.17	1.364 ***	-0.00101 ***	/	/	/	$9.51 \cdot 10^{-3}$	0.885	0.95	24.70	-3308	/	$2 \cdot 10^{-50}$	0.09
	Eq. 4.18	1.534 ***	0.0009592 ***	/	/	/	$9.23 \cdot 10^{-3}$	0.889	0.95	24	-3344	/	$4 \cdot 10^{-40}$	0.11
	Eq. 4.10	0.945 ***	/	/	/	/	/	/	0.89	39.1	/	/	/	/
	Eq. 4.11	**1.849 *****	/	**1.139 *****	**0.9048 *****	**0.8589 *****	$\mathbf{9.41 \cdot 10^{-3}}$	**0.876**	**0.96**	**23.5**	**-3330**	/	$\mathbf{4 \cdot 10^{-39}}$	**0.10**
Norway spruce	Eq. 4.17	1.3 ***	/	/	/	/	$8.22 \cdot 10^{-3}$	0.875	0.95	23.3	-3718	24.97	$1 \cdot 10^{-28}$	0.90
	Eq. 4.18	1.475 ***	0.000827 ***	/	/	/	$8.22 \cdot 10^{-3}$	0.880	0.95	25.3	-3714	24.3	$1 \cdot 10^{-29}$	0.84
	Eq. 4.10	0.943 ***	/	/	/	/	/	/	0.92	34.9	/	/	/	/
	Eq. 4.11	**0.7942 *****	/	**1.069 *****	**0.818 *****	**0.9594 *****	$\mathbf{7.92 \cdot 10^{-3}}$	**0.869**	**0.96**	**21.8**	**-3772**	**64.8**	$\mathbf{2 \cdot 10^{-30}}$	**0.91**
Douglas fir	Eq. 4.17	0.9958 ***	0.003118 ***	/	/	/	$9.83 \cdot 10^{-3}$	0.926	0.95	20.8	-1669	/	$2 \cdot 10^{-21}$	0.70
	Eq. 4.18	1.07 ***	0.005459***	/	/	/	$1.08 \cdot 10^{-2}$	0.870	0.95	21.4	-1628	/	$8 \cdot 10^{-22}$	0.61
	Eq. 4.10	0.921 ***	/	/	/	/	/	/	0.89	29.3	/	/	/	/
	Eq. 4.11	**0.2608 *****	/	**1.1 *****	**0.5981 *****	**0.9866 *****	$\mathbf{7.63 \cdot 10^{-3}}$	**0.956**	**0.95**	**16.7**	**-1815**	/	$\mathbf{1 \cdot 10^{-21}}$	**0.20**
sessile oak	Eq. 4.17	1.228 ***	-0.0004375 ***	/	/	/	$1.05 \cdot 10^{-2}$	0.946	0.91	24.7	-6764	/	$2 \cdot 10^{-49}$	0.76
	Eq. 4.18	1.386 ***	0.001027 ***	/	/	/	$1.04 \cdot 10^{-2}$	0.942	0.91	24.4	-6812	/	$8 \cdot 10^{-47}$	0.85
	Eq. 4.10	0.921 ***	/	/	/	/	/	/	0.87	30	/	/	/	/
	Eq. 4.11	**0.3399 *****	/	**1.077 *****	**0.7273 *****	**1.112 *****	$\mathbf{9.78 \cdot 10^{-3}}$	**0.935**	**0.92**	**22.7**	**-7003**	/	$\mathbf{5 \cdot 10^{-63}}$	**0.61**
pedonculate oak	Eq. 4.17	1.17 ***	/	/	/	/	$1.02 \cdot 10^{-2}$	0.925	0.91	29.3	-2325	/	$3 \cdot 10^{-12}$	0.36
	Eq. 4.18	1.353 ***	/	/	/	/	$1.05 \cdot 10^{-2}$	0.915	0.91	29.9	-2303	/	$5 \cdot 10^{-33}$	0.13
	Eq. 4.10	0.922 ***	/	/	/	/	/	/	0.87	35.4	/	/	/	/
	Eq. 4.11	**0.8077 *****	/	**1.229 *****	**0.7352 ****	**0.8744 *****	$\mathbf{9.76 \cdot 10^{-3}}$	**0.908**	**0.92**	**27.5**	**-2378**	/	$\mathbf{2 \cdot 10^{-28}}$	**0.18**
European beech	Eq. 4.17	1.214 ***	/	/	/	/	$5.68 \cdot 10^{-3}$	0.839	0.94	25.7	-8049	/	$2 \cdot 10^{-60}$	0.0030
	Eq. 4.18	1.386 ***	0.0007332 ***	/	/	/	$5.59 \cdot 10^{-3}$	0.845	0.94	26.4	-8053	/	$1 \cdot 10^{-61}$	0.0006
	Eq. 4.10	0.973 ***	/	/	/	/	/	/	0.87	42.6	/	/	/	/
	Eq. 4.11	**0.4478 *****	/	**1.018 *****	**0.7834 *****	**1.031*****	$\mathbf{5.18 \cdot 10^{-3}}$	**0.811**	**0.95**	**22.1**	**-8298**	/	$\mathbf{1 \cdot 10^{-56}}$	**0.003**

First, by considering Breusch-Pagan test (BP-test) results, we observed that `weights` argument of `gnls` function handled correctly heteroscedasticity for all models except for European beech and this for all models.

It can be observed that there is only a small difference between model following Equation 4.17 and model following Equation 4.18, in terms of AIC, $RMSErel$ and R^2. Consequently, the approximation we made by assuming, $DBH >> BTBH$ and $H_{tot} >> 1.3$ seems to be proper.

It can also be observed that results obtained with Equation 4.18 are much better than the ones obtained by Meyers' method (Equation 4.10). $RMSErel$ is decreased by 13% for silver fir, 12% for Norway spruce, over 9% for Douglas fir, 5% for sessile oak, 1.5% for pedunculate oak and 15% for European beech.

By comparing models following Equation 4.18 and Equation 4.11 (Kozak and Yang, 1981), it can be observed that, even if in terms of R^2 both models seem rather good, in terms of relative $RMSE$ and AIC, the model proposed by Kozak and Yang (1981) is significantly better. We select this model even if the one following Equation 4.18 is simpler.

The PME is, in the case of Norway spruce, approximately 24.5% for model following Equation 4.18, while 65.73% in the case of Kozak and Yang (1981). As Meyer's is not a

model, PME can not be calculate.

Table 4.6 presents the results obtained with models following Equations 4.19 and 4.11 with parameters summarised in Table 4.5 and $BTBH$ estimated with selected models presented in Table 4.4.

TABLE 4.6 – Models predicting bark volume (B_v) with an estimate of bark thickness at breast height ($\widehat{BTBH}$) provided by the models in bold of Table 4.4. Coefficient estimates are provided in Tables 4.4 and 4.5. The models in bold correspond to the models finally retained in this study.

Species	Model	R^2	RMSErel (%)
silver fir	Eq. 4.19	0.87	47.6
	Eq. 4.11*	0.87	45.2
Norway spruce	Eq. 4.19	0.91	31.9
	Eq. 4.11	0.92	31.1
Douglas fir	Eq. 4.19	0.87	35.3
	Eq. 4.11	0.89	29.5
sessile oak	**Eq. 4.19**	0.88	28.5
	Eq. 4.11	0.87	29.6
pedonculate oak	**Eq. 4.19**	0.88	36
	Eq. 4.11	0.88	36.1
European beech	Eq. 4.19	0.85	51.8
	Eq. 4.11	0.85	47.7

** For silver fir both models presented here were not as good as the model of Eq. 4.10 (Meyer, 1946) in Table 4.5. Thus we finally retained Meyer's model.*

By comparing models following Equation 4.19, in Table 4.6 and 4.5, several differences can be observed. For silver fir, Douglas fir, and European beech, a large increase of $RMSErel$ can be detected when instead of using the model with $BTBH$ (Equation 4.18) we use the model with $\widehat{BTBH}$. For Norway spruce, pedunculate oak, and sessile oak, a small increase of $RMSErel$ can also be observed between the two models respectively of 6%, 4%, and 6%.

The same accuracy loss can be observed for the model proposed by Kozak and Yang (1981). It can be nevertheless pointed out that for sessile oak, model following Equation 4.19 became better than models proposed by Kozak and Yang (1981).

4.5.3 Application of BTBH and Bv models to NFI data to estimate bark resources at regional scale

Applying the best $BTBH$ and B_v models to NFI data, as well as specific bark densities (Billard et al., 2020) and extractive content (Brennan et al., 2020a), we were able to provide estimates of the volume, biomass and amount of extractives in the bark of all trees cut annually in Grand Est and Bourgogne-Franche-Comté regions. We will consider the whole stem, stump and tree top included. In total for the two regions, about 1.2 million m^3 of bark were cut each year between 2009 and 2018. This represents a total bark biomass of 600

000 t/year and about 160 000 t/year of bark extractives. For each metric (volume, biomass, amount of extractives), the annual cutting was slightly higher in Bourgogne-Franche-Comté than in Grand Est (52 % vs 48 % of the total for the two regions, respectively). In addition, the two regional cutting presented slight differences in term of species composition. In Bourgogne-Franche-Comté, the annual cutting was dominated by pedunculate oak (22 % of the regional bark volume cut each year) followed by Norway spruce (21 %), Douglas fir and silver fir (18 % each). By contrast in Grand Est, the annual cutting was dominated by Norway spruce (27 % of the regional bark volume xut each year) followed by silver fir (20 %), pedunculate oak (18 %) and European beech (15 %).

Table 4.7 shows the resources calculated for the six species in the two regions, Grand-Est and Bourgogne-Franche-Comté.

TABLE 4.7 – Summary of bark resources calculated for each species in Bourgogne-Franche-Comté (BFC) and Grand-Est (GE) regions. Values correspond to ±95% confidence interval around mean.

Region	**Species**	**Volume** $(1000 \cdot m^3/year)$	**Biomass** $(1000 \cdot t/year)$	**Extractives** $(1000 \cdot t/year)$
Bourgogne-Franche-Comté	Silver fir	108 ± 25	55 ± 13	12 ± 3
Bourgogne-Franche-Comté	Norway spruce	127 ± 34	58 ± 16	12 ± 3
Bourgogne-Franche-Comté	Douglas fir	109 ± 41	48 ± 18	11 ± 4
Bourgogne-Franche-Comté	Sessile oak	75 ± 17	43 ± 10	14 ± 3
Bourgogne-Franche-Comté	Pedunculate oak	137 ± 22	78 ± 13	25 ± 4
Bourgogne-Franche-Comté	European beech	55 ± 10	37 ± 7	10 ± 2
Bourgogne-Franche-Comté	Total	611 ± 57	318 ± 28	84 ± 7
Grand-Est	Silver fir	109 ± 21	56 ± 11	12 ± 2
Grand-Est	Norway spruce	151 ± 39	69 ± 18	15 ± 4
Grand-Est	Douglas fir	32 ± 16	14 ± 7	3 ± 2
Grand-Est	Sessile oak	82 ± 16	47 ± 9	15 ± 3
Grand-Est	Pedunculate oak	98 ± 19	56 ± 11	18 ± 4
Grand-Est	European beech	86 ± 11	57 ± 7	15 ± 2
Grand-Est	Total	558 ± 46	298 ± 23	78 ± 6

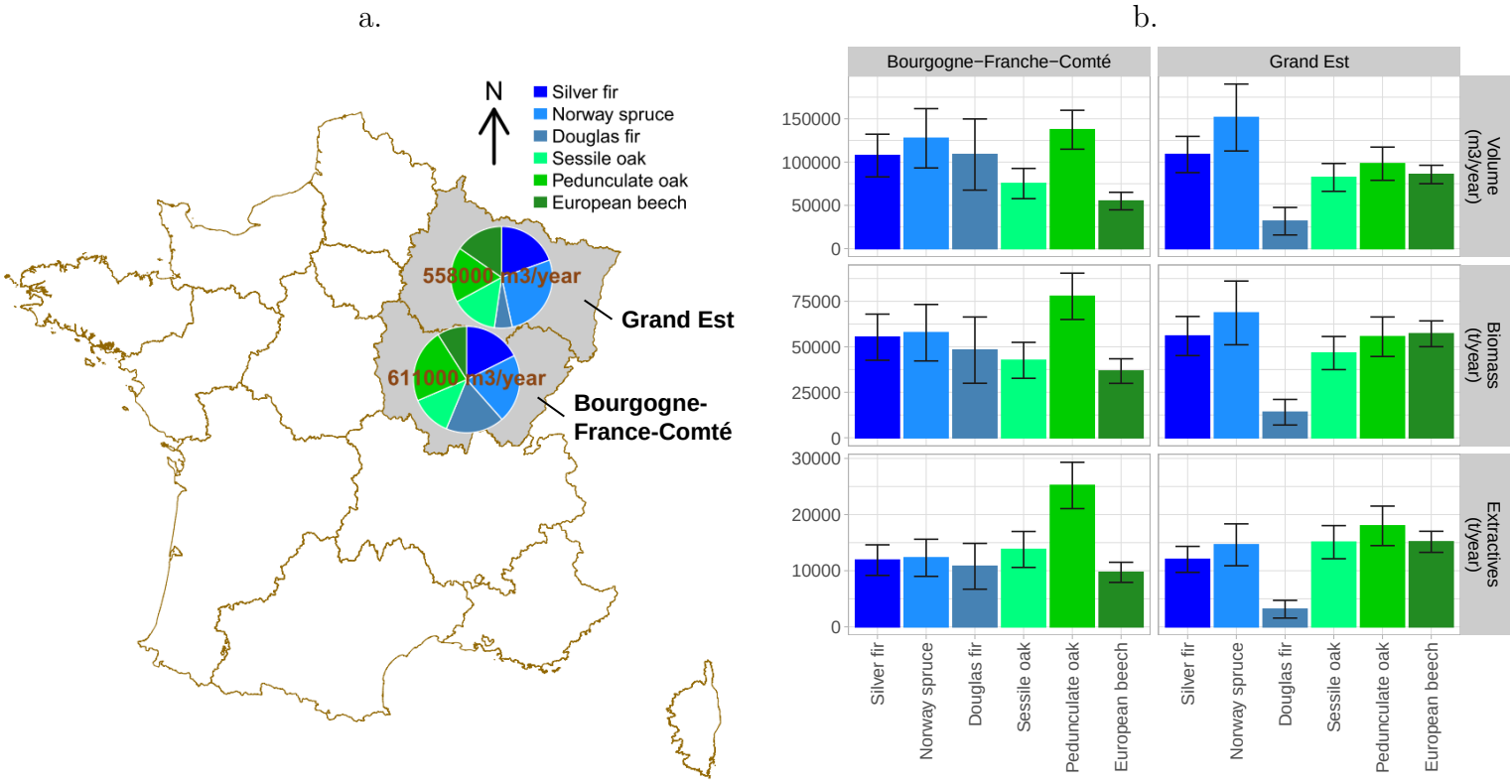


FIGURE 4.4 – a. : Repartition of bark volume removals between species. b. : Removals depending on species for two regions. Error bars represent the 95 % confidence interval around means.

4.6 Discussion

4.6.1 Accuracy of measurements

In using a Swedish bark gauge, which has a high degree of inaccuracy (Stängle et al., 2016; Althen, 1964), it is noteworthy to identify the different sources of errors that are propagated onto our targeted models. To achieve this, we have used a method based on a Monte Carlo technique (see section 4.4.6). At this stage, it is appropriate to mention that the amount of error propagated onto the model does not speak for the goodness of the model, but rather determines its accuracy and prediction power. Determining whether the model is good or not would require an instrumental variable method in the case of non-linear models (Pearl, 2009), or a dedicated Monte Carlo simulations with pseudo-data and a detailed study of the bias and variance that could be generated on model parameters ; this is outside the scope of this paper. In this article, we have applied this method on two kinds of selected models, $BTBH$ and B_v.

For the $BTBH$ model, we have seen that the error propagation (when altitude is unk-

nown) for Equation 4.5 is fairly small (5.12%). However, when altitude is known (Equation 4.8) the error propagation is relatively smaller (0.19%). For the B_v models, Kozak and Yang (1981)'s model incurred a 64.8% error propagation. This can only be explained by the amount of B_t measurements that are used to calculate B_v in the first place (several truncated cones with different B_t measurements), each measurement possessing an error on its own, eventually affecting its propagation within the model. It is expected that a better measurement technique could induce a higher inherent model accuracy.

4.6.2 Model application

In this work we applied models found in the literature on our targeted species. The B_v models following Equations 4.9 and 4.11 were initially designed for softwood and hardwood species. The differences in stem shape between both types of species were not taken into account. However, the models seem to be generic enough to fit both types in an equivalent way.

It can nevertheless be pointed out that for hardwood species, by considering only the stem bark, bark volume may have been seriously underestimated at least if we do not cout the bark of branches. Ver Planck and MacFarlane (2014) estimated that, on average, branches of hardwood account of 41% of the total wood volume in a tree.

4.6.3 Comparison of $BTBH$ models

Despite the different forms of models proposed, none of the tested models in this study provided $RMSErel$ lower than 20%. This unfortunate situation may be due to the natural variability of the bark, the error of the measurement described above, and/or the fact that an explanatory variable in addition to DBH and altitude has not been identified and is therefore not available. Nevertheless, an effect of altitude was evidenced and is quite interesting. The models we consider to be used are shown in bold in Table 4.4.

4.6.4 Altitude effect

An effect of altitude was observed for three species (silver fir, Norway spruce, European beech). This effect is positive : the higher the altitude, the larger the parameter a and the stronger B_t increases with DBH. This can be seen very clearly in Figure 4.3a. One of the reasons is the allocation of biomass between the bark and other parts of the tree, which varies with altitude. No effect was observed for the other species (Douglas fir, sessile oak and pedunculate oak).

The difference between species can be first explained by a statistical reason. For some species data are available over a wide range of altitudes, while for others this range is more restricted. If an altitude effect does exist, in the first case it can be tested, while in the second case it may not. This hypothesis is confirmed because it turns out that for silver fir, Norway spruce and European beech the altitude range is respectively from 0-1800m, 0-2000m and 0-1600m. These are the species for which the effect is significant. On the other hand, the

range of altitudes is much more restricted for the other three species, respectively 0-1400m, 0-1100m and 0-1000m fir Douglas fir, sessile oak and pedunculate oak. For these species the effect is not significant. To be exact it must be specified if whether in all cases, and particularly for Douglas fir, sessile oak, and pedunculate oak, this altitude range reflects the real distribution of altitudes throughout the range or represents only a part of it.

With regard to the effect of environmental factors, a lot of studies showed relation between B_t and fire (Pausas, 2015; Schafer et al., 2015; Bauer et al., 2010). Although fire is not a common issue for these species in France, bark thermal insulation properties are worth considering Indeed, De Antonio et al. (2020) showed that bark properties, especially low bark density, protected buds against frost while Molina et al. (2016) showed a link between resistance to frost and B_t. They have worked on species of Brazilian savannah and in Patagonia. It can be wondered if this protection strategy also applied to our species. Further investigations may be required to analyse the actual effect of frost on increasing B_t or a comination of both. Moreover, it is questionable whether the strategy protection of Douglas fir, sessile oak, and pedunculate oak may be based more on decreasing bark density than on increasing B_t.

Another factor influencing relative bark thickness is growth rate (Stängle et al., 2017; Stängle and Dormann, 2018; Laasasenaho et al., 2005). Growth rate has a negative influence on relative bark thickness meaning that the slower a tree grows, the bigger B_t will be compared to DBH. The fact that trees grow slower in altitude given the more difficult environmental conditions, it can explain the relationship we observed. However, we are not able to separate the influence of growth rate and the influence of altitude since the age of the trees was not recorded.

Rosell et al. (2014) showed that bark also has a function of water storage. Water storage mainly increases with B_t. As studied by Antoni et al. (2011), French mountains have a smaller usable reserve of water than lowland which can so influence the difference of B_t. However, usable reserve is not only dependent on altitude, and thus further research is needed to validate this hypothesis.

If one of these reasons can be validated, it is reasonable to think that using these values (temperature or usable reserve of water) will lead to build a better model, closer to the actual effect that is linked to the variation of B_t.

Other variables such as latitude, longitude, and type of forest (coppice or high forest), and H_{tot} were tested but no significant influence was found.

4.6.5 Comparison of B_v models

In the Results section, we have selected the model following Equation 4.11 taking into account $RMSErel$ and R^2 values. However, it can be reasonably argued that the model following Equation 4.18 is preferable since it has fewer parameters and thus is more robust and simpler to use. Moreover, the error associated to the parameters is smaller for the model following Equation 4.18 than that for the one following Equation 4.11 (Annexe G.1). Thus the model following Equation 4.18, although slightly less accurate than model following Equation 4.11, could be a good alternative.

Comparing Tables 4.5 and 4.6 it appears that, for silver fir, Douglas fir, and European beech, the accuracy losses by replacing $BTBH$ by $\widehat{BTBH}$ are respectively of 23%, 14%, and 25%. Although $BTBH$ measurements are found to be helpful when predicting B_v for these species, the models predicting $BTBH$ for these species are not enough accurate to predict correctly B_v.

4.6.6 Comparison of B_p

TABLE 4.8 – Bark proportions expressed in percent calculated for IGN and Emerge datasets with methods 1 and 2 (see section 4.4.7), published in FCBA (2019) and quantified by the Meyer's coefficient $(1 - a^2)$.

Species	IGN	FCBA (2019) adapted for IGN	Emerge Method 1	Emerge Method 2	FCBA (2019) adapted for Emerge	Meyers'Coefficient, $(1 - a^2)$
silver fir	11.2 %	11.1 %	11.6 %	13.4 %	11.2 %	11.9 %
Norway spruce	11.9 %	11 %	10.2 %	11.6 %	11 %	10.4 %
Douglas fir	15 %	14.5 %	15.3 %	18.3 %	14.5 %	19.8 %
sessile oak	17.9 %	15.6 %	12.9 %	15.1 %	15.24 %	14.0 %
pedunculate oak	16.5 %	15.5 %	12 %	13.9 %	15.29%	13.1 %
European beech	5.8 %	5.5 %	7.3 %	8.1 %	5.5 %	7.1%

In the Table 4.8, column *Emerge Method 1* on table 4.8 represents the measured B_p and column *Emerge Method 2* the B_p predicted with the bark volume model of Equation 4.11 (Kozak and Yang (1981), best fit model see table 4.5), which over-estimates the measured proportion. Also, compared to *Emerge Method 1* the values predicted using the Meyer's coefficients all over-estimated B_p except for European beech.

The difference with FCBA (2019) may be due to the method used for applying the provided data. Indeed, FCBA (2019) provided B_p for different ranges of DBH starting from 25 cm, while for computing the mean proportion we averaged these values weighed by the number of trees in each class, applying the value of the lower class (25-30 cm) to all trees smaller than 25cm.

The IGN dataset (column *IGN*) is closer to FCBA (2019) (column *FCBA (2019) adapted for IGN*) except for sessile oak, pedunculate oak, and Norway spruce. The hight proportion of trees with a DBH smaller than 20cm can explain this difference, especially for Norway spruce. One may wonder if, for pedunculate oak and sessile oak, there is an important variation of B_p with respect to DBH for small trees. It can also be observed that the assumption made by Meyer (1946) of a constant B_p along the stem is rightful for silver fir, Norway spruce, and European beech. Indeed, the Meyers' coefficient is close to the bark ratio measured for our trees except for Douglas fir and the two oak species.

4.7 Conclusion

To assess regional bark availability in terms of volume, biomass and quantities of extractive, we built several models to predict bark thickness at breast height and tree bark volume,

from usual tree measurements such as total height and diameter at breast height and an ecological variable, altitude. This modelling wa achieved for six temperate species : Silver fir, Norway spruce, Douglas fir, sessile oak, pedunculate oak, and European beech. We observed a statistical influence of altitude on bark thickness at breast height for three species, silver fir, Norway spruce, and European beech which opens the door to more ecological studies on bark. Theses models have been adjusted on bark data collected in France. Considering the number of trees studied, the diversity of measurements made, and the number of bark thickness measurements made, these data are particularly rich and unique. The model set includes models developed elsewhere for other species or new ones created in this study. We obtained models predicting bark thickness at breast height with an R^2 around 0.70 and a relative $RMSE$ around 30% which is an improvement of 0.1 for R^2 and of 1-2% for relative $RMSE$ depending on the species compared to the best models from the literature. For models predicting bark volume, we obtained a R^2 of 0.90 and a relative $RMSE$ which varies between 22% when bark thickness at breast height is included and 40% when it is included by a prediction model of bark thickness at breast height. In this paper we have been able to valorise national forest inventory data, newly collected basic density and extractive rate data.

Appendices

Modelling bark volume for six main tree species in France: Assessment of models and application at regional scale

Silva INRAE
Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, Silva, 54000 Nancy, France

Contents

A Diameter at Breast Height ranges in Emerge and IGN datasets **3**

B Standardized residuals of the selected models of bark thickness at breast height **4**

C Standardized residuals of the selected models of bark volume **5**

D Relation between altitude and a parameter. **6**

E Standard errors of the parameter estimates for the models of bark thickness at breast height **7**

F Standard errors of the parameter estimates for the models of bark volume **8**

APPENDIX A

Diameter at Breast Height ranges in Emerge and IGN datasets

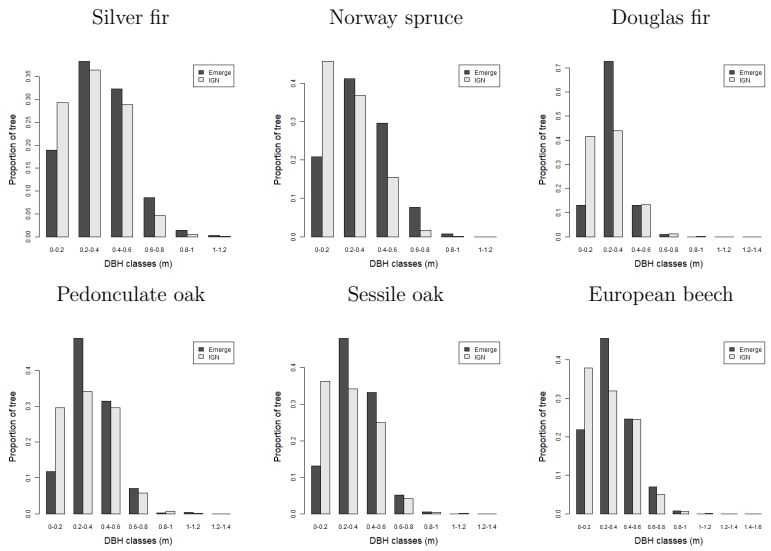


Figure A.1: Diameter at breast height (DBH) distribution of the trees from Emerge and IGN datasets, for silver fir, Norway spruce, Douglas fir, pedunculate oak, sessile oak and European beech.

APPENDIX B

Standardized residuals of the selected models of bark thickness at breast height

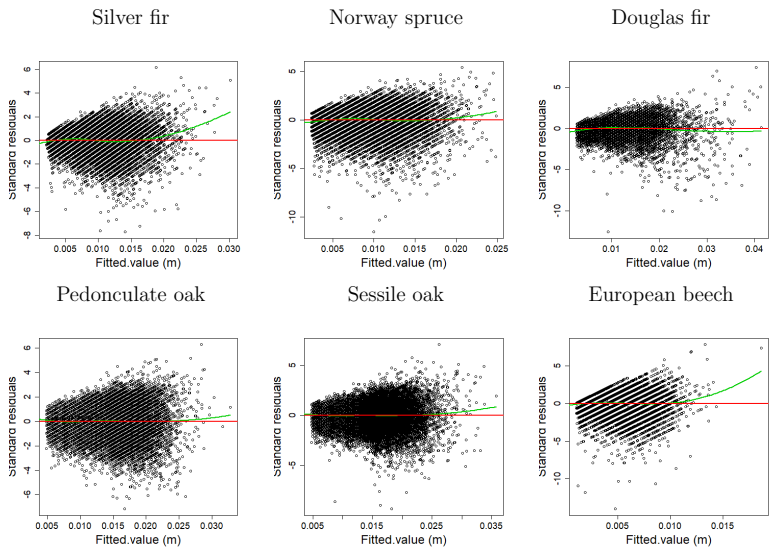


Figure B.1: Relationship between standard residuals and fitted values for silver fir, Norway spruce, Douglas fir, pedunculate oak, sessile oak and European beech for the models selected in Table 5.4. The red lines correspond to the horizontal axes, the green lines give the trend of the residuals.

APPENDIX C

Standardized residuals of the selected models of bark volume

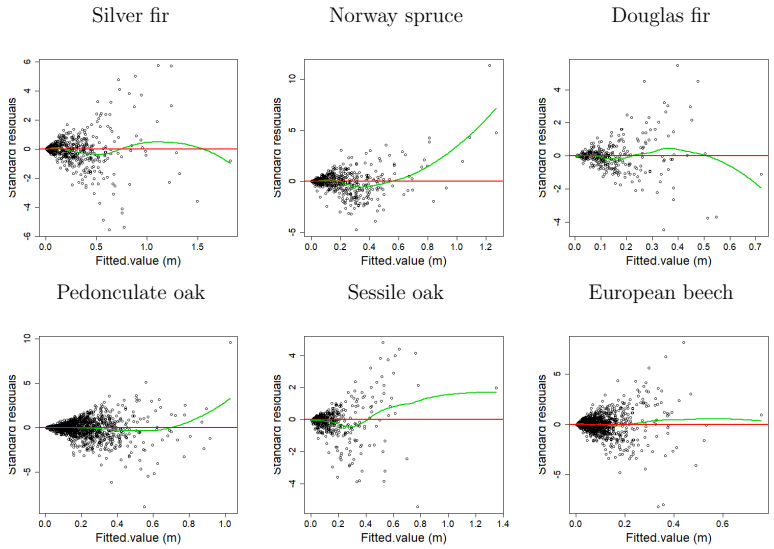


Figure C.1: Relationship between standard residuals and fitted values for silver fir, Norway spruce, Douglas fir, pedunculate oak, sessile oak and European beech for the models selected in Table 5.5. The red lines correspond to the horizontal axes, the green lines give the trend of the residuals.

APPENDIX D

Relation between altitude and a parameter.

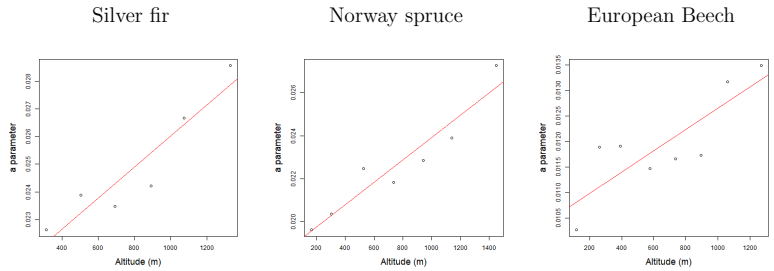


Figure D.1: Relationship between altitude and the value of a parameter in model following Equation 5.7for silver fir, Norway spruce and European beech. Red line corresponds to the regression done.

APPENDIX E

Standard errors of the parameter estimates for the models of bark thickness at breast height

Table E.1: Standard error associated to the parameters estimated for the models of bark thickness at breast height ($BTBH$). The model following Equation 5.8 is shown when altitude effect is significant.The parameter values are given in Table 5.4.

Species	Model	a	b	c	d
silver fir	Eq. 5.4	$2.96 \cdot 10^{-2}$	$3.74 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	/
	Eq. 5.5	$137 \cdot 10^{-3}$	$1.66 \cdot 10^{-3}$	$5.57 \cdot 10^{-2}$	$2.57 \cdot 10^{-5}$
	Eq. 5.6	$9.96 \cdot 10^{-5}$	$9.39 \cdot 10^{-4}$	$2.49 \cdot 10^{-3}$	$1.90 \cdot 10^{-3}$
	Eq. 5.7	$9.92 \cdot 10^{-5}$	$4.30 \cdot 10^{-3}$	/	/
	Eq. 5.8	/	$1.48 \cdot 10^{-7}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$	$4.15 \cdot 10^{-3}$
Norway spruce	Eq. 5.4	$2.30 \cdot 10^{-2}$	$3.15 \cdot 10^{-2}$	$1.05 \cdot 10^{-2}$	/
	Eq. 5.5	$8.57 \cdot 10^{-4}$	$9.52 \cdot 10^{-2}$	$3.00 \cdot 10^{-2}$	$1.74 \cdot 10^{-5}$
	Eq. 5.6	$7.17 \cdot 10^{-5}$	$7.71 \cdot 10^{-2}$	$2.31 \cdot 10^{-3}$	$2.03 \cdot 10^{-3}$
	Eq. 5.7	$8.40 \cdot 10^{-5}$	$3.03 \cdot 10^{-3}$	/	/
	Eq. 5.8	/	$7.30 \cdot 10^{-8}$	$9.93 \cdot 10^{-5}$	$2.96 \cdot 10^{-3}$
Douglas fir	Eq. 5.4	$3.47 \cdot 10^{-2}$	$4.56 \cdot 10^{-2}$	$1.67 \cdot 10^{-2}$	/
	Eq. 5.5	$2.42 \cdot 10^{-3}$	$3.02 \cdot 10^{-2}$	$1.07 \cdot 10^{-1}$	$4.41 \cdot 10^{-5}$
	Eq. 5.6	$1.65 \cdot 10^{-4}$	$1.75 \cdot 10^{-3}$	$5.26 \cdot 10^{-3}$	$4.61 \cdot 10^{-3}$
	Eq. 5.7	$2.46 \cdot 10^{-4}$	$4.93 \cdot 10^{-3}$	/	/
sessile oak	Eq. 5.4	$1.75 \cdot 10^{-2}$	$2.31 \cdot 10^{-2}$	$8.17 \cdot 10^{-3}$	/
	Eq. 5.5	$1.51 \cdot 10^{-3}$	$1.74 \cdot 10^{-2}$	$5.76 \cdot 10^{-2}$	$3.05 \cdot 10^{-5}$
	Eq. 5.6	$8.25 \cdot 10^{-5}$	$7.82 \cdot 10^{-4}$	$2.03 \cdot 10^{-3}$	$1.54 \cdot 10^{-3}$
	Eq. 5.7	$7.38 \cdot 10^{-5}$	$2.48 \cdot 10^{-3}$	/	/
pedunculate oak	Eq. 5.4	$1.76 \cdot 10^{-2}$	$2.24 \cdot 10^{-2}$	$8.63 \cdot 10^{-3}$	/
	Eq. 5.5	$1.90 \cdot 10^{-3}$	$2.12 \cdot 10^{-2}$	$6.92 \cdot 10^{-2}$	$3.96 \cdot 10^{-5}$
	Eq. 5.6	$9.01 \cdot 10^{-5}$	$7.87 \cdot 10^{-2}$	$1.90 \cdot 10^{-2}$	$1.33 \cdot 10^{-3}$
	Eq. 5.7	$7.69 \cdot 10^{-5}$	$2.71 \cdot 10^{-3}$	/	/
European beech	Eq. 5.4	$2.29 \cdot 10^{-2}$	$2.90 \cdot 10^{-2}$	$1.13 \cdot 10^{-2}$	/
	Eq. 5.5	$6.96 \cdot 10^{-4}$	$8.92 \cdot 10^{-3}$	$3.28 \cdot 10^{-2}$	$1.25 \cdot 10^{-5}$
	Eq. 5.6	$3.70 \cdot 10^{-5}$	$3.51 \cdot 10^{-4}$	$8.94 \cdot 10^{-4}$	$6.56 \cdot 10^{-4}$
	Eq. 5.7	$7.69 \cdot 10^{-5}$	$2.71 \cdot 10^{-3}$	/	/
	Eq. 5.8	/	$9.51 \cdot 10^{-7}$	$4.02 \cdot 10^{-4}$	/

APPENDIX F

Standard errors of the parameter estimates for the models of bark volume

Table F.1: Standard error associated to the parameters estimated for the model of bark volume (B_v). The parameter values are given in Table 5.5.

Species	Model	a	b	c	d	e
silver fir	Eq. 5.17	$9.64 \cdot 10^{-3}$	$1.39 \cdot 10^{-4}$	/	/	/
	Eq. 5.18	$1.06 \cdot 10^{-2}$	$1.27 \cdot 10^{-4}$	/	/	/
	Eq. 5.10	/	/	/	/	/
	Eq. 5.11	0.226	/	$3.28 \cdot 10^{-2}$	$1.88 \cdot 10^{-2}$	$3.22 \cdot 10^{-2}$
Norway spruce	Eq. 5.17	$8.37 \cdot 10^{-3}$	/	/	/	/
	Eq. 5.18	$1.08 \cdot 10^{-2}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$	/	/	/
	Eq. 5.10	/	/	/	/	/
	Eq. 5.11	0.120	/	$3.30 \cdot 10^{-2}$	$2.37 \cdot 10^{-2}$	$3.63 \cdot 10^{-2}$
Douglas fir	Eq. 5.17	$1.09 \cdot 10^{-2}$	$4.57 \cdot 10^{-4}$	/	/	/
	Eq. 5.18	$1.26 \cdot 10^{-2}$	$5.37 \cdot 10^{-4}$	/	/	/
	Eq. 5.10	/	/	/	/	/
	Eq. 5.11	$5.24 \cdot 10^{-2}$	/	$3.91 \cdot 10^{-2}$	$2.87 \cdot 10^{-2}$	$4.14 \cdot 10^{-2}$
sessile oak	Eq. 5.17	$6.79 \cdot 10^{-3}$	$1.45 \cdot 10^{-4}$	/	/	/
	Eq. 5.18	$7.53 \cdot 10^{-3}$	$1.40 \cdot 10^{-4}$	/	/	/
	Eq. 5.10	/	/	/	/	/
	Eq. 5.11	$3.45 \cdot 10^{-2}$	/	$1.93 \cdot 10^{-2}$	$1.87 \cdot 10^{-2}$	$2.18 \cdot 10^{-2}$
pedunculate oak	Eq. 5.17	$1.01 \cdot 10^{-2}$	/	/	/	/
	Eq. 5.18	$1.20 \cdot 10^{-2}$	/	/	/	/
	Eq. 5.10	/	/	/	/	/
	Eq. 5.11	0.165	/	$2.93 \cdot 10^{-2}$	$2.99 \cdot 10^{-2}$	$4.78 \cdot 10^{-2}$
European beech	Eq. 5.17	$5.90 \cdot 10^{-3}$	/	/	/	/
	Eq. 5.18	$8.10 \cdot 10^{-3}$	$8.34 \cdot 10^{-5}$	/	/	/
	Eq. 5.10	/	/	/	/	/
	Eq. 5.11	$4.30 \cdot 10^{-2}$	/	$1.44 \cdot 10^{-2}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	$2.10 \cdot 10^{-2}$

4.8 Perspectives suite à l'article

Les travaux effectués dans cet article sont intéressants mais méritent d'être continués. Une première voie d'amélioration des résultats consiste en l'analyse de l'influence de l'altitude. En effet, si une corrélation positive a été mise en évidence entre altitude et $EE130$, le lien qui les unis ne reste qu'hypothèse et il conviendrait donc de l'étudier. Du point de vue des modèles, il est à noter qu'ils ont plus de mal à gérer la variabilité croissante avec le $d130$ de la quantité d'écorce disponible sur un arbre. De fait les prédictions faites pour les gros arbres sont bien moins précises que celles faites pour les petits. Un travail spécifique sur les gros arbres peut donc être envisagé afin de réduire la variabilité spécifique que leur volume d'écorce présente. Ce travail ne permet pas d'atteindre une précision inférieurz à 22% hormis pour le Douglas. Il pourrait donc être complété par d'autres modèles de formes différentes qui pourrait encore améliorer la précision des modèles, en particulier si l'influence de l'altitude est expliquée. Ces modèles présentent aussi un défaut. Ils ne permettent de prédire le volume d'écorce que sur l'intégralité de la tige. Or, d'un point de vue industriel, c'est rarement l'intégralité de la tige qui est exploitée. Un modèle qui pourrait différencier selon les différentes classes de diamètre du bois serait donc très intéressant. C'est ce point qui est étudié dans la partie 5. Enfin, cette étude peut-être prolongée sur d'autre essences importantes de la forêt française.

Chapitre 5

Article 2 : Modèles de variation longitudinal de la surface d'écorce.

5.1 Présentation de l'article

Cette article expose le travail effectué sur la modélisation de la variation longitudinale de la surface d'écorce dans les arbres. Nous avons comparé onze modèles de profils d'écorce divers tant en termes de variables prédites ($2 * Ep_{ec}$, $ln\left(\frac{2Ep_{ec}}{D_{su}}\right)$, $\frac{Ep_{ec}}{EE130}$, $\frac{D_{su}}{D_{ss}}$ ce qui correspond dans l'article à : DBT, $ln\left(\frac{DBT}{D_{ob}}\right)$,$\frac{B_t}{BTBH}$,$\frac{D_{ob}}{D_{ub}}$) que de variables utilisées (H_{tot}, DBH, h, D_{ob}, $BTBH$) ainsi qu'un nouveau modèle inspiré des modèles à exposants variables utilisés pour les profils de tiges. Les profils d'écorce ont été construits grâce aux données Emerge mesurés avec une jauge à écorce. Les modèles ont été testés sur les six essences de cette thèse, *Abies alba*, *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii*, *Quercus robur*, *Quercus patraea* et *Fagus sylvatica*. La création de ces modèles permet de répondre à une demande plus spécifique qu'un modèle de volume global puisqu'il permet d'estimer la quantité d'écorce disponible selon les différentes utilisations du bois (bois d'industrie, bois d'œuvre, bois-énergie). C'est donc plus utile d'un point de vue ressource puisque cela permet une estimation plus fine de l'écorce disponible. De plus, des modèles ont été utilisés pour mieux tenir compte des différences entre arbres. Ils ont ensuite été appliqués à la ressource industrielle des deux régions du projet ExtraFor_Est, Bourgogne-Franche Comté et Grand Est.

La précision des meilleurs modèles est comprise entre 21% et 30 % de RMSErel pour un R^2 compris entre 0.91 et 0.95 selon les essences. Les meilleurs modèles sont ceux qui utilisent la variable $EE130$ comme variable d'entrée, ce qui démontre une fois de plus son importance dans la prédiction des quantités d'écorce. De plus, cet article montre aussi que pour prédire la surface d'écorce, la variable la plus importante est le diamètre de la tige à la même hauteur, bien plus importante que la hauteur elle-même. Cependant, le nouveau modèle que nous avons mis au point pour ce travail montre des résultats très intéressants sans cette information du diamètre et, s'il n'est pas le meilleur, il ne perd pourtant que 4 à 7 % par rapport aux meilleurs modèles. Le Douglas semble être l'essence dont les modèles prédisent le plus précisément la surface d'écorce à différentes hauteurs tandis que le chêne

pédonculé est celle dont la prédiction est la moins bonne.

Vertical distribution of bark biomass. Assesment and application of bark surface model for six main tree species in France

5.2 Abstract

Predicting bark volume is increasingly necessary as bark turns to be a major source of chemicals molecules. This can be done in several ways as predicting the total amount of bark or its variations along de stem. This article focuses on the comparison between 12 models of bark area from the literature and an alternative model inspired by the variable exponent taper equations. This comparison was made on six main species of North-Eastern France : *Abies alba* , *Picea abies*, *Pseudotzuga menziesii*, *Quercus petreae*, *Quercus robur* et *Fagus sylvatica*.A large was used databank gathering bark thickness measured at different heights on 4 835 trees from France. Results shows that three models are definitely better than the others to predict bark area : the models proposed by Johnson and Wood (1987), Cao and Pepper (1986) and the alternate model. These models achieve an accuracy of 23 % to 38 % of relative root mean square error depending on the species and the model considered. The alternate model achieves a slightly lower accuracy than the two other models but without requiring to measure the profile of stem. The propagation of bark gauge measurements errors, was estimated. The models were applied to predict the resources of two French regions : Bourgogne-Franche-Comté and Grand Est.

keyword

bark area ; bark gauge ; nonlinear mixt models ; bark biomass ; softwood ; hardwood

5.3 Introduction

The Bark is a protecting structure of tree's living tissues (e.g., phloem, dormant buds, or sapwood ; Charles-Dominique et al. 2015) against extreme temperatures (De Antonio et al., 2020; Pausas, 2015; Rosell, 2016), injuries (Theander, 1985; Harun and Labosky, 1985), or micro-organisms (Franceschi et al., 2005). Because of these multiple protective functions, tree bark is a material that can be used in different ways (Pasztory et al., 2016). It takes part in the production of insulating materials (Gil, 2014), medications (Turner and Hebda, 1990; Anderson, 1955; Rastogi et al., 2015), latex corks (Thomas et al., 1995), horticultural substrates, and energy (Lu et al., 2006). A part of these functions is provided by extractives (Valette et al., 2017; Borgin and Corbett, 1974; Strizincova et al., 2019), in which they posses a high valuable potential as a base for chemistry in cosmetic (Arct and Pytkowska, 2008), medicine (Carriço et al., 2018), and foams (Tondi and Pizzi, 2009). Thus, being able to predict the quantity of extractives in bark is of an importance for forest managers.

Recently, a work done by Bauer et al., (2021, unpublished) used bark volume models to predict bark quantity. However, in this article, we will focus on models predicting bark profile

(i.e., the vertical variations in bark amount). Using such models will allow forest managers and the primary wood processing manufacturers to predict the quantity of bark or wood available on a trunk, and even so on a defined part of the trunk. The prediction is thus not done in a global way (e.g., like for a bark or stem volume model), but locally at different heights in the stem. With this approach, and according to the diameter, the available bark or stem wood volume can be employed among various uses (furniture, structural lumber, pulp and paper, fuel wood).

Different ways for measuring bark profiles can be found in the literature. For example, bark thickness can be obtained by initially measuring the over-bark diameter and subsequently the under-bark diameter after debarking (Muhairwe, 2000), or by using bark gauge (Gordon, 1983b), with an optical reading on cutting disc stem with digital calliper (Eberhardt, 2013; Wilhelmsson et al., 2002), or by CT scanning stem discs and measuring bark thickness on the images (Stängle et al., 2016).

These bark measurements were used to build models describing the amount of bark along the stem. Because bark has long been considered as a by-product, most of the studies dealing with bark vertical variations were designed to transform over-bark into under-bark stem profile, for better assessment of the available wood volume. The most commonly modeled variable is the double bark thickness (Gordon, 1983b; Muhairwe, 2000; Hannrup, 2004; Van Laar, 2007). Some other authors worked with under-bark diameters (Cao and Pepper, 1986), or derived variables like square of the ratio between under-bark diameters and over-bark diameters (Gordon et al., 1999), or the ratio between bark thickness and bark thickness at breast height (Johnson and Wood, 1987), or the natural logarithm of double bark thickness (Gordon, 1983b), or the log of the ratio of double bark thickness and diameter over-bark (Gordon, 1983b; Penman, 1988), or the ratio between diameter over-bark and diameter under-bark (Courbet and Houllier, 2002).

A study was done by Muhairwe (2000) comparing these different models and a large part of them have been studied in this work as well. Therefore, inspired by the mentioned study, we seek to apply different models on data aggregated in France. Partly, we focus on the comparison of different models describing the amount of bark along the stem.

The models found in the literature have a common characteristic, which consists of calculating the bark volume using measurement of over-bark diameter profile. However, this measurement is hardly obtainable and will likely lead to the use of a stem profile instead (e.g., Tran-Ha et al. 2007). Therefore, another objective of this study is to build a new model independent of the diameter over-bark measurement. and to do this, we take as an inspiration different models developed for predicting over-bark stem profile. Indeed, in the last sixty years, this part of forestry science has been strongly developed (Gray, 1956; Czaplewski, 1989; Forslund, 1991; Rustagi and Loveless Jr, 1991; Zakrzewski, 1999; Courbet and Houllier, 2002; Wilhelmsson et al., 2002; Garber and Maguire, 2003; Zianis et al., 2005; Trincado and Burkhart, 2006; Li and Weiskittel, 2010).

In this article, we decided to work with bark surface, which seemed easier to model according to our observations within data. To our knowledge, bark surface has never been used before to analyze vertical bark variations. In the literature, the closest predicted variable

is the square of the ratio between under-bark and over-bark diameter (Gordon et al., 1999). Finally, as we will see later, calculating bark volume from bark thickness demands the use of over-bark diameter measurement. And thus, building a model predicting bark volume from bark thickness profile without using over-bark diameter is impossible. The objective of this article can be summarized in four points :

— 1) study the variation of bark area along the stem and analyze the effect of tree and environmental variables
— 2) compare the different models already available for tree species found in France
— 3) build a model be used practically by sawmill industries to predict the bark amount
— 4) Provide species-specific models for six common European tree types, which are : silver fir (*abies alba*), Norway spruce (*Picea abies*), Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*), sessile oak (*Quercus petraea*), pedunculate oak (*Quercus robur*), and European beech (*Fagus sylvatica*).

5.4 Materials and Methods

Table 5.1 summarizes the abbreviations used in this paper.

TABLE 5.1 – List of abbreviations.

Abbreviation	**Meaning**	**Unit**
A_{ob}, A_{ub}	Stem area over and under bark	m^2
AIC	Akaike Information Criterion	/
alt	Altitude	m (above see level)
PME	Propagation of measurement error	%
B_p	Bark volume proportion on stem over bark volume	%
Bp-test	Result of a Breush-Pagan test	/
B_a	Bark area at a given height	m^2
$BABH$	Bark area at at breast height	m^2
B_t	Bark thickness at a given height	m
B_v	Total bark volume	m^3
$BTBH$	Bark thickness at breast height (height of 1.30 m)	m
D_{ob}, D_{ub}	Stem diameter over and under bark at a given height	m
$D0_{ob}$, $D0_{ub}$	Stem diameter at ground level over and under bark	m
DBH	Stem diameter at breast height (over bark)	m
DBT	Double bark thickness at a given height	m
h	Height in the stem	m
H_{tot}	Total tree height	m
$RMSErel$	Relative root mean square error	%
V_{ob}, V_{ub}	Stem volume over and under bark	m^3

5.4.1 Dataset

In this article, we use the EMERGE data-set previously described in Bauer et al. (2021, unpublished). Figure 5.1 and Table 5.2 indicates the location of each tree species and their number, respectively. Moreover, bark thickness (B_t) was measured with a Swedish bark gauge along the stem at various heights, but not specifically at 1.30m. However, a linear interpolation between the two closest values accredited the estimation of B_t value at 1.30m.

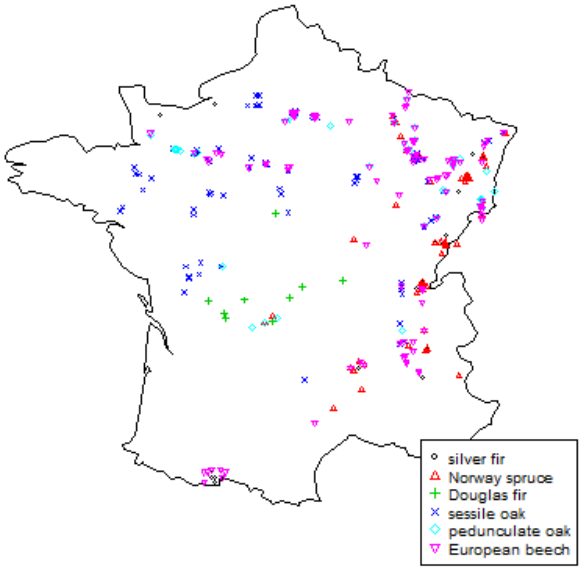


FIGURE 5.1 – Location of the sites where the EMERGE data were recorded.

TABLE 5.2 – Number of trees and measurements in the EMERGE dataset for the considered species.

Species	Number of observations	Number of trees
silver fir	15 222	658
Norway spruce	16 541	692
Douglas fir	4 618	313
sessile oak	30 193	1 445
pedunculate oak	9 628	481
European beech	26 946	1 246

5.4.2 Calculation of bark area

As we have already mentioned, the database included measurements of B_t with a bark gauge. However, the stem over-bark circumference measured with a taper, was converted into over-bark diameter (D_{ob}) assuming that the stem is circular. Furthermore, the bark area (B_a) at several heights was calculated using Equation 5.1.

$$B_a = \frac{\pi}{4}(D_{ob}^2 - (D_{ob} - 2B_t)^2) \tag{5.1}$$

5.4.3 Models of bark profiles from the literature

In this study, several models from the literature predicting either B_t, double bark thickness (DBT), or any derived variables from these measurements were used.

Equation 5.2 was proposed by several authors (Meyer, 1946; Gordon, 1983b; Li and Weiskittel, 2011). It was first proposed for *Cinchona pubescent* in Venezuela by Meyer (1946) and applied to *Picea mariana*, *Picea rubens*, *Picea glauca*, *Pinus resinosa*, *Pinus banksiana*, *Pinus strobus* in Acadian Region of North-America by Li and Weiskittel (2011). Given its simplicity, this Equation could be used for every species.

$$DBT = a \cdot D_{ob} + b \tag{5.2}$$

This model can be seen with (Li and Weiskittel, 2011) or without (Meyer, 1946; Gordon, 1983b) the b parameter. Here, we have decided to test it with the inclusion of this parameter in order to verify if it was significant or not.

Equation 5.3 was extracted from Hannrup (2004) in Stängle and Dormann (2018) and was proposed for *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden.

$$DBT = a \cdot D_{ob} + b \cdot DBH + c \tag{5.3}$$

with DBH being the diameter at breast height.

Equation 5.4 and 5.5 come from Cao and Pepper (1986). As proposed by Stängle and Dormann (2018), we changed these equation in order to predict DBT and not the diameter under bark (D_{ub}). These equations were proposed for three species (*Pinus echinata*, *Pinus taeda*, and *Pinus palustris*) in different regions of the United States.

$$DBT = D_{ob} \cdot \left(a + b \cdot \frac{h}{H_{tot}} + c \cdot \left(\frac{h}{H_{tot}} \right)^2 + d \cdot H_{tot} \right) \tag{5.4}$$

with H_{tot} the total height of the tree and h the height in the tree stem.

$$DBT = D_{ob} \cdot \left(a + b \cdot \frac{h}{H_{tot}} + c \cdot \left(\frac{h}{H_{tot}} \right)^2 + d \cdot H_{tot} + e \frac{DBH - 2 \cdot BTBH}{DBH} \right) \tag{5.5}$$

with $BTBH$ being the B_t at breast height.

Equation 5.6 was proposed by Gordon (1983b) in order to predict DBT for *Pinus radiata* in New-Zealand.

$$DBT = a + b \cdot D_{ob} + c \cdot D_{ob}^2 + d \cdot D_{ob}^3 \tag{5.6}$$

Equation 5.7 was also tested by Muhairwe (2000). This equation was initially developed to predict DBT of *Corymbia maculata* in native forests of the north coast of New South Wales.

$$DBT = a \cdot \left(\frac{D_{ob}}{DBH}\right)^b + c \cdot \left(\frac{DBH}{H_{tot}}\right)^d \tag{5.7}$$

Equation 5.8 was developed by Korsun (1955) and found in Van Laar (2007). Van Laar (2007) used it on *Pinus patula* in South Africa.

$$DBT = \frac{D_{ob}}{a + b \cdot D_{ob}} \tag{5.8}$$

Equation 5.9 is from Wilhelmsson et al. (2002) and was built for and applied on *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden.

$$ln(DBT) = a + b \cdot D_{ob} + c \cdot ln(D_{ob}) \tag{5.9}$$

Equation 5.10, as Equation 5.6, was proposed by Gordon (1983b). The same Equation was used by Penman (1988) with $f = g = 0$ for *Pinus Radiata* in Australia, New-Zealand, and California.

$$ln\left(\frac{DBT}{D_{ob}}\right) = a + b \cdot \left(1 - \frac{h}{H_{tot}}\right)^c + d \cdot \left(\frac{h}{H_{tot}}\right)^{e \cdot H_{tot}} + f \cdot DBH + g \cdot \frac{H_{tot}}{DBH} \tag{5.10}$$

Equation 5.11 was proposed by Thomas and Bennett (2014) for predicting B_t for *Liriodendron tulipifera*, *Quercus rubra*, *Quercus alba*, and *Acer saccharum* in West Virginia.

$$B_t = a + b \cdot D_{ob} + c \cdot h \tag{5.11}$$

Equation 5.12 was proposed by Johnson and Wood (1987). Parameter c was not adjusted but fixed to 4 in the mentioned study concerning *Pinus radiata* in Australia. According to Muhairwe (2000), who observed that different species have different values for the exponent, we replaced the power 4 by a variable power.

$$\frac{B_t}{BTBH} = a + b \cdot \left(\frac{D_{ob}}{DBH}\right)^c \tag{5.12}$$

Equation 5.13 was proposed by Courbet and Houllier (2002) in order to describe the variation of B_t for *Cedrus atlantica* in the South-West region of France.

$$\frac{D_{ob}}{D_{ub}} = a + \frac{b}{(H_{tot} - h)^c} \tag{5.13}$$

All these models were adjusted according to our data-set following the equations given above. They all predict B_t or DBT at a given h or D_{ob} by taking as input D_{ob} in all cases. In practice, D_{ob} is provided by one of the numerous existing stem taper models. Finally, we used the predicted values given by the model in order to calculate the corresponding values of bark area (B_a).

5.4.4 Alternative bark area profile model

In order to construct an alternative model to predict bark area variations along the stem without requiring knowledge on D_{ob}, we designed a new model (Equations 5.14 and 5.15) inspired from variable exponent taper equations (Kozak, 2004).

$$B_a = (\alpha_1 \cdot BABH + \alpha_2) \cdot X^{\beta_1 + \beta_2 \cdot X^{\beta_3}} \tag{5.14}$$

with

$$X = \frac{1 - \left(\frac{h}{H_{tot}}\right)^{\gamma}}{1 - \left(\frac{h_0}{H_{tot}}\right)^{\gamma}} \tag{5.15}$$

and

$$BABH = \pi \cdot (DBH^2 - (DBH - 2BTBH)^2) \tag{5.16}$$

where h_0, $\alpha 1$, $\alpha 2$, $\beta 1$, $\beta 2$, $\beta 3$, and γ are the parameters of the model. The variable X is an alternative form of the relative height from the apex. It varies from 0 for $h = H_{tot}$ to 1 for $h = h_0$ and is > 1 for $0 < h < h_0$.

We initially tried to fix h_0 to the usual value of 1.3m, but as we will see in Section 5.5, it was not pertinent for several species.

5.4.5 Statistical methods

Modelling

All the regressions were carried out using the R software (R Core Team, 2018). The R functions nls and nlme (package (Pinheiro et al., 2019)) were used for fitting the models.

The R function nls allows us to build non-linear models with fixed effects only. It was used for all models taken from the literature.

The R function nlme allows to build mixed effect models. It was used with the Equation 5.14. This equation was tested with including random effects on some parameters depending on the species. Parameters with mixtes effects are given in part 5.5. Then the Akaike Information Criterion (AIC) and study of the range of parameters were used to remove random effects on the parameters that did not show variations between trees.

As it was shown by Bauer et al. (2021, unpublished), the species show different patterns of variation of the bark area along the stem thus the models were fitted separately for each species.

All model accuracy were quantified using root mean square error ($RMSE$) and relative root mean square error ($RMSErel$) as recommended by Mayer and Butler (1993), using Equations 5.17 and 5.18, respectively.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y - \widehat{y})^2}{n}} \tag{5.17}$$

$$RMSErel = \frac{RMSE}{\bar{y}} \tag{5.18}$$

where y is the measured value, $\widehat{y}$ the fitted value, $\bar{y}$ the mean of observed values, and n the number of observations.

For each model, the R^2 coefficient was obtained by fitting a linear regression between observed and fitted values, as recommended by Piñeiro et al. (2008). This R^2 was used for characterizing the quality of this modeling.

Cross-validation

The three best models found (see Section 5.5) were validated through a cross-validation method as follows : The data were separated according to their forest geographic origin. Then these parts were split randomly in 10 groups. Each group was used as a validation set, the remaining observations being used as a training set. A fitted value was thus obtained from a validation set for each measure made. These two data-sets, validation and training, were used to calculate $RMSE$ and $RMSErel$.

The data splitting, calibration, and validation procedures were performed three times. Three values of the indicators $RMSE$, $RMSErel$ and R^2 were so obtained. At last, these three values were used to calculate the mean equivalent. We also calculated the AIC for each model, from an adjustment made on all data.

5.4.6 Propagation of measurement error : PME

According to the analysis done by Stängle et al. (2016), measuring bark thickness using a Swedish bark gauge is subject to an error. This measurement error was identified for Norway Spruce species in the same analysis as an overestimation of the bark thickness by $13.6\% \pm 28.4\%$ (mean ± standard deviation) relative to its true value. The relevance of this systematic error calls for considering it within the fitted models. To this end, we use a "toy" Monte Carlo method based approach. Its design is based on the rationale found in different references (Rocha and Nogueira, 2012; Clarkson, 2014; Mahmoud and Hegazy, 2017). The method can be summarized as follow :

— Define a bound for each measurement we have of the bark thickness, based on the identified measurement error
— Take random values of errors (according to a Gaussian generation) at each measurement we have of the bark thickness within the defined bounds
— Fit the model according to these random values. Repeat for a sufficient number of times (> 1000), where at each simulation we get different values for the regression parameters, and eventually determine their mean and error
— Use the formula (Equation 5.19) of error propagation (Ku, 1966) to calculate the

propagation from each regression parameter onto the model.

$$E_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 s_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 s_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 s_z^2 + \cdots} \tag{5.19}$$

where f is a function, which in our case, represent the models we are interested in.

5.5 Results

In this part, we will focus on the analysis of the results predicting B_a. Notably, for the models that do not predict B_a directly (Equations 5.2 to 5.13), we use Equation 5.1 to ultimately determine it. Original issues for the literature models are presented in the Appendix. Tables 5.3 through 5.8 present results obtained when predicting B_a with all models (issues from the literature and alternative model) for the six studied species.

TABLE 5.3 – Comparison of models for silver fir, RMSE is m^2.

Species	predicted value	Used values	Modelling	R^2	RMSE	RMSErel (%)	AIC
silver fir	B_a	D_{ob}	Equation 5.2	0.85	0.004239	41.7	/
silver fir	B_a	D_{ob}, DBH	Equation 5.3	0.85	0.004224	41.5	/
silver fir	B_a	D_{ob}, h, H_{tot}	Equation 5.4	0.87	0.003786	37.3	/
silver fir	B_a	$D_{ob}, h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.5	0.95	0.002438	24	/
silver fir	B_a	D_{ob}	Equation 5.6	0.85	0.004026	39.6	/
silver fir	B_a	D_{ob}, DBH, H_{tot}	Equation 5.7	0.85	0.004345	46.2	/
silver fir	B_a	D_{ob}	Equation 5.8	0.86	0.004018	39.5	/
silver fir	B_a	D_{ob}	Equation 5.9	0.84	0.004252	43.8	/
silver fir	B_a	h, H_{tot}, DBH, D_{ob}	Equation 5.10	0.86	0.003964	40.2	/
silver fir	B_a	D_{ob}, h	Equation 5.11	0.85	0.004235	41.7	/
silver fir	B_a	$D_{ob}, DBH, BTBH$	Equation 5.12	0.95	0.002474	25	/
silver fir	B_a	h, H_{tot}, D_{ob}	Equation 5.13	0.87	0.003842	38.3	/
silver fir	B_a	$h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.14	0.93	0.00274	27.1	/

In table 5.3, it can be seen that most of the models are quite similar in term of RMSErel (around 40%) and R^2 (around 0.85). However, the three best models found are the ones following Equations 5.5, 5.12, and 5.14 with a RMSErel of 24%, 25%, and 27.1%, respectively.

Result for Norway spruce presented in Table 5.4 are a bit better than results for silver fir. RMSErel and R^2 for the models are approximately around 35% and 0.9, respectively. Nevertheless, the best models are also the ones following Equations 5.5, 5.12, and 5.14 with a RMSErel of, respectively, 25.2%, 24.7%, and 29.5%.

Table 5.5 shows more contrasted results between models. In particular, there are 9 equations with ranging values for RMSErel between 30% and 37%. Yet, the best models are following Equations 5.5, 5.12, and 5.14 with a R^2 of, respectively, 0.96, 0.95, and 0.95 and a RMSErel of, respectively, 20.7%, 24.7%, and 25.1%.

Results for European beech are presented in Table 5.6. Most of the models allow a prediction of B_a with 45-47% of error. Additionally, the three best models are those following Equations 5.5, 5.12, and 5.14 possessing an accuracy of 29.9%, 29.8%, and 35.4%, respectively.

TABLE 5.4 – Comparison of models for Norway spruce, RMSE is in m^2.

Species	predicted value	Used values	Modelling	R^2	RMSE	RMSErel (%)	AIC
Norway spruce	B_a	D_{ob}	Equation 5.2	0.89	0.002523	35.1	/
Norway spruce	B_a	D_{ob}, DBH	Equation 5.3	0.89	0.002505	34.8	/
Norway spruce	B_a	D_{ob}, h, H_{tot}	Equation 5.4	0.89	0.002498	34.7	/
Norway spruce	B_a	$D_{ob}, h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.5	0.94	0.001808	25.2	/
Norway spruce	B_a	D_{ob}	Equation 5.6	0.89	0.002481	34.5	/
Norway spruce	B_a	D_{ob}, DBH, H_{tot}	Equation 5.7	0.86	0.003117	46.6	/
Norway spruce	B_a	D_{ob}	Equation 5.8	0.89	0.002514	35	/
Norway spruce	B_a	D_{ob}	Equation 5.9	0.89	0.002542	36.7	/
Norway spruce	B_a	h, H_{tot}, DBH, D_{ob}	Equation 5.10	0.9	0.002482	35.3	/
Norway spruce	B_a	D_{ob}, h	Equation 5.11	0.89	0.002525	35.1	/
Norway spruce	B_a	$D_{ob}, DBH, BTBH$	Equation 5.12	0.95	0.001772	24.7	/
Norway spruce	B_a	h, H_{tot}, D_{ob}	Equation 5.13	0.9	0.002484	35.1	/
Norway spruce	B_a	$h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.14	0.93	0.002118	29.5	/

TABLE 5.5 – Comparison of models for Douglas fir, RMSE is in m^2.

Species	predicted value	Used values	Modelling	R^2	RMSE	RMSErel (%)	AIC
Douglas fir	B_a	D_{ob}	Equation 5.2	0.89	0.002907	35.3	/
Douglas fir	B_a	D_{ob}, DBH	Equation 5.3	0.9	0.002813	34.2	/
Douglas fir	B_a	D_{ob}, h, H_{tot}	Equation 5.4	0.91	0.00268	32.6	/
Douglas fir	B_a	$D_{ob}, h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.5	0.96	0.001699	20.7	/
Douglas fir	B_a	D_{ob}	Equation 5.6	0.89	0.002897	35.2	/
Douglas fir	B_a	D_{ob}, DBH, H_{tot}	Equation 5.7	0.84	0.003944	51.2	/
Douglas fir	B_a	D_{ob}	Equation 5.8	0.89	0.002918	35.5	/
Douglas fir	B_a	D_{ob}	Equation 5.9	0.86	0.003356	42.1	/
Douglas fir	B_a	h, H_{tot}, DBH, D_{ob}	Equation 5.10	0.92	0.002584	32.7	/
Douglas fir	B_a	D_{ob}, h	Equation 5.11	0.9	0.00281	34.1	/
Douglas fir	B_a	$D_{ob}, DBH, BTBH$	Equation 5.12	0.95	0.002087	24.7	/
Douglas fir	B_a	h, H_{tot}, D_{ob}	Equation 5.13	0.89	0.002961	36.4	/
Douglas fir	B_a	$h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.14	0.95	0.002059	25.1	/

TABLE 5.6 – Comparison of models for European beech, RMSE is in m^2.

Species	predicted value	Used values	Modelling	R^2	RMSE	RMSErel (%)	AIC
European beech	B_a	D_{ob}	Equation 5.2	0.85	0.001866	45.5	/
European beech	B_a	D_{ob}, DBH	Equation 5.3	0.85	0.001866	45.5	/
European beech	B_a	D_{ob}, h, H_{tot}	Equation 5.4	0.84	0.001963	47.9	/
European beech	B_a	$D_{ob}, h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.5	0.94	0.001223	29.9	/
European beech	B_a	D_{ob}	Equation 5.6	0.85	0.001863	45.5	/
European beech	B_a	D_{ob}, DBH, H_{tot}	Equation 5.7	0.82	0.002165	56.2	/
European beech	B_a	D_{ob}	Equation 5.8	0.84	0.001933	47.3	/
European beech	B_a	D_{ob}	Equation 5.9	0.85	0.001883	48.6	/
European beech	B_a	h, H_{tot}, DBH, D_{ob}	Equation 5.10	0.84	0.001905	47.2	/
European beech	B_a	D_{ob}, h	Equation 5.11	0.85	0.001862	45.4	/
European beech	B_a	$D_{ob}, DBH, BTBH$	Equation 5.12	0.94	0.001225	29.8	/
European beech	B_a	h, H_{tot}, D_{ob}	Equation 5.13	0.83	0.002057	47.1	/
European beech	B_a	$h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.14	0.91	0.001449	35.4	/

Results for sessile oak are in Table 5.7. Most of the models have a R^2 of 0.88 and a RMSErel of 37%. However, the best ones are following Equations 5.5, 5.12, and 5.14 with respectively a R^2 of 0.92, 0.91, and 0.90 and a RMSErel of 30.1%, 30.5%, and 33.5%.

TABLE 5.7 – Comparison of models for sessile oak, RMSE is in m^2.

Species	predicted value	Used values	Modelling	R^2	RMSE	RMSErel (%)	AIC
sessile oak	B_a	D_{ob}	Equation 5.2	0.87	0.003453	37.2	/
sessile oak	B_a	D_{ob}, DBH	Equation 5.3	0.87	0.003455	37.3	/
sessile oak	B_a	D_{ob}, h, H_{tot}	Equation 5.4	0.87	0.003661	39.5	/
sessile oak	B_a	$D_{ob}, h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.5	0.92	0.002792	30.1	/
sessile oak	B_a	D_{ob}	Equation 5.6	0.88	0.003261	35.2	/
sessile oak	B_a	D_{ob}, DBH, H_{tot}	Equation 5.7	0.86	0.003725	42.3	/
sessile oak	B_a	D_{ob}	Equation 5.8	0.88	0.003296	35.6	/
sessile oak	B_a	D_{ob}	Equation 5.9	0.88	0.003351	37.5	/
sessile oak	B_a	h, H_{tot}, DBH, D_{ob}	Equation 5.10	0.87	0.003552	38.3	/
sessile oak	B_a	D_{ob}, h	Equation 5.11	0.87	0.003468	37.4	/
sessile oak	B_a	$D_{ob}, DBH, BTBH$	Equation 5.12	0.91	0.002811	30.5	/
sessile oak	B_a	h, H_{tot}, D_{ob}	Equation 5.13	0.87	0.003765	38.6	/
sessile oak	B_a	$h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.14	0.9	0.003096	33.5	/

TABLE 5.8 – Comparison of models for pedunculate oak, RMSE is in m^2.

Species	predicted value	Used values	Modelling	R^2	RMSE	RMSErel (%)	AIC
Pedunculate oak	B_a	D_{ob}	Equation 5.2	0.87	0.003661	43.2	/
Pedunculate oak	B_a	D_{ob}, DBH	Equation 5.3	0.88	0.003629	42.8	/
Pedunculate oak	B_a	D_{ob}, h, H_{tot}	Equation 5.4	0.87	0.003705	43.7	/
Pedunculate oak	B_a	$D_{ob}, h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.5	0.93	0.002755	32.6	/
Pedunculate oak	B_a	D_{ob}	Equation 5.6	0.88	0.003578	42.2	/
Pedunculate oak	B_a	D_{ob}, DBH, H_{tot}	Equation 5.7	0.83	0.004387	55.2	/
Pedunculate oak	B_a	D_{ob}	Equation 5.8	0.88	0.003589	42.4	/
Pedunculate oak	B_a	D_{ob}	Equation 5.9	0.87	0.00365	45.5	/
Pedunculate oak	B_a	h, H_{tot}, DBH, D_{ob}	Equation 5.10	0.87	0.00368	43.8	/
Pedunculate oak	B_a	D_{ob}, h	Equation 5.11	0.87	0.003661	43.2	/
Pedunculate oak	B_a	$D_{ob}, DBH, BTBH$	Equation 5.12	0.92	0.00292	34.7	/
Pedunculate oak	B_a	h, H_{tot}, D_{ob}	Equation 5.13	0.87	0.003867	43.1	/
Pedunculate oak	B_a	$h, H_{tot}, BTBH, DBH$	Equation 5.14	0.9	0.003242	38.4	/

For pedunculate oak, the best models are the ones following Equation 5.5, Equation 5.12, and 5.14 with respectively a R^2 of 0.93, 0.92, and 0.90 and a RMSErel of 32.6%, 34.7%, and 38.4%.

TABLE 5.9 – Result of cross-validation of model following Equation 5.14 for silver fir, Norway spruce, Douglas fir, sessile oak, pedunculate oak and European beech. The statistical significance is indicated by : NS : $p \geq 0.1$, . : $p < 0.1$, * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$. R^2 is the correlation coefficient between observed and predicted values. RMSErel is calculated between observed and predicted values and divided by the predicted value. AIC is directly calculated from the model. PME corresponds to the propagated measurement error reflected on the model (see section 5.4.6). Numbers in italic were not calculate by the model but fixed to allow a better calculation.

Model	Species	h0	alpha1	alpha2	beta1	beta2	beta3	gamma	R^2	RMSE	RMSErel	AIC	PME
Equation 5.14	**silver fir**	*0.4*	1.106 ***	0.0003263 ***	1.048 ***	3.166 ***	6.794 ***	*1*	0.93	0.0027369	27.02	-136435	/
Equation 5.14	**Norway spruce**	*0.4*	1.076 ***	0.001081 ***	1.118 ***	2.006 ***	5.027 ***	0.815 ***	0.93	0.0020482	28.54	-157846	23.54
Equation 5.14	**Douglas fir**	*1.3*	0.9663***	0.0009305 ***	2.025 ***	1.869 ***	3.833 ***	*1*	0.95	0.0019060	23.26	-44721	/
Equation 5.14	**sessile oak**	0.2452 ***	1.166 ***	0.0006825 ***	1.668 ***	6.222 ***	11.8 ***	1.167 ***	0.9	0.0030685	33.19	-263723	/
Equation 5.14	**pedunculate oak**	0.8429 ***	1.043 ***	0.0008159 ***	1.925 ***	4.715 ***	14.82 ***	1.308 ***	0.9	0.0031942	37.84	-83311	/
Equation 5.14	**European beech**	*0.1365*	*1.1576*	*0.0009019*	1.537 ***	3.437 ***	7.464 ***	*0.9297*	0.92	0.0013680	33.46	-278908	/

TABLE 5.10 – Result of cross-validation of model following Equation 5.12 for silver fir, Norway spruce, Douglas fir, sessile oak, pedunculate oak and European beech. The statistical significance is indicated by : NS : $p \geq 0.1$, . : $p < 0.1$, * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$. R^2 is the correlation coefficient between observed and predicted values. RMSErel is calculated between observed and predicted values and divided by the predicted value. AIC is directly calculated from the model. PME corresponds to the propagated measurement error reflected on the model (see section 5.4.6).

Model	Species	a	b	c	R^2	RMSE	RMSErel	AIC	PME
Equation 5.12	**silver fir**	-3.205 .	4.166 *	0.08771 *	0.95	0.0023914	23.61	-140548	/
Equation 5.12	**Norway spruce**	-0.07677	1.02 ***	0.5263 ***	0.95	0.0017681	24.65	-162715	34.8
Equation 5.12	**Douglas fir**	-0.1838 ***	1.11 ***	1.025 ***	0.95	0.0019436	23.71	-44534	/
Equation 5.12	**sessile oak**	-0.1592 **	1.098 ***	0.4899 ***	0.91	0.0027951	30.24	-269367	/
Equation 5.12	**pedonculate oak**	-0.1978 *	1.152 ***	0.5258 ***	0.92	0.0029056	34.44	-85142	/
Equation 5.12	**European beech**	0.1512 ***	0.7868 ***	0.8571 ***	0.94	0.0012195	29.81	-285094	/

TABLE 5.11 – Result of cross-validation of model following Equation 5.5 for silver fir, Norway spruce, Douglas fir, sessile oak, pedunculate oak and European beech. The statistical significance is indicated by : NS : $p \geq 0.1$, . : $p < 0.1$, * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$. R^2 is the correlation coefficient between observed and predicted values. RMSErel is calculated between observed and predicted values and divided by the predicted value. AIC is directly calculated from the model. PME corresponds to the propagated measurement error reflected on the model (see section 5.4.6).

Model	Species	a	b	c	d	e	R^2	RMSE	RMSErel	AIC	PME
Equation 5.5	**silver fir**	0.9034 ***	0.001676	0.05183 ***	0.0001447 ***	-0.9045 ***	0.82	0.0046519	24.59	-120287	/
Equation 5.5	**Norway spruce**	0.7528 ***	-0.01072 ***	0.05835 ***	-0.000122 ***	-0.7375 ***	0.77	0.00385497	26.27	-136927	32.00
Equation 5.5	**Douglas fir**	0.7743 ***	-0.1174 ***	0.1097 ***	-0.0004842 ***	-0.7277 ***	0.88	0.00437083	21.48	-37059	/
Equation 5.5	**sessile oak**	0.6803 ***	-0.01157 ***	0.07008 ***	0.0002312 ***	-0.6665 ***	0.72	0.0053935	27.8	-229672	/
Equation 5.5	**pedunculate oak**	0.6994 ***	0.0009659	0.03901 ***	0.0002533 ***	-0.6883 ***	0.78	0.00514297	30.04	-74145	/
Equation 5.5	**European beech**	0.7829 ***	-0.01593 ***	0.04652 ***	$-1.637 \cdot {}^{1}0 - 05.$	-0.7753 ***	0.77	0.00242907	27.2	-247961	/

Table 5.9 to Table 5.11 shows the results given by cross-validation on the three models found best for every species. For silver fir and Norway spruce, model following Equation 5.12 are better than the two others models in term of R^2, RMSErel and AIC. For the four others species, model following Equation 5.5 is the better in term of RMSErel. However, in term of R^2 and AIC it is worst than others models and model following Equation 5.12 is the better except for Douglas fir where model following Equation 5.14 is better. In terms of propagated measurement error in the case of Norway spruce species (section 5.4.6), Equation 5.14 shows the lowest value (23.54%).

Table 5.12 shows the comparison between total bark volume predicted with the models (Equations 5.14, 5.5, and 5.12) and the measured bark volume. Moreover, the model following Equation 5.12 is better in terms of RMSErel and R^2 except for sessile oak species where the model of Equation 5.5 is slightly better in term of RMSErel. It can also be noticed that the accuracy of whole bark volume predicited with the model is greater than the accuracy of the bark area predicted at each height. It can be seen for every species. For sessile oak, we observed, although models' accuracy was different before the cross-validation technique, the calculation of the bark volume seem to have made the difference disappear (i.e., the close

TABLE 5.12 – Comparison between total bark volume predicted with model following Equation 5.5, 5.12 and 5.14 and measured bark volume

Model	**species**	R^2	RMSE	RMSErel
Equation 5.5	**silver fir**	0.97	0.04719	21
	Norway spruce	0.96	0.03292	20.1
	Douglas fir	0.96	0.0251	17.4
	sessile oak	0.93	0.04084	22.4
	pedonculate oak	0.93	0.04047	25.5
	European beech	0.96	0.01742	20.9
Equation 5.12	**silver fir**	0.97	0.05063	22.5
	Norway spruce	0.96	0.03416	20.8
	Douglas fir	0.96	0.02577	17.9
	sessile oak	0.92	0.04392	24.1
	pedonculate oak	0.92	0.04426	27.9
	European beech	0.95	0.01802	21.6
Equation 5.14	**silver fir**	0.95	0.05312	23.6
	Norway spruce	0.95	0.03929	24
	Douglas fir	0.95	0.0271	18.8
	sessile oak	0.91	0.04382	24
	pedonculate oak	0.91	0.04725	29.7
	European beech	0.94	0.02001	24

values for RMSErel ; 24%, 24.1%, and 24.1%).

TABLE 5.13 – Results of modeling with mixed effect for model following Equation 5.14. For each parameter, minimum and maximum of the values are given. fixed : parameters where none mixed effect where applied. R^2 is the correlation coefficient between observed and predicted values. RMSErel is calculated between observed and predicted values and divided by the predicted value. AIC is directly calculated from the model.

Species	H_0	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	γ	$\beta 11$	$\beta 12$	R^2	$RMSE$	$RMSErel$	AIC
$silverfir$	fixed	0.88 - 1.41	0.000459 - 0.000459	fixed	-2.77 - 19.5	0.566 - 22.9	0.276 - 2.95	/	/	0.98	0.001326	13.1	-151879.7
$Norwayspruce$	fixed	0.91 - 1.37	fixed	0.377 - 2.37	-1.7 - 10.6	0.575 - 21	0.542 - 1.8	/	/	0.99	0.0008134	11.3	-180680.3
$Douglasfir$	fixed	fixed	fixed	$\beta 11 \cdot BTBH + \beta 12$	-1.46 - 8.19	-0.336 - 13.5	0.24 - 1.67	21.6 - 100	0.55 - 0.55	0.99	0.0006314	7.7	-51627
$sessileoak$	fixed	0.778 - 1.96	0.000281 - 0.000281	0.613 - 4.89	-20 - 31.5	fixed	0.127 - 3.07	/	/	0.97	0.001559	16.9	-288987.6
$pedunculateoak$	fixed	fixed	-0.0022 - 0.00619	0.623 - 2.75	-7.5 - 18.4	-2.24 - 37.4	0.505 - 2.43	/	/	0.98	0.001386	16.4	-94139.3
$Europeanbeech$	fixed	0.891 - 1.68	fixed	fixed	-3.75 - 22.8	fixed	0.255 - 2.26	/	/	0.98	0.0007364	18	-301243.1

Table 5.13 shows results for mixed effect model following Equation 5.14. For Douglas fir, we observed a relationship between $\beta 1$ and $BTBH$ which has been reflected in this mixed effect model with the addition of two new parameters, $\beta 11$ and $\beta 12$. It should be noticed that thanks to the mixed effects, model following Equation 5.14 achieve an almost perfect accuracy, especially for Douglas fir with a RMSErel $< 10\%$. No relation with others tree variables (such as latitude, longitude, altitude, H_{tot}) were found.

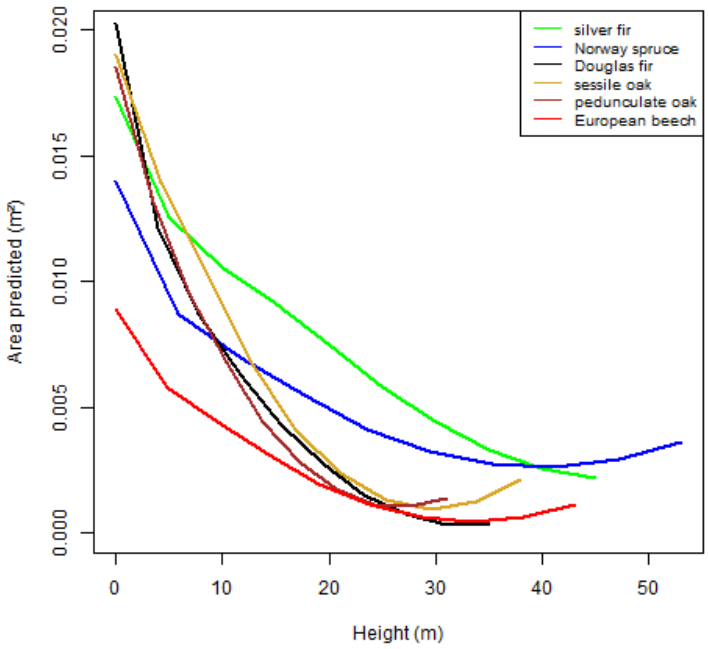


FIGURE 5.2 – Trend of model following Equation 5.14 for silver fir, Norway spruce, Douglas fir, sessile oak, pedunculate oak and European beech.

Figure 5.2 shows for all species studied the trend of the model following Equation 5.14.

5.6 Discussion

With this work, several models coming either from the literature or newly developed were compared. Most of the literature models seem, for the same species, to have similar accuracy. However, the models giving the best notable results are the ones following equations 5.12, 5.5, and 5.14. On the contrary, the worst model found by our study is the one following Equation 5.7.

5.6.1 Effect of measurement accuracy : Norway spruce case

In using a Swedish bark gauge, which has a high degree of inaccuracy (Stängle et al., 2016; Althen, 1964), it is noteworthy to identify the different sources of errors that are propagated onto our targeted models. To achieve this, we have used a method based on a Monte Carlo technique (see section 5.4.6). At this stage, it is notable to mention that the amount of error propagated onto the model does not speak for the goodness of the model, but rather determines its accuracy and prediction power. Determining whether the model is good or not would require an instrumental variable method in the case of non-linear models (Pearl, 2009), or a dedicated Monte Carlo simulations with pseudo-data and a detailed study of the bias and variance that could be generated on model parameters ; this is outside the scope of this paper. In this article, we have applied this method on three selected models (equations 5.12, 5.5, and 5.14).

On one hand, for the models that predicts either DBT or B_T (equations 5.12 and 5.5), the error propagation into equation 5.1 is found to be around 32-35%. This can be explained by the idea that the $BTBH$ is further needed in the design of the models, which further induces an added error for the models. On the other hand, the model that is based on equation 5.14, which predicts B_a directly and without any B_T measurement, generates relatively smaller error (23.54%) than that of the previous models. It is expected that a better measurement technique can induce a higher inherent model accuracy.

5.6.2 The three best models

A comparison between models following Equations 5.12, 5.5 and 5.14 will show strengths and weaknesses of those models.

Models following Equations 5.12 and 5.5 are better than that of Equation 5.14 in terms of R^2 and RMSErel for every species. Moreover these models have less parameters than model following Equation 5.14 (6 parameters against 3 and 5, respectively). From an analytical view, the model following Equation 5.12 only needs three variables to predict bark area, D_{ob}, DBH, and $BTBH$; while model presented by Equation 5.14 needs four h, H_{tot}, DBH, and $BTBH$ and model following Equation 5.5 needs five D_{ob}, h, H_{tot}, DBH, and $BTBH$. Two of these inputs are common to the three models ($BTBH$,DBH). Moreover, the model presented by Equation 5.14 needs h and H_{tot} and model following Equation 5.12 needs only D_{ob}, while the model given by Equation 5.5 need these three variables as inputs. Particularly, model given by Equations 5.12 and 5.5 needs a measurement of D_{ob}, while 5.14 does not.

Most of the time, as D_{ob} is a difficult measure to obtain all along the stem, stem profile model will be used. And as a result, the global accuracy of models following Equations 5.12 and 5.5 will decrease and as these models are not very different from the model given by Equation 5.14, they may probably become less appealing.

Meyer (1946); Persson and Downie (1992); Laasasenaho et al. (2005) observed a strong relationship between D_{ob} and B_t. Therefore, it should be pointed out that the model given by Equation 5.14 achieve an accuracy without the D_{ob} variable compared to models where such a variable is needed.

The H_0 parameter of the model presented by Equation 5.14 gives interesting insights about representative points for every species. In the model, H_0 represented the height in the tree were X=1. So for $h < H_0$, $X < 1$ which made the term $X^{\beta_1+\beta_2*X^{\beta_3}} > 1$ giving an hyperbolic form of the evolution of B_a. At the opposite, with $h > H_0$, the evolution of B_a will be parabolic. Thus, for characterising B_a the measure at H_0 is more legitimate to be consider as the base of B_a evolution. This point of inflexion differ between each species. Its value is of 0.4 for Norway spruce, 0.44 for silver fir, 0.2 for sessile oak, 0.84 for pedunculate oak and 1.3 for Douglas fir. Douglas fir is so the only species with the commonly use 1.3m measurement as an inflexion point. For the other species, it can be wondering if taking DBH and $BTBH$ at H_0 height would improve accuracy of the model.

As we mentioned before, comparing the different models allows us to see several observations. The three best models, models given by Equations 5.12, 5.5, and 5.14 have a common characteristic. All of them needs $BTBH$ to predict B_a. For all species, except sessile oak and pedunculate oak, there is a huge discrepancy between the three chosen models and the others found in the literature. As analyzed by Bauer et al., (2021 ; unpublished), $BTBH$ seems to provide a lot of information on bark quantities. $BTBH$ can be predicted, but to achieve a good accuracy, measuring it seems to be required. For sessile oak and pedunculate oak, $BTBH$ seems less important in order to achieve a better accuracy. Particularly, for those species, there is only 2% and 4%, respectively, of difference between the best and worst models that doesn't require $BTBH$.

5.6.3 Variation between the species

Among the models found in the literature, there is the ones that were build for hardwood species (Equations 5.7 and 5.11) and models build for softwood species (Equations 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.10, 5.8, 5.9, 5.12, and 5.13). Applying these equations to our studied species, hardwood and softwood does not seems to have an influence on models' accuracy. Regardless of the species, model following Equation 5.7 is always the most inadequate to our data. Nevertheless, there is less than 5% of difference in terms of RMSErel between the best model and the worst (except for the model given by Equation 5.7 and models that uses $BTBH$ as variables) for every species.

Comparison between the different species leads to several findings. The repartition of the different models in term of RMSErel. The three best models (those following Equations 5.5, 5.12, and 5.14) are the most accurate for Douglas (20-25%) than silver fir (24%-27%), Norway spruce (24.7-29.5), European beech (29.8-35.4%), sessile oak (30.1-33.5 %), and

finally pedunculate oak (32.6-38.4%). For European beech, it can be seen that models without $BTBH$ are clearly worst than models with. $BTBH$ is thus important to achieve a good accuracy for the model. this can be attributed to the thin bark of European beech. This has increased, mathematically, the relative error as the absolute accuracy does not change. And thus, can explain the importance of $BTBH$ to predict bark profile for European beech. Silver fir and Norway spruce are really similar in term of accuracy for the three best models. Interesting enough, for hardwood species, the three best model, there is barely a small difference between European beech and sessile oak. Finally, for pedunculate oak, the three best models shows the least valuable results when applied to our set of studied species.

5.7 Conclusion

In this work, twelve models of bark profile issue from the literature were compared. An alternate model based on variable exponent taper equations was built and compared to the models of the literature. The accuracy of these models was tested on six species : Silver fir, Norway spruce, Douglas fir, sessile oak, pedunculate oak, and European beech. Three models appears to be better than other. They have in common the use of the bark thickness at breast height variable. This variable seems so to be the most important in predicting bark profile. Secondly, the two best models also use diameter-over-bark as an input data which is also strongly like to bark thickness. These models have been fitted on a pool of data collected in France. Thus, although we applied these models to North-eastern France, they could be applied anywhere in France. Small differences between species were observed, but the split hardwood/softwood seems not to have an importance in these differences. Models build for hardwood or softwood work (or not) independently for hardwood and softwood. Finally, this model allows the prediction of bark resources according to the part of the stem considered, timber wood, industrial wood or fuel wood.

5.8 Perspectives

Le travail réalisé dans cet article peut donner lieu à plusieurs poursuites. Le modèle alternatif permet certes d'avoir la répartition de l'écorce le long de la tige sans avoir à mesurer la variation longitudinale du diamètre sur écorce, mais il reste encore en deçà des modèles utilisant le diamètre sur écorce en termes de précision. De plus ce modèle utilise aussi $EE130$ qui n'est pas souvent mesuré et donc, en application, ce modèle sera moins précis que ce qui est présenté dans l'article. Il aurait été utile de mesurer la perte de précision due à un $EE130$ modélisé plutôt que mesuré. De façon plus générale, ces modèles peuvent aussi être calibrés sur d'autres essences importantes de la ressource française comme le pin maritime ou le pin sylvestre.

Chapitre 6

Résultats non publiés

A travers le travail qui a été réalisé pendant cette thèse, un certain nombre de résultats n'ont pas encore pu être publiés. Ils vont être présentés dans cette partie.

6.1 Comparaison des protocoles de détourage de nœuds

Comme nous l'avons vu dans la partie Méthodologie, le début de la thèse a été consacré à la mise au point d'un protocole de détourage des nœuds afin d'obtenir, à partir des images scannée, un volume de nœud que nous pourrons ensuite modéliser (Figures 3.3 et 3.5). Ainsi chaque protocole de détourage a été appliqué par trois ou quatre détoureurs sur 6 nœuds d'un épicéa. La figure 6.1 montre les volumes obtenus en fonction des détoureurs pour les trois protocoles, le premier effectué sans instructions très précises, celui utilisé avec Canny edge et celui selon la méthode dite du "point triple". Le tableau 6.1 donne pour chaque nœud détouré l'écart-type des trois résultats obtenus.

Les résultats montrent que parmi ces trois protocoles, le protocole Canny edge est clairement le meilleur alors que le protocole "Point triple" n'apporte que peu d'amélioration par rapport au premier protocole sans indications précises. On pourra toutefois noter que le protocole point triple donne parfois des meilleurs résultats que ceux de Canny edge. La stabilité des différents protocoles pourrait très certainement encore être améliorée. Si l'utilisation de ce protocole n'est que peu présente dans cette thèse du fait d'un manque de temps pour exploiter les données, il a revanche été utilisé pour l'obtention des résultats présentés dans l'article Billard et al. (2020).

6.2 Proportion de nœuds dans la tige

Les arbres scannés intégralement dans le cadre du projet Modelfor ont été utilisés afin de calculer les pourcentages de nœuds dans toute la tige. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le Tableau 6.2. Ces données ont été utilisées par Billard et al. (2020) pour estimer la biomasse totale des arbres mesurés dans Extra_For_Est. Ces résultats montrent

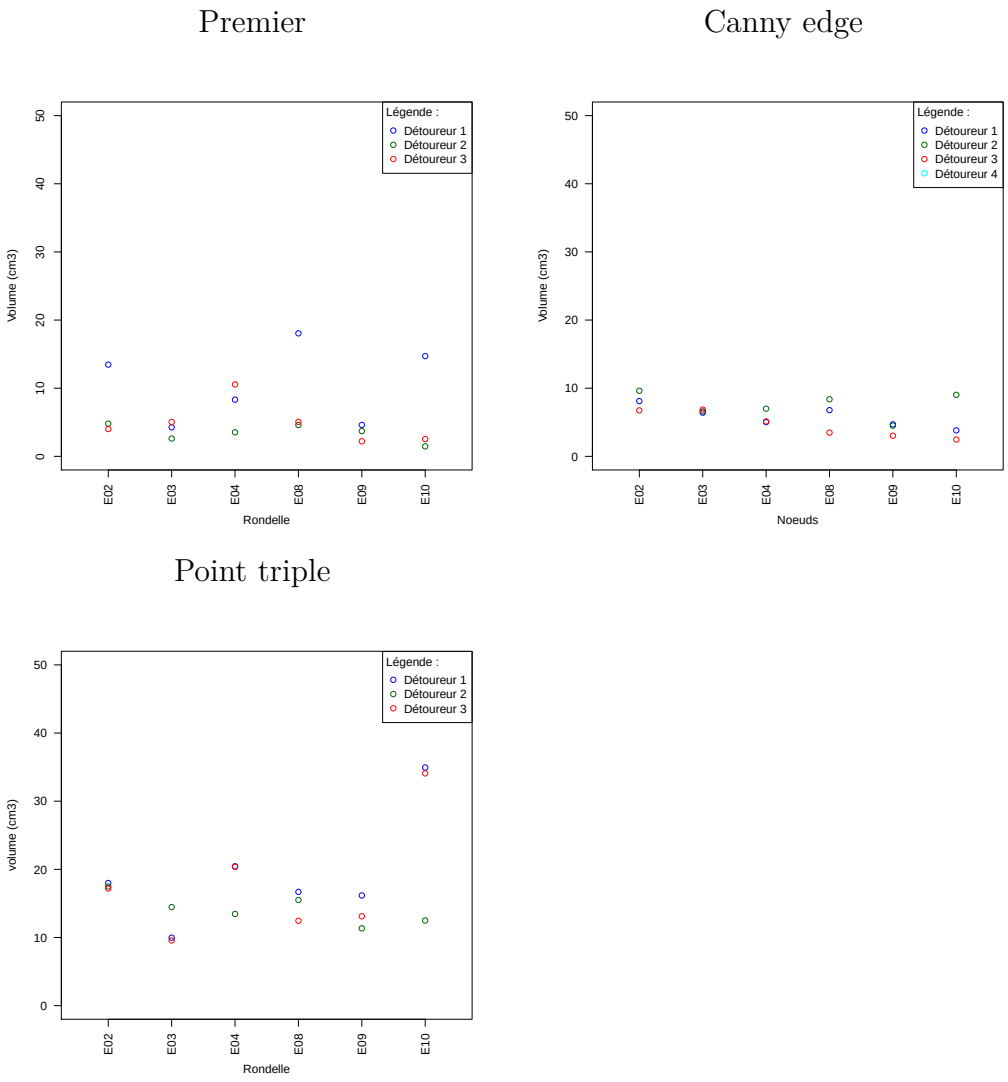


FIGURE 6.1 – Tests de différents protocoles de détourages de noeuds.

que le pourcentage varie grandement entre les deux essences, augmentant de 40% en passant du sapin au Douglas. Mais le pourcentage reste toutefois faible pour les deux essences. o

6.3 Modélisation du volume de nœuds

Les figures 6.2 et 6.3 représentent les volumes de chaque nœud et de la totalité de chaque verticille, respectivement, obtenus avec le modèle suivant l'Equation 3.32.

Le tableau 6.3 présente les résultats de la modélisation suivant l'Equation 3.32.

Pour le sapin, le modèle semble s'adapter mieux pour les nœuds indviduels que pour l'ensemble des nœuds d'un verticille, tant du point de vue du R^2 (0.66 contre 0.52) que du

TABLE 6.1 – Ecarts-type du volume des nœuds obtenus avec les trois protocoles testés

Nœuds	Méthode	écart-type (mm^3)
E02	Premier protocole	5 240
	Protocole Canny edge	1 442
	Protocole point triple	407
E03	Premier protocole	1 240
	Protocole Canny edge	225
	Protocole point triple	2 713
E04	Premier protocole	3 589
	Protocole Canny edge	1 115
	Protocole point triple	4 016
E08	Premier protocole	7 638
	Protocole Canny edge	2 499
	Protocole point triple	2 190
E09	Premier protocole	1 210
	Protocole Canny edge	911
	Protocole point triple	2 438
E10	Premier protocole	7 354
	Protocole Canny edge	3 465
	Protocole point triple	12 720
Moyenne	Premier protocole	4 380
	Protocole Canny edge	1 437
	Protocole point triple	4 081

TABLE 6.2 – Pourcentage en volume de nœuds dans la tige obtenus pour le sapin et le Douglas.

Essence	Nombre d'arbres scannés	Pourcentage de nœuds moyen (%)
Sapin	11	0.924
Douglas	9	1.30

TABLE 6.3 – Résultats de la modélisation du volume d'un nœud et des nœuds d'un verticille avec le modèle suivant l'Equation 3.32.

Essence	Volume prédit	R^2	RMSE	AIC	bp-test
Sapin	Volume d'un verticille	0.52	75.6	6512	$3.29 \cdot 10^{-15}$
	Volume d'un nœud	0.66	56.7	1283	0.0047
Epicéa	Volume d'un verticille	0.66	77.2	4587	$2.47 \cdot 10^{-10}$
	Volume d'un nœud	0.49	84.9	3562	$5.22 \cdot 10^{-10}$
Douglas	Volume d'un verticille	0.59	85.1	4331	$1.52 \cdot 10^{-14}$
	Volume d'un nœud	0.42	79.4	1197	$1.12 \cdot 10^{-06}$

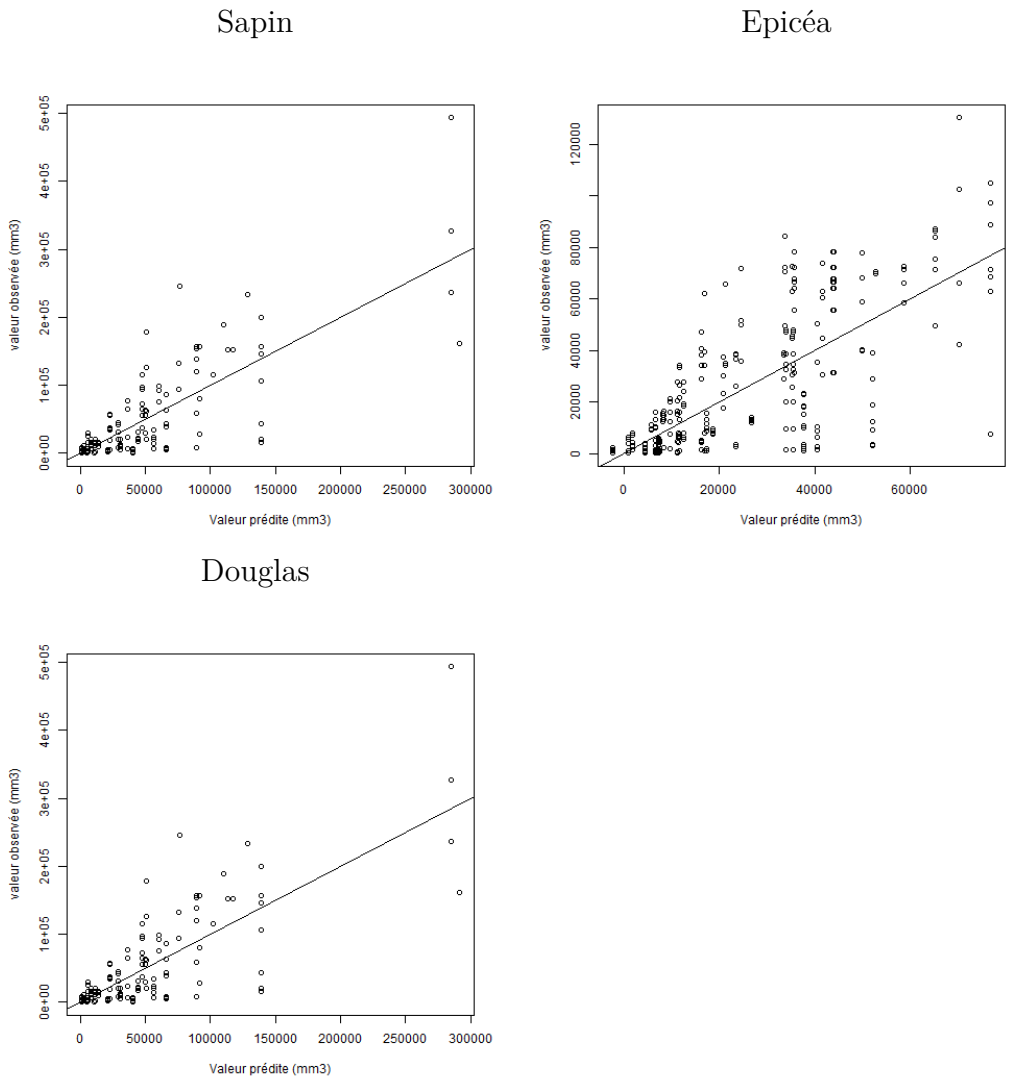


FIGURE 6.2 – Volume d'un nœud observé en fonction du volume de nœuds prédit d'après le modèle suivant l'Equation 3.32 pour le sapin, l'épicéa et le Douglas. La ligne noire représente la droite x=y.

RMSErel (56.7% contre 75.6%). Pour l'épicéa, le modèle semble au contraire mieux s'adapter pour l'ensemble des nœuds d'un verticille, (0.66 contre 0.49 pour le R^2 et 77.2% contre 84.9% pour le RMSErel). En revanche pour le Douglas, le modèle ne semble pas mieux s'adapter ni pour l'un ni l'autre. Il est meilleur en termes de R^2 pour les nœuds de verticilles (0.59 contre 0.42 pour les nœuds) et pour les nœuds individuels en termes de RMSErel (79.4 % contre 85.1 %). La précision du modèle largement supérieure à 50 % laisse encore une large possibilité d'amélioration . De plus les résultats du test de Breusch-Pagan montrent que toutes les données sont fortement hétéroscédastiques car tout les résultats sont inférieurs à

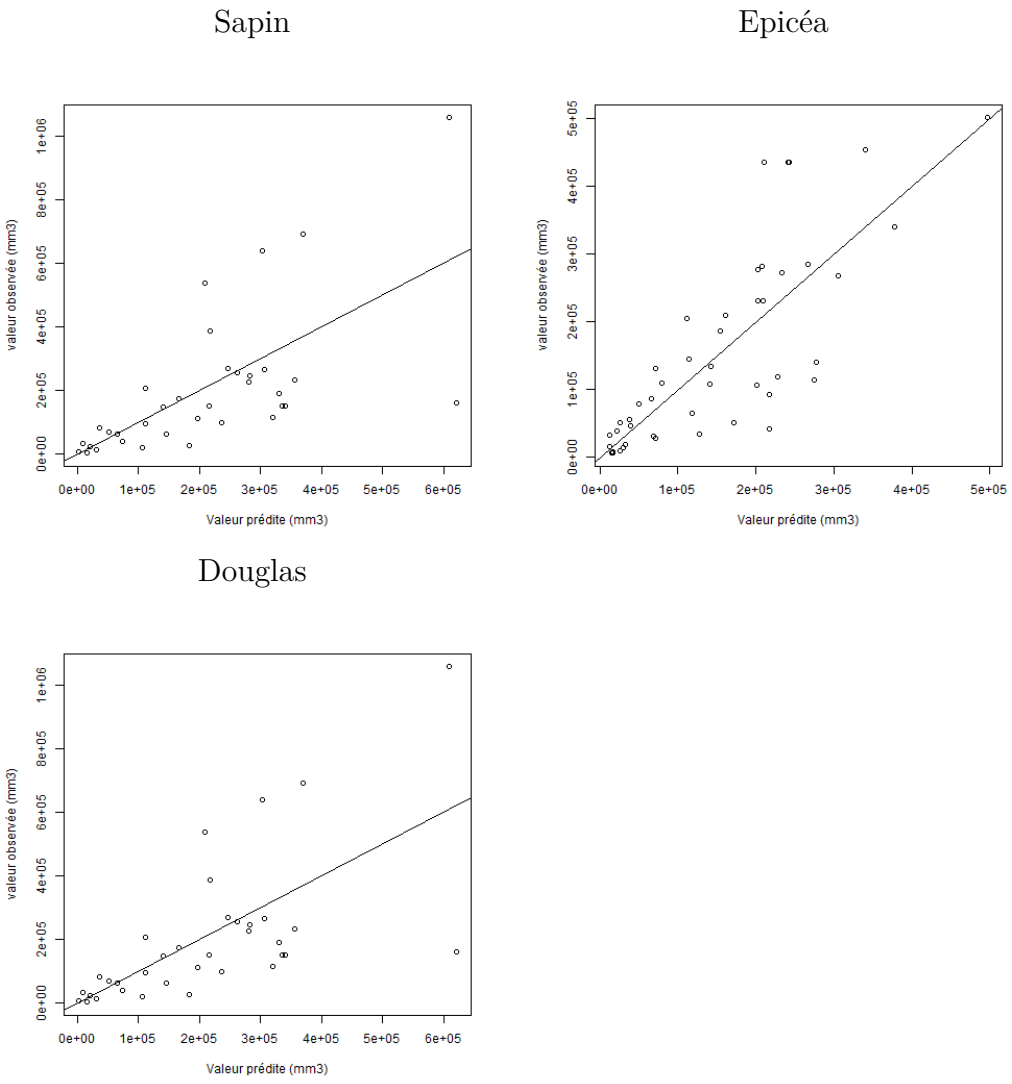


FIGURE 6.3 – Volume des nœuds d'un verticille observé en fonction du volume prédit d'après le modèle suivant l'Equation 3.32 pour le sapin, l'épicéa et le Douglas.

0.01. Ce sont donc des travaux à poursuivre et à affiner.

Chapitre 7

Discussion

Dans ce chapitre nous allons discuter des résultats non publiés que nous avons présentés dans le chapitre 6. De plus nous allons aussi proposer des améliorations au travail réalisé.

7.1 Protocoles de détourage de nœuds

Les résultats que nous avons vus montrent que le protocole utilisant Canny edge semble meilleur. Cependant, il présente un défaut par rapport à l'objectif recherché. En effet, la première utilité de ces détourages est d'obtenir les volumes de nœuds afin de calculer in fine la quantité d'extractibles présents dans l'arbre. Or d'après Willför et al. (2003) et Kebbi-Benkeder et al. (2017) les extractibles sont présents en quantité non négligeable depuis la pointe du nœud près de la moelle du tronc jusqu'au bourrelet de la branche et ce n'est qu'à partir de cet endroit là que leur concentration commence à décroître. Ainsi, il est plus intéressant pour nous de prendre en compte l'intégralité du nœud depuis la moelle jusqu'au bourrelet de la branche. De plus, cela correspond plus fidèlement à la définition du nœud que nous avions retenu en partie "Etat de l"art". Un point à souligner, non présent dans ces résultats, est que Canny edge ne fonctionne pas très bien pour le hêtre. C'est donc finalement la méthode "Point triple" qui a été choisi pour le détourage de tous les nœuds étudiés dans ce travail malgré ses faiblesses en termes de reproductibilité. Un point à noter tout de même est l'absence de test d'un mélange des protocoles "points triple" et canny edge. Ce que nous aurions dû faire. Il peut aussi être remarqué que cette méthode donnant des volumes bien plus grands que les précédentes, une variabilité accrue peut être attendue.

En comparant avec d'autres études qui réalisent le même travail de mesure de volume de nœuds, nous pouvons toutefois nous poser la question de la pertinence de ce protocole. Par exemple, Pinto et al. (2003) utilise un système semi-automatique de détection des nœuds. Longuetaud et al. (2012) a effectué une revue de différents procédés de mesures automatiques de nœud. Il en ressort que si ces protocoles peuvent avoir une précision variant entre 80% et 97%, la définition retenue pour le détourage manuel des nœuds n'est jamais précisée. De fait se pose la question de savoir si les nœuds mesurés automatiquement correspondent avec la partie du nœud qui nous intéresse, notamment au niveau de la concentration en extractibles.

7.2 Proportion de nœuds

Les proportions de nœuds au sein des tiges sont des données rarement mesurées dans la littérature scientifique. A partir des données présentées par Pinto et al. (2003) il est possible de faire un calcul approché du pourcentage total de nœuds dans les tiges de pin maritimes qu'ils ont analysés. Il est de 0.75%. Les pourcentages calculés pour le sapin et le Douglas dans ce travail (0.92% et 1.30% respectivement), ne semblent donc pas éloignés même si la différence interespécifiqueest à prendre en compte.

7.3 Modèles de volume de nœuds

Le modèle de volume de nœuds de la littérature que nous avons testé n'est pas du tout adapté à nos données. Cela peut-être dû à la différence entre les espèces considérées (le pin maritime pour Pinto et al. (2003) et le sapin, épicéa et Douglas pour nous). Ce point peut aussi expliquer pourquoi la comparaison des R^2 indique que nos résultats sont bien en deçà de ceux obtenus par Pinto et al. (2003). Il faut noter que le modèle polynomial de Pinto et al. (2003) n'utilise comme variable d'entrée que *hrel* qui est une donnée commune à tous les nœuds d'un même verticille. Ainsi, ce modèle va prédire la même valeur de volume pour tous les nœuds d'un même verticille. Il s'agit peut-être d'une hypothèse réaliste dans le cas du pin maritime mais dans notre cas, nous observons parfois une grande variabilité du volume des nœuds du même verticille, comme cela peut être vu dans la Figure 7.1.

C'est pourquoi le modèle suivant l'équation 3.32 a aussi été testé pour la somme des volumes de nœuds d'un verticille, sans grand succès. Cette voie peut être poursuivie en essayant de modéliser un volume moyen de nœuds. Fredriksson (2012) a montré qu'il existe une relation linéaire entre le nombre de nœuds d'un verticille et le rapport entre le volume du plus gros nœud et le volume moyen du verticille chez le pin sylvestre. Il précise aussi que cette relation existe également pour les nœuds de deuxième ou de troisième rang. Si cette relation pouvait être vérifiée pour nos essences, elle pourrait donc permettre de prédire le volume de nœuds d'un verticille à partir du volume du nœud le plus gros. Ce qui pourrait se combiner avec le diamètre maximum prédit par Moberg (2000) et simplifier la modélisation. Ceci est à étudier.

De nombreuses pistes d'amélioration peuvent encore être explorées. Certains modèles présentés dans la littérature n'ont pas été testés (Manso et al., 2020; Duchateau et al., 2013). Un nouveau modèle pourrait être construit, notamment en se basant non pas sur le volume de nœuds mais sur le volume de nœuds d'un verticille. En effet, puisque chaque nœud est lié à une branche, il faut pour pouvoir prédire le volume de chaque nœud individuellement, des données concernant les branches en question. Prédire le volume de nœuds d'un verticille permettrait de se passer de ces informations. L'essai de la prédicition du volume d'un verticille sur le modèle de Pinto et al. (2003) a toutefois montré qu'un simple modèle polynomial basé sur H_{rel} est insuffisant pour prédire le volume des nœuds d'un verticille. D'autres variables arbre pourraient donc être introduites, comme le $D130$, HBH et très certainement la sylviculture, celle-ci influençant grandement la taille des branches et donc des nœuds.

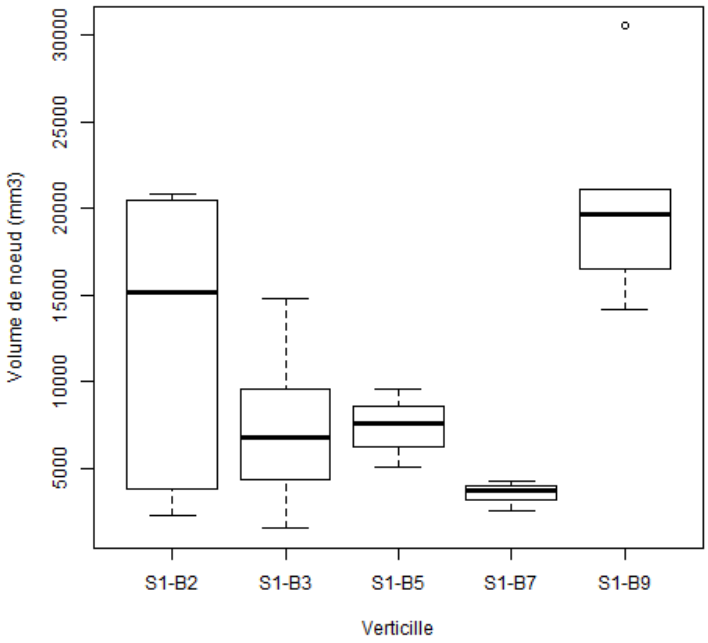


FIGURE 7.1 – Dispersion des valeurs de volumes de nœuds au sein d'un verticille pour le sapin S1. Le trait large représente la médiane, le rectangle le deuxième et le troisième quartile et les traits en pointillé le premier et dernier quartile.

7.4 Modèles d'épaisseur, de surface et de volume d'écorce

7.4.1 Précision des mesures

Une grande incertitude sur les modèles de volume d'écorce résulte de l'imprécision des mesures qui ont été utilisées. En effet, comme cela a déjà été discuté dans les deux articles présentés dans ce rapport, la jauge à écorce a une faible précision pour mesurer des épaisseurs d'écorce. Le travail effectué par Stängle et al. (2016) sur l'épicéa aurait pu être réalisé pour d'autres espèces dans le cadre de ce travail. La comparaison entre des mesures effectuées à la jauge à écorce et des mesures effectuées par détourage sur des images issues d'un scanner à rayons X aurait permis d'établir une meilleure relation entre ces deux types de mesures et donc d'obtenir des modèles plus précis. De plus, comme le travail effectué ici concerne six essences différentes, cela aurait apporté des informations qui n'existent pas encore dans la littérature scientifique pour le Sapin, le Douglas, le chêne sessile, le chêne pédonculé et le hêtre.

Un autre point peut être abordé. Althen (1964) a montré que la jauge à écorce surestime grandement l'épaisseur d'écorce. Laasasenaho et al. (2005) rapportent de plus que ces

mesures de l'épaisseur d'écorce avec une jauge à écorce (+13.6%±28.4% Stängle et al. (2016)) donnent un résultat qui varie selon le moment de l'année à laquelle la mesure est effectuée. Cependant ces travaux se sont basés sur la comparaison entre les mesures faites à la jauge à écorce et les mesures faites avec la méthode d'écorçage qui n'est pas non plus parfaite. En effet, la mesure de D_{su} et D_{ss} avec un ruban donne un résultat qui surestime l'épaisseur moyenne si l'écorce est très rugueuse. Si c'est la mesure qui convient pour convertir un D_{su} en D_{ss}, cela tend à surestimer le volume réel d'écorce disponible. En revanche, la méthode à rayons X que nous avons expérimentée n'est pas affectée par ce défaut. Il aurait donc été intéressant de pouvoir aussi comparer les mesures obtenues avec les différentes méthodes.

Concernant la variation de la mesure d'épaisseur d'écorce avec le moment de l'année, elle risque d'affecter particulièrement les données Emerge. En effet, ces données sont anciennes, datant pour certaines des années 60. Et donc une partie des informations sur les conditions de leurs obtention a été perdue, notamment la date à laquelle les mesures ont été effectuées. Une partie de la dispersion des mesures observées peut donc être due à cette variation saisonnière.

7.4.2 L'efficacité des modèles de volume d'écorce

Concernant les modélisations des quantités d'écorce que nous avons réalisées, que cela soit du volume total d'écorce sur la tige ou de la surface d'écorce, il est apparu que $EE130$ est une variable d'une grande importance. Cao and Pepper (1986) l'ont aussi observé, bien que leurs travaux portaient sur D_{ss} à 1m30, lorsqu'ils ont comparé les équations 5.4 et 5.5. Dans leur article, ils observent des différences de $RMSErel$ de l'ordre de 0.38 % à 1.78 %. La grande différence avec nos observations vient certainement du fait que nous cherchons à prédire Ep_{ec}. Comme $Ep_{ec} << D_{ss}$ la précision relative de la prédiction diminue. De plus Cao and Pepper (1986) ont utilisé la méthode d'écorçage, plus précise que la méthode utilisant la jauge à écorce, ce qui pourrait aussi expliquer la différence entre leurs observations et les nôtres.

Un autre point intéressant à relever est la comparaison des résultats de prédiction du volume d'écorce entre le premier article (Table 4.5) et le deuxième article (Table 5.12). Or, pour toutes les espèces étudiées, excepté le Douglas, nous pouvons voir que le modèle suivant l'équation 5.5 est meilleur que le modèle suivant l'équation 4.11. Le modèle suivant l'équation 5.12 est aussi bon que celui de Kozak and Yang (1981) et le modèle suivant l'équation 5.14 est le moins bon, pour toutes les essences. Un argument qui peut permettre d'expliquer cette différence est la quantité d'informations nécessaire dans les modèles de surface d'écorce. En effet, en prédisant la surface d'écorce à chaque niveau de la tige, on utilise le D_{su} à chaque niveau, ce qui augmente donc le nombre de variables d'entrée dans le modèle de volume d'écorce et de fait sa précision. Il est toutefois intéressant de constater que cette amélioration permet d'obtenir un modèle de volume d'écorce meilleur alors qu'il n'a pas été calibré pour ce calcul.

7.4.3 Les modèles de surface d'écorce

Concernant les modèles de surface d'écorce, deux points restent à discuter. Tout d'abord, ces modèles ont été obtenus initialement pour répondre à la question de volume d'écorce selon les différents classes de diamètre des arbres. Or dans l'application pratique de ces modèles, $EE130$ ne sera que rarement mesuré. Il en va de même pour la mesure des profils de tige, nécessaire pour la bonne application des modèles de surface d'écorce utilisant D_{su} comme variable d'entrée. Les modèles testés dans la partie 5 disposent de toutes ces variables d'entrée dûment mesurées. Ainsi la précision indiquée dans l'article est bien plus grande que celle qui sera observée lors de leur application. Cependant la précision des modèles lors de cette application n'a pas été mesurée. Si l'étude a montré qu'un modèle utilisant D_{su} comme variable d'entrée était meilleur qu'un modèle qui ne l'utilise pas, il convient de se poser la question si cette assertion est toujours valide lorsque D_{su} n'est plus mesuré mais estimé. Il peut tout à fait être supposé que comme d'avantage de variables seront estimées plutôt que mesurées, la précision de la prédiction de volume d'écorce diminuera plus que pour le modèle suivant l'équation 5.14. Les modèles n'étant pas si différents que cela en termes de précision, le modèle avec D_{su} peut très bien devenir moins bon que celui s'en passant. Un deuxième point à souligner est qu'il n'y a pas de comparaison faite entre la prédiction du volume de bois fort grâce à ces modèles et le volume de bois fort mesuré. Il n'est pas dit que la précision de ces modèles pour ces volumes précis soit les mêmes que pour le volume total d'écorce.

7.5 Calcul des volumes d'écorce

Quelques remarques peuvent être faites concernant le calcul du volume d'écorce sur la tige. Ainsi qu'observé par Courbet and Houllier (2002) la forme d'un tronc n'est pas conique. Elle varie le long de la tige, plutôt néiloïde au niveau de la souche, conique au niveau de l'apex et de forme paraboloïde le long du tronc entre ces deux extrêmes. Or notre méthode de calcul pour le volume d'écorce suppose celui-ci comme une suite de troncs de cône. Si cette hypothèse permet d'être le plus neutre possible, puisque supposant une variation constante entre deux points de mesure des diamètres, elle n'en diffère pas moins de l'hypothèse paraboloïde. Un point qu'il pourrait être intéressant de regarder est la description de la variation de surface d'écorce par les modèles de surface d'écorce. Dans la partie 5 nous avons considéré le volume d'écorce calculé par une succession de troncs de cône comme étant le « vrai » volume d'écorce. Une utilisation combinée des deux pourrait peut-être permettre une meilleure précision dans le calcul de ce « vrai » volume. Nous pouvons toutefois nous demander si la différence qui résultera de cette comparaison sera significative ou pas. Mais un tel travail de critique serait intéressant. Une même objection peut être émise concernant le calcul des surfaces d'écorce. En effet, l'hypothèse faite durant ce travail est que le tronc est circulaire, hypothèse nécessaire puisque nous ne disposons que d'une mesure de diamètre et d'épaisseur d'écorce par niveau dans la tige. Mais d'autres auteurs (par exemple Maguire and Hann (1989)) supposent une forme elliptique du tronc. Cela permet en effet une plus grande adaptation du calcul de la surface de tige lorsque l'on dispose de deux diamètres pris

à la même hauteur. Ce point ne peut cependant pas être étudié avec les données Emerge. En revanche les données ExtraFor_Est, bien plus précises pourraient mesurer la différence de résultat entre les deux suppositions pour nos essences. Comme cela ne peut-être reporté sur nos modèle de volume et de surface d'écorce, considérant la différence des jeux données, cela pourra toutefois donner une indication.

Chapitre 8

Conclusion générale et perspectives

8.1 Rappel des résultats

Arrivé à ce point de notre rapport, nous allons résumer les résultats obtenus pendant cette thèse en réponse à ses objectifs. L'étude des modèles de volumes d'écorce a permis de comparer des modèles de volumes de la littérature (Meyer, 1946; Kozak and Yang, 1981) avec un nouveau modèle que nous avons proposé, le meilleur parmi tous ceux que nous avons testés. L'étude portant sur les modèles de surface d'écorce a permis de comparer de nombreux modèles de profil d'écorce issus de la littérature (Cao and Pepper, 1986; Li and Weiskittel, 2011; Gordon, 1983b; Hannrup, 2004; Muhairwe, 2000; Korsun, 1955; Wilhelmsson et al., 2002; Thomas and Bennett, 2014; Johnson and Wood, 1987; Courbet and Houllier, 2002) ainsi qu'un modèle alternatif indépendant du diamètre sur écorce comme variable d'entrée. Ces deux champs d'études ont été menés grâce à une base de données exceptionnelle, tant par le nombre de données qu'elle contient (103 148 mesures d'épaisseur d'écorce pour 4 835 arbres) que par le nombre d'espèces couvertes (*Abies Alba*, *Picea abies*, *Pseudotsuga menziensii*, *Quercus petraea*, *Quercus robur* et *Fagus sylvatica*). Ainsi il a été possible de calculer les volumes d'écorce sur l'ensemble de la tige. En obtenant pour quelques milliers d'arbres le volume d'écorce ainsi que des variables intéressantes comme le $D130$, $EE130$ ou encore H_{tot}, il est possible de comparer les modèles et de les calibrer sur des données françaises. Cela permet une application plus précise de ces modèles sur le territoire français. Il en va de même pour les modèles de surface d'écorce.

La comparaison des modèles de volume d'écorce a permis d'obtenir, pour les six essences étudiées, des modèles avec une bonne précision. Le meilleur modèle obtient ainsi un R^2 de 0.96 pour le sapin et l'épicéa, 0.95 pour le douglas et le hêtre et 0.92 pour les chênes sessile et pédonculé ainsi qu'un RMSE relatif de 23.5% pour le sapin, 21.8% pour l'épicéa, 16.7% pour le douglas, 22.7% pour le chêne sessile, 27.5% pour le chêne pédonculé et 22.1% pour le hêtre. De plus, cette étude a montré qu'un modèle plus simple que le précédent avec deux paramètres contre quatre est légèrement moins bon mais plus robuste du fait du nombre réduit de paramètres.

L'étude sur les modèles de surface d'écorce a permis de selectionner trois modèles qui se

démarquaient en terme de précision des autres modèles. L'un d'eux arrive à ce résultat sans faire appel au diamètre sur écorce pour prédire l'épaisseur d'écorce à une hauteur donnée dans l'arbre alors que cette variable présente un grand lien avec l'épaisseur d'écorce. Le meilleur modèle, celui de Johnson and Wood (1987) atteint un R^2 de 0.95 pour le sapin, l'épicéa et le douglas, 0.91 pour le chêne sessile, 0.92 pour le chêne pédonculé et 0.94 pour le hêtre. En termes de RMSE relatif cela correspond à 24% pour le sapin et le douglas, 25 % pour l'épicéa, 30 % pour le chêne sessile et le hêtre et 34 % pour le chêne pédonculé. De plus, comparé au précédent modèle, celui-ci arrive à prédire le volume totale d'écorce dans l'arbre avec une précision accrue, bien que le nombre de données nécessaires pour atteindre cette précision le rende inapplicable en pratique.

Ces deux études ont montré conjointement un fait important. La mesure de $EE130$ est une nécessité afin d'obtenir des modèles de surface d'écorce ou de volume d'écorce suffisamment précis. Comme ce n'est pas le cas aujourd'hui de manière régulière, nous avons proposé une modélisation pour permettre l'utilisation des modèles de volume d'écorce sans $EE130$. Cette modélisation a mis en évidence une relation entre l'altitude de l'arbre et l'épaisseur de son écorce pour trois espèces, le sapin, l'épicéa et le hêtre. Ainsi la croissance de $EE130$ avec $D130$ est plus importante si l'arbre se trouve en altitude. Une telle adaptation peut avoir pour résultat une meilleure résistance au froid ou bien au manque d'eau. Ces modèles atteignent une précision en terme de R^2 de 0.73 pour le sapin, 0.72 pour l'épicéa, 0.77 pour le douglas, 0.68 pour les chênes sessile et pédonculé et 0.68 pour le hêtre. En terme de RMSE relatif, 30% pour le sapin et l'épicéa, 31 % pour le douglas, 28 % pour le chêne sessile, 27 % pour le chêne pédonculé et 36 % pour les hêtre. De plus, nous avons mesuré la perte de précision des modèles de volumes d'écorce avec le remplacement de la valeur $EE130$ par différents modèles. Cela induit une augmentation de 10 à 20% du RMSE relatif.

Un autre point qui a été sérieusement discuté pendant ce travail est celui de la précision des mesures. Les mesures d'épaisseur d'écorce utilisées dans l'ajustement des modèle ayant été faites à la jauge à écorce, il existe une imprécision inhérente de la mesure. Le calcul de la propagation de cette erreur dans les modèles montre que pour le volume d'écorce elle atteint 64.8 % pour l'épicéa. Ce qui implique donc une grande variabilité de la valeur réelle autour de la valeur estimée, malgré les bons résultats des modèles.

Un travail préparatoire a été fait concernant la mesure des volumes de nœud. Une méthode de détourage de nœud a été mise au point afin de faciliter la mesure des nœuds et notamment la reproductibilité des mesures ainsi que leur pertinence vis-à-vis de nos objectifs. Un travail de comparaison concernant les modèles de volume de nœuds de la littérature a aussi débuté sur les nœuds de sapin, d'épicéa et de douglas. Bien que ceux-ci ne soient pas finis, ils montrent déjà la complexité du travail à effectuer pour obtenir des résultats sur ces points là. En effet, les résultats obtenus sont inférieurs à 0.7 en terme de R^2 et supérieurs à 55 % en terme de RMSE relatif ce qui laisse encore une grande marge d'amélioration.

8.2 Perspectives

Le travail effectué dans cette thèse peut donner lieu à plusieurs poursuites.

L'identification du lien entre altitude et $EE130$ conduit inévitablement à la question de son déterminisme environnemental. Une recherche plus approfondie peut se mener sur les trois essences repérées (Sapin, épicéa et hêtre) afin d'identifier si l'une des deux hypothèses avancées dans ce travail est véridique ou éventuellement en identifier une nouvelle. Dans la même poursuite, il peut être regardé pourquoi une telle relation n'a pas été observée chez les chênes sessile et pédonculé et le douglas. Une recherche d'autre liens avec l'altitude pourrait aussi montrer d'autres stratégies de défense contre les mêmes agressions.

La base de données qui a été utilisée pour ce travail ne contient pas seulement des données sur les six essences qui ont été étudiées. Elle contient près de 86 autres espèces. Le travail de valorisation de cette base de données peut donc encore être continué et amélioré, tant pour les modèles de volume d'écorce et les modèles de surface d'écorce pour l'ensemble de ces essences.

L'étude des modèles de surface d'écorce peut aussi être plus poussée. Le travail effectué suppose la mesure de $EE130$, ce qui n'est en pratique pas toujours le cas. Il serait intéressant de mesurer donc la perte de précision en l'absence de cette mesure. De la même manière, l'utilisation des modèles comprenant D_{su} comme variable prédictive sera affecté par la non-mesure de cette donnée le long de la tige. Il serait aussi intéressant de mesurer cette perte de précision pour le calcul des volumes d'écorce. Enfin la précision du modèle sur le calcul des volumes d'écorce par classe de diamètre de tige n'a pas été mesurée, il serait intéressant de le faire.

Les nœuds, exceptionnellement riches en extractibles (Kebbi-Benkeder et al., 2016), n'ont pas été entièrement étudiés. Certains modèles de la littérature n'ont pas encore été testés. De plus il y a une différenciation à faire entre les volumes de nœud et la somme des volumes de nœud d'un verticille. Un croisement entre les différents modèles existants dans la littérature, notamment les modèles de branchaison et les modèles de volume ou de diamètre de nœud pourrait être intéressant afin de mettre au point un nouveau modèle.

Bibliographie

Achim, A., Gardiner, B., Leban, J.M., Daquitaine, R., 2006. Predicting the branching properties of Sitka spruce grown in Great Britain. New Zealand Journal of Forestry Science 36, 246–264.

Adam, J.P., 1984. La construction romaine. Matériaux et techniques. Les Editions Picard.

Adler, A., 2007. Accumulation of elements in Salix and other species used in vegetation filters with focus on wood fuel quality. Ph.D. thesis. Swedish University ofAgricultural Sciences, Uppsala.

Agout, A., 2021. Prix officiel des énergies électricité granulé bois fioul gaz 2021. https://www.picbleu.fr/page/prix-officiel-des-energies-electricite-bois-fioul-gaz.

Aitken, A.C., 1936. On least squares and linear combination of observations. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh 55, 42–48.

Akaike, 1973. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle, Springer, New York, NY. doi :https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0_15.

Alexandre, S., Gault, J., Guerin, A., Lefebvre, E., de Menthiere, C., Rathouis, P., Texier, P., Thibault, H., Toussaint, X., Attali, C., 2012. Les usages non alimentaires de la biomasse. Technical Report. Rapport de mission ministèriel. URL : https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/134000015.pdf.

Althen, F.v., 1964. Accuracy of the Swedish bark measuring gauge. The Forestry Chronicle 40, 257–258.

Amorós, A., 2013. Identification d'essences de bois dans l'architecture d'Ougarit. Matoïan & Al-Maqdissi 2013, 143–155.

Anastas, P.T., Warner, J.C., 1998. Principles of green chemistry. Green chemistry : Theory and practice , 29–56.

Anderson, A.B., 1955. Recovery and utilization of tree extractives. Economic Botany 9, 108.

Antoni, V., Arrouays, D., Bispo, A., Brossard, M., Le Bas, C., Stengel, P., Villanneau, E., et al., 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols.

Arct, J., Pytkowska, K., 2008. Flavonoids as components of biologically active cosmeceuticals. Clinics in dermatology 26, 347–357.

Arnaudet, L., 2014. Du bois d'oeuvre feuillu, une richesse potentielle pour le Limousin. volume 105. SRISE Limousin.

Arnould, P., 2002. Histoire et mémoire des aménagements forestiers. Ingénieries (sp) , 9–20.

As, N., Goker, Y., Dundar, T., 2006. Effect of Knots on the physical and mechanical properties of scots pine. Wood Research 51, 51–58.

Auad, P., Spier, F., Gutterres, M., 2020. Vegetable tannin composition and its association with the leather tanning effect. Chemical Engineering Communications 207, 722–732.

Badger, P., et al., 2002. Ethanol from cellulose : a general review. Trends in new crops and new uses 14, 17–21.

Ballesteros, I., Ballesteros, M., Cabanas, A., Carrasco, J., Martin, C., Negro, M., Saez, F., Saez, R., 1991. Selection of thermotolerant yeasts for simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of cellulose to ethanol. Applied Biochemistry and Biotechnology 28, 307–315.

Bamber, R.K., 1987. Sapwood and heartwood. Forestry Commission of New South Wales Beecroft.

Barton, G., 1985. Definition of biomass samples involving wood, bark and foliage, in : Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion. Springer, pp. 1137–1144.

Bauer, G., Speck, T., Blömer, J., Bertling, J., Speck, O., 2010. Insulation capability of the bark of trees with different fire adaptation. Journal of Materiel Science 45, 5950–5959. doi :https://doi.org/10.1007/s10853-010-4680-4.

Bauer, R., Billard, A., Mothe, F., Longuetaud, F., Houballah, M., Cuny, H., Colin, A., Colin, F., 2021. Modelling of bark volume for six major French forest species. Application to the evaluation of bark ressources in North-Eastern France. Annal of Forest Science 30.

Benjamin, J.G., Kershaw, Jr, J.A., Weiskittel, A.R., Chui, Y.H., Zhang, S., 2009. External knot size and frequency in black spruce trees from an initial spacing trial in Thunder Bay, Ontario. The Forestry Chronicle 85, 618–624.

Bert, D., Danjon, F., 2006. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature Pinus pinaster (Ait.). Forest Ecology and Management 222, 279–295.

Bewa, H., Le Ravalec, V., 2012. Le contexte : reconversion de la chimie vers la chimie verte. Oleagineux, corps gras, lipides 19, 1–5.

Billard, A., Bauer, R., Mothe, F., Jonard, M., Colin, F., Longuetaud, F., 2020. Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components. Annals of Forest Science 77, 103. doi :https://doi.org/10.1007/s13595-020-00999-1.

Björklund, J., Seftigen, K., Schweingruber, F., Fonti, P., von Arx, G., Bryukhanova, M.V., Cuny, H.E., Carrer, M., Castagneri, D., Frank, D.C., 2017. Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers. New Phytologist 216, 728–740.

Blankenship, R.E., 2014. Molecular mechanisms of photosynthesis. John Wiley & Sons.

Bonan, G.B., Pollard, D., Thompson, S.L., 1992. Effects of boreal forest vegetation on global climate. Nature 359, 716–718.

Bonnemain, J.L., Fromard, L., 1987. Physiologie comparée des cellules compagnes du phloème et des cellules associées aux vaisseaux. Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques 134, 27–37.

Bontoux, J.F., 2009. La filière bois-énergie française. Paris : Académie d'Agriculture de France, note de recherche .

Borghi, R., Destriau, M., 1995. Combustion et les flammes. Editions OPHRYS.

Borgin, K., Corbett, K., 1974. The hydrophobic and water-repellent properties of wattle bark extractives. Wood Science and Technology 8, 138–147.

Bottalico, F., Travaglini, D., Chirici, G., Garfì, V., Giannetti, F., De Marco, A., Fares, S., Marchetti, M., Nocentini, S., Paoletti, E., et al., 2017. A spatially-explicit method to assess the dry deposition of air pollution by urban forests in the city of Florence, Italy. Urban Forestry & Urban Greening 27, 221–234.

Bouvet, A., Deleuze, C., 2013. Taux d'écorce pour les principales essences forestières françaises. Rendez-Vous Techniques 39-40, 60–67.

Bowes, B.G., Mauseth, J.D., 2012. Structure des plantes. Editions Quae.

Brennan, M., Fritsch, C., Cosgun, S., Dumarcay, S., Colin, F., Gerardin, P., 2020a. Quantitative and qualitative composition of bark polyphenols changes longitudinally with bark maturity in Abies alba Mill. Annals of Forest Science 77, 1–14.

Brennan, M., Fritsch, C., Cosgun, S., Dumarcay, S., Colin, F., Gérardin, P., 2020b. Yield and compositions of bark phenolic extractives from three commercially significant softwoods show intra-and inter-specific variation. Plant Physiology and Biochemistry 155, 346–356.

Breusch, T.S., Pagan, A.R., 1979. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. Econometrica : Journal of the econometric society , 1287–1294.

Buamscha, M.G., Altland, J.E., Sullivan, D.M., Horneck, D.A., Cassidy, J., 2007. Chemical and physical properties of Douglas fir bark relevant to the production of container plants. HortScience 42, 1281–1286. doi :https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.5.1281.

Cannell, M., Morgan, J., 1987. Young's modulus of sections of living branches and tree trunks. Tree physiology 3, 355–364.

Cao, Q.V., Pepper, W.D., 1986. Predicting inside bark diameter for shortleaf, loblolly, and longleaf pines. Southern Journal of Applied Forestry 10, 220–224.

Carriço, C., Ribeiro, H., Marto, J., 2018. Converting cork by-products to ecofriendly cork bioactive ingredients : Novel pharmaceutical and cosmetics applications. Industrial Crops and Products 125, 72–84.

Castaño-Santamaría, J., Bravo, F., 2012. Variation in carbon concentration and basic density along stems of sessile oak (Quercus petraea (Matt.) Liebl.) and Pyrenean oak (Quercus pyrenaica Willd.) in the Cantabrian Range (NW Spain). Annals of Forest Science 69, 663–672. doi :https://doi.org/10.1007/s13595-012-0183-6.

Cellini, J.M., Galarza, M., Burns, S.L., Martinez-Pastur, G., Lencinas, M.V., 2012. Equations of bark thickness and volume profiles at different heights with easy-measurement variables. Forest Systems 21, 23–30. URL : http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/42330.

Cevallos, G., Grimault, J., Bellassen, V., 2019. Relocaliser la filière bois française : une bonne idée pour le climat. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02503311.

Chalayer, M., 2015. L'état de grâce des produits connexes de scieries. Forêt privée 345, 75–83.

Charles-Dominique, T., Beckett, H., Midgley, G.F., Bond, W.J., 2015. Bud protection : a key trait for species sorting in a forest–savanna mosaic. New phytologist 207, 1052–1060. doi :https://doi.org/10.1111/nph.13406.

Chong, J., Poutaraud, A., Hugueney, P., 2009. Metabolism and roles of stilbenes in plants. Plant science 177, 143–155.

Christakopoulos, P., Macris, B., Kekos, D., 1989. Direct fermentation of cellulose to ethanol by Fusarium oxysporum. Enzyme and Microbial Technology 11, 236–239.

Chu, S.S., Wang, C.F., Du, S.S., Liu, S.L., Liu, Z.L., 2011. Toxicity of the essential oil of Illicium difengpi stem bark and its constituent compounds towards two grain storage insects. Journal of Insect Science 11.

Clair, B., Ghislain, B., Prunier, J., Lehnebach, R., Beauchêne, J., Alméras, T., 2019. Mechanical contribution of secondary phloem to postural control in trees : the bark side of the force. New phytologist 221, 209–217. doi :https://doi.org/10.1111/nph.15375.

Clarkson, W., 2014. HOWTO Estimate parameter-errors by Monte-Carlo. URL : http://www-personal.umd.umich.edu/~wiclarks/AstroLab/HOWTOs/NotebookStuff/MonteCarloHOWTO.html.

Clément, B., Blondel, F., Charpentier, G., Baldassari, D., 2019. La place du bois dans l'architecture de la colonie romaine de Vienne. L'exemple du «complexe commercial AB» à Sainte-Colombe. Pallas. Revue d'études antiques , 27–49.

Colin, A., Wernsdörfer, H., Thivolle-Cazat, A., Bontemps, J.D., 2017. National Woody Biomass Projection Systems Based on Forest Inventory, Fance, in : Barreiro, S., Schelhaas, M.J., McRoberts, R.E., Kändler, G. (Eds.), Forest inventory-based projection Systems for Wood and Biomass Availability.

Colin, F., Houllier, F., 1991. Branchiness of Norway spruce in north-eastern France : modelling vertical trends in maximum nodal branch size, in : Annales des sciences forestières, EDP Sciences. pp. 679–693.

Coomes, D.A., Allen, R.B., 2007. Effects of size, competition and altitude on tree growth. Journal of Ecology 95, 1084–1097.

Corral-Rivas, J.J., Vega-Nieva, D.J., Rodríguez-Soalleiro, R., López-Sánchez, C.A., Wehenkel, C., Vargas-Larreta, B., Álvarez-González, J.G., Ruiz-González, A.D., 2017. Compatible system for predicting total and merchantable stem volume over and under bark, branch volume and whole-tree volume of pine species. Forests 8, 417.

Courbet, F., Houllier, F., 2002. Modelling the profile and internal structure of tree stem. Application to Cedrus atlantica (Manetti). Annals of forest science 59, 63–80.

Courtois, E.A., Baraloto, C., Paine, C.T., Petronelli, P., Blandinieres, P.A., Stien, D., Höuel, E., Bessière, J.M., Chave, J., 2012. Differences in volatile terpene composition between the bark and leaves of tropical tree species. Phytochemistry 82, 81–88.

Cramer, S., Kretschmann, D., Lakes, R., Schmidt, T., 2005. Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine. Holzforschung 59, 531–538.

Crubilé, P., 1972. Les charpentes lamellées-collées .

Cunha, W.R., Andrade e Silva, M., Sola Veneziani, R., Ambrósio, S.R., Kenupp Bastos, J., 2012. Lignans : Chemical and biological properties, in : Rao, V. (Ed.), Phytochemicals-A global perspective of their role in nutrition and health. InTechOpen : Rijeka, Croatia, pp. 213–234.

Czaplewski, R., 1989. Graphical analysis of stem taper in model building. Canadian Journal of Forest Research 19, 522–524.

Davis, J., Wells, P., 1992. Computer tomography measurements on wood. Industrial Metrology 2, 195–218.

De Antonio, A.C., Scalon, M.C., Rossatto, D.R., 2020. The role of bud protection and bark density in frost resistance of savanna trees. Plant Biology 22, 55–61.

De Bruyne, T., Pieters, L., Deelstra, H., Vlietinck, A., 1999. Condensed vegetable tannins : biodiversity in structure and biological activities. Biochemical Systematics and Ecology 27, 445–459.

Dedrie, M., Jacquet, N., Bombeck, P.L., Hébert, J., Richel, A., 2015. Oak barks as raw materials for the extraction of polyphenols for the chemical and pharmaceutical sectors : A regional case study. Industrial Crops and Products 70, 316–321. doi :https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.071.

Deleuze, C., Morneau, F., Constant, T., Saint André, L., Bouvet, A., Colin, A., Vallet, P., Gauthier, A., Jaeger, M., 2013. Le projet EMERGE pour des tarifs cohérents de volumes et biomasses des essences forestières françaises métropolitaines. Rendez-vous Techniques ONF 39-40, 32–36.

Dibdiakova, J., Gjølsjø, S., Wang, L., 2014. Solid biofuels from forest-Fuel specification and quality assurance. Technical Report. Norwegian forest and landscape institue.

Domec, J.C., Gartner, B.L., 2002. How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood ? Journal of Experimental Botany 53, 2369–2379.

Drion, S.P., 2013. Le bois-énergie, une solution d'avenir ? Pour 218, 137–144. URL : https://www.cairn.info/revue-pour-2013-2-page-137.htm.

Du, S., Yamamoto, F., 2007. An overview of the biology of reaction wood formation. Journal of Integrative Plant Biology 49, 131–143.

Duchateau, E., Longuetaud, F., Mothe, F., Ung, C., Auty, D., Achim, A., 2013. Modelling knot morphology as a function of external tree and branch attributes. Canadian Journal of Forest Research 43, 266–277.

Eberhardt, T.L., 2013. Longleaf pine inner bark and outer bark thicknesses : measurement and relevance. Southern Journal of Applied Forestry 37, 177–180.

Efferth, T., Romero, M.R., Wolf, D.G., Stamminger, T., Marin, J.J., Marschall, M., 2008. The antiviral activities of artemisinin and artesunate. Clinical Infectious Diseases 47, 804–811.

Erlund, I., 2004. Review of the flavonoids quercetin, hesperetin, and naringenin. Dietary sources, bioactivities, bioavailability, and epidemiology. Nutrition research 24, 851–874.

Fabiani, J.L., 1984. L'opposition à la chasse et l'affrontement des représentations de la nature. Actes de la recherche en sciences sociales 54, 81–84.

FAO, 2020. Termes et définitions. UN Food and Agriculture Organization Rome.

Farrar, J., 1961. Longitudinal variation in the thickness of the annual ring. The Forestry Chronicle 37, 323–349.

FCBA, 2019. Memento 2019. Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement. Champs-sur-Marne, France. URL : https://www.fcba.fr/content/memento.

FCBA, 2020. Memento 2020. Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement. Champs-sur-Marne, France. URL : https://www.fcba.fr/wp-content/uploads/2020/10/memento_2020.pdf.

Feng, S., Cheng, S., Yuan, Z., Leitch, M., Xu, C.C., 2013. Valorization of bark for chemicals and materials : A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 26, 560–578. doi :https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.024.

Filipescu, C.N., Lowell, E.C., Koppenaal, R., Mitchell, A.K., 2014. Modeling regional and climatic variation of wood density and ring width in intensively managed douglas-fir. Canadian journal of forest research 44, 220–229.

Filot, O., 2005. L'usage de la forêt wallonne. Courrier hebdomadaire du CRISP , 5–51.

Findlay, W., 1985. The nature and durability of wood, in : Preservation of timber in the tropics. Springer. volume 17, pp. 1–13.

Fiquepron, J., Garcia, S., Stenger, A., 2013. Land use impact on water quality : valuing forest services in terms of the water supply sector. Journal of environmental management 126, 113–121.

Fisher, J.B., Stevenson, J.W., 1981. Occurrence of reaction wood in branches of dicotyledons and its role in tree architecture. Botanical gazette 142, 82–95.

Fisher, R.A., 1922. On the mathematical foundations of theoretical statistics. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character 222, 309–368.

FNC, 2020. Fédération des chasseurs. https://www.chasseurdefrance.com. Accessed : 2020-02-11.

Forslund, R., 1991. The power function as a simple stem profile examination tool. Canadian Journal of Forest Research 21, 193–198.

Franceschi, V.R., Krokene, P., Christiansen, E., Krekling, T., 2005. Anatomical and chemical defenses of conifer bark against bark beetles and other pests. New phytologist 167, 353–376.

Fredriksson, M., 2012. Reconstruction of Pinus Sylvestris knots using measurable log features in the Swedish Pine Stem Bank. Scandinavian Journal of Forest Research 27, 481–491.

Freyburger, C., Longuetaud, F., Mothe, F., Constant, T., Leban, J.M., 2009. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. Annals of forest science 66, 804–804.

Fries, A., Ericsson, T., 2009. Genetic parameters for earlywood and latewood densities and development with increasing age in Scots pine. Annals of Forest Science 66, 1–8.

Fritts, H., 2012. Tree rings and climate. Elsevier.

Froissart, P., Rodriguez, N., 2020. Bourgogne-Franche-Comté, une région prospère en bois. Activité des exploitations forestières et des scieries en 2018.

Fuwape, J.A., 1989. Gross heat of combustion of Gmelina (Gmelina arborea (Roxb)) chemical components. Biomass 19, 281–287.

Garber, S.M., Maguire, D.A., 2003. Modeling stem taper of three central Oregon species using nonlinear mixed effects models and autoregressive error structures. Forest Ecology and Management 179, 507–522.

Garrigue, D., 2005. L'avenir de l'industrie chimique en France à l'horizon 2015 . Rapport economie finance. Ministère de l'industrie. Paris.

Gauss, C.F., 1809. Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium. Hamburg, Perthes et Besser.

Gautam, R., Jachak, S.M., 2009. Recent developments in anti-inflammatory natural products. Medicinal research reviews 29, 767–820.

Ghedira, K., 2005. Les flavonoïdes : structure, propriétés biologiques, rôle prophylactique et emplois en thérapeutique. Phytothérapie 3, 162–169.

Gil, L., 2014. Cork : a strategic material. Frontiers in chemistry 2, 16.

Gordon, A., 1983a. Comparison of compatible polynomial taper equations. New Zealand Journal of Forestry Science 13, 146–158.

Gordon, A., 1983b. Estimating bark thickness of Pinus radiata. New Zealand Journal of Forestry Science 13, 340–345.

Gordon, A., Lundgren, C., Hay, E., 1999. Composite taper equations to predict over-and under-bark diameter and volume of Eucalyptus pilularis, E. globoidea, and E. muelleriana in New Zealand. New Zealand Journal of Forestry Science 29, 311–317.

Gorte, R.W., 2009. Carbon sequestration in forests. DIANE Publishing.

Gould, M.N., 1997. Cancer chemoprevention and therapy by monoterpenes. Environmental Health Perspectives 105, 977–979.

Grabner, M., Müller, U., Gierlinger, N., Wimmer, R., 2005. Effects of heartwood extractives on mechanical properties of larch. Iawa Journal 26, 211–220.

Grace, J., Brownlie, R., Kennedy, S., 2015. The influence of initial and post-thinning stand density on Douglas-fir branch diameter at two sites in New Zealand. New Zealand Journal of Forestry Science 45, 1–13.

Granet, A.m., Dobré, M., 2009. Les citadins et la forêt en France. Revue forestière française 61, 521–534.

Gray, H., 1956. The Form and Taper of Forest-tree Stems. Institute paper - Imperial Forestry Institute, University of Oxford, Imperial Forestry Institute, University of Oxford. URL : https://books.google.fr/books?id=aR8CvwEACAAJ.

Grönlund, A., Grundberg, S., Oja, J., Nyström, J., 2005. Scanningtechniques as tools for integration in the wood conversion chain—some industrial applications. Lignovisionen 9, 3–11.

Grosclaude, C., 1993. Pathologie des blessures mettant à nu le bois chez les végétaux ligneux. Agronomie 13, 441–456.

Guilley, É., Hervé, J.C., Huber, F., Nepveu, G., 1999. Modelling variability of within-ring density components in Quercus petraea Liebl. with mixed-effect models and simulating the influence of contrasting silvicultures on wood density. Annals of Forest Science 56, 449–458.

Guiraud, C., 1981. Sur la chasse en forêt en Europe. Revue Forestière Française 33, 514–521.

Guiraudie, P., 2015. Chimie verte : vers une valorisation chimique du bois. Forêt méditerranéenne 36, 195–200.

Hammer, K.., Carson, C., Riley, T., 2003. Antifungal activity of the components of Melaleuca alternifolia (tea tree) oil. Journal of applied microbiology 95, 853–860.

Hannrup, B., 2004. Funktioner för skattning av barkens tjocklek hos tall och gran vid avverkning med skördare. (Functions for prediction of bark thickness of Norway spruce and Scots pine at CTL-harvesting)., in : Skogforsk, Uppsala, p. 33.

Harkin, J.M., Rowe, J.W., 1971. Bark and its possible uses. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest products laboratoyr, Madison, Wis.

Harun, J., Labosky, P., 1985. Antitermitic and antifungal properties of selected bark extractives. Wood Fiber Science 17, 327–335.

Hashim, M., Devi, K., 2003. Insecticidal action of the polyphenolic rich fractions from the stem bark of Streblus asper on Dysdercus cingulatus. Fitoterapia 74, 670–676.

Hawley, L., Fleck, L., Richards, C.A., 1924. The relation between durability and chemical composition in Wood. Industrial & Engineering Chemistry 16, 699–700.

Hein, S., Weiskittel, A.R., Kohnle, U., 2008. Branch characteristics of widely spaced Douglas-fir in south-western Germany : Comparisons of modelling approaches and geographic regions. Forest Ecology and Management 256, 1064–1079.

Hervé, J.C., 2016. National Forest Inventories Reports, France, in : Vidal, C., Alberdi, I., Hernández, L., Redmond, J. (Eds.), National forest inventories. Springer.

Holmbom, B., 1999. Extractives, in : Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking. Springer, pp. 125–148.

IGN, 2021. OCRE. URL : https://ocre-gp.ign.fr/ocre.

Inouye, S., Takizawa, T., Yamaguchi, H., 2001. Antibacterial activity of essential oils and their major constituents against respiratory tract pathogens by gaseous contact. Journal of antimicrobial chemotherapy 47, 565–573.

Iwashina, T., 2003. Flavonoid function and activity to plants and other organisms. Biological Sciences in Space 17, 24–44.

Jaudon, J.l., 1970. Le bois, matière première des panneaux de particules. Revue Forestière Française 22, 587–602.

Jenkins, J.C., Chojnacky, D.C., Heath, L.S., Bsey, R.A., 2003. National-scale biomass estimators for United States tree species. Forest science 49, 12–35.

Jiang, Z.H., Wang, X.Q., Fei, B.H., Ren, H.Q., Liu, X.E., 2007. Effect of stand and tree attributes on growth and wood quality characteristics from a spacing trial with Populus xiaohei. Annals of forest science 64, 807–814.

Johnson, T., Wood, G., 1987. Simple linear model reliably predicts bark thickness of radiata pine in the Australian capital territory. Forest ecology and management 22, 173–183.

Jones, D.A., O'Hara, K.L., 2018. Variation in carbon fraction, density, and carbon density in conifer tree tissues. For 9, 430. doi :https://doi.org/10.3390/f9070430.

Jyske, T., Laakso, T., Latva-Mäenpää, H., Tapanila, T., Saranpää, P., 2014. Yield of stilbene glucosides from the bark of young and old Norway spruce stems. Biomass and Bioenergy 71, 216–227. doi :https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.005.

Kebbi-Benkeder, Z., 2015. Biodiversité interspécifique et intraspécifique des extractibles nodaux. Ph.D. thesis. Paris, AgroParisTech.

Kebbi-Benkeder, Z., Colin, F., Dumarçay, S., Gérardin, P., 2015. Quantification and characterization of knotwood extractives of 12 European softwood and hardwood species. Annals of forest science 72, 277–284.

Kebbi-Benkeder, Z., Dumarçay, S., Touahri, N., Manso, R., Gérardin, P., Colin, F., 2016. Les noeuds : un bois méconnu et une source importante de composés extractibles. Revue Forestiére Française .

Kebbi-Benkeder, Z., Manso, R., Gérardin, P., Dumarçay, S., Chopard, B., Colin, F., 2017. Knot extractives : a model for analysing the eco-physiological factors that control the within and between-tree variability. Trees 31, 1619–1633.

Kershaw Jr, J.A., Benjamin, J.G., Weiskittel, A.R., 2009. Approaches for modeling vertical distribution of maximum knot size in black spruce : a comparison of fixed-and mixed-effects nonlinear models. Forest Science 55, 230–237.

Knapic, S., Pereira, H., 2005. Within-tree variation of heartwood and ring width in maritime pine (Pinus pinaster Ait.). Forest Ecology and Management 210, 81–89.

Koponen, K., Sokka, L., Salminen, O., Sievänen, R., Pingoud, K., Ilvesniemi, H., Routa, J., Ikonen, T., Koljonen, T., Alakangas, E., et al., 2015. Sustainability of forest energy in Northern Europe. VTT Technology 237, 94.

Korsun, F., 1955. Bark Thickness As a Function of Stem Diameter Lesn. Bratislava 2, 51–54.

Kozak, A., 2004. My last words on taper equations. The Forestry Chronicle 80, 507–515.

Kozak, A., Yang, R., 1981. Equations for estimating bark volume and thickness of commercial trees in British Columbia. The Forestry Chronicle 57, 112–115.

Krieger, D.J., 2001. Economic value of forest ecosystem services : a review. The Wilderness Society.

Ku, H.H., 1966. Notes on the Use of Propagation of Error Formulas. Engineering and Instrumentation 70, 263–273.

Kumar, R., Tsvetkov, D.E., Varshney, V., Nifantiev, N.E., 2020. Chemical constituents from temperate and subtropical trees with reference to knotwood. Industrial Crops and Products 145, 112077.

Kuo, T.Y., Wang, W.C., 2019. Determination of elastic properties of latewood and earlywood by digital image analysis technique. Wood Science and Technology 53, 559–577.

Laasasenaho, J., Melkas, T., Alden, S., 2005. Modelling bark thickness of Picea abies with taper curves. Forest Ecology and Management 206, 35–47.

Lachowicz, H., Wróblewska, H., Sajdak, M., Komorowicz, M., Wojtan, R., 2019. The chemical composition of silver birch (Betula pendula Roth.) wood in Poland depending on forest stand location and forest habitat type. Cellulose 26, 3047–3067.

Lamlom, S., Savidge, R., 2003. A reassessment of carbon content in wood : variation within and between 41 North American species. Biomass and Bioenergy 25, 381–388.

Landmann, G., Ginisty, C., Chauvin, C., 2011. Les traitements sylvicoles à l'origine du bois énergie et leurs évolutions possibles en cas de demande accrue de bois. Revue forestière française 63, 193–202.

Larrère, R., 2002. Les fonctions sociales de la forêt. Ingènièries Spécial, 63–69.

Larson, P.R., Isebrands, J., 1978. Functional significance of the nodal constricted zone in Populus deltoides. Canadian Journal of Botany 56, 801–804.

Laurier, J.P., 2011. Mobilisation du bois énergie sous forme de plaquettes forestières. Revue forestière française 63, 203–216.

Lea, C.S., Bradbury, S.G., Constabel, C.P., 2021. Anti-Herbivore Activity of Oregonin, a Diarylheptanoid Found in Leaves and Bark of Red Alder (Alnus rubra). Journal of Chemical Ecology 47, 215–226.

Legendre, A.M., 1805. Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes. Paris, Firmin Didot.

Lev-Yadun, S., Aloni, R., 1990. Vascular differentiation in branch junctions of trees : circular patterns and functional significance. Trees 4, 49–54.

Levia, D., Herwitz, S., 2005. Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soils. Catena 64, 117–137. doi :https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.001.

Li, C., Zhao, X., Wang, A., Huber, G.W., Zhang, T., 2015. Catalytic transformation of lignin for the production of chemicals and fuels. Chemical reviews 115, 11559–11624.

Li, R., Weiskittel, A.R., 2010. Comparison of model forms for estimating stem taper and volume in the primary conifer species of the North American Acadian Region. Annals of Forest Science 67, 302.

Li, R., Weiskittel, A.R., 2011. Estimating and predicting bark thickness for seven conifer species in the Acadian Region of North America using a mixed-effects modeling approach : comparison of model forms and subsampling strategies. European Journal of Forest Research 130, 219–233.

Liepiņš, J., Liepiņš, K., et al., 2015. Evaluation of bark volume of four tree species in Latvia. Research for rural development 2, 22–28.

Lindberg, L., Willför, S., Holmbom, B., 2004. Antibacterial effects of knotwood extractives on paper mill bacteria. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology 31, 137–147.

Longuetaud, F., Mothe, F., Fournier, M., Dlouha, J., Santenoise, P., Deleuze, C., 2016. Within-stem maps of wood density and water content for characterization of species : a case study on three hardwood and two softwood species. Annals of Forest Science 73, 601–614.

Longuetaud, F., Mothe, F., Kerautret, B., Krähenbühl, A., Hory, L., Leban, J.M., Debled-Rennesson, I., 2012. Automatic knot detection and measurements from X-ray CT images of wood : a review and validation of an improved algorithm on softwood samples. Computers and Electronics in Agriculture 85, 77–89.

Longuetaud, F., Mothe, F., Leban, J.M., Mäkelä, A., 2006. Picea abies sapwood width : variations within and between trees. Scandinavian Journal of Forest Research 21, 41–53.

Lu, W., Sibley, J.L., Gilliam, C.H., Bannon, J.S., Zhang, Y., 2006. Estimation of US bark generation and implications for horticultural industries. Journal of Environmental Horticulture 24, 29–34. doi :https://doi.org/10.24266/0738-2898-24.1.29.

Lula, M., 2016. Knots properties of lodgepole sawn boards from unthinned stands planted in different initial spacings. Ph.D. thesis. Swedish University of Agricultural Sciences.

Lutz, D.A., Howarth, R.B., 2014. Valuing albedo as an ecosystem service : implications for forest management. Climatic change 124, 53–63.

Maguire, D.A., Batista, J.L., 1996. Sapwood taper models and implied sapwood volume and foliage profiles for coastal Douglas-fir. Canadian Journal of Forest Research 26, 849–863.

Maguire, D.A., Hann, D.W., 1989. The relationship between gross crown dimensions and sapwood area at crown base in douglas-fir. Canadian Journal of Forest Research 19, 557–565.

Mahmoud, G.M., Hegazy, R.S., 2017. Comparison of GUM and Monte Carlo methods for the uncertainty estimation in hardness measurements. International Journal of Metrology and Quality Engineering 8, 14. URL : https://www.metrology-journal.org/articles/ijmqe/abs/2017/01/ijmqe170002/ijmqe170002.html, doi :10.1051/ijmqe/2017014. publisher : EDP Sciences.

Mäkinen, H., Colin, F., 1998. Predicting branch angle and branch diameter of Scots pine from usual tree measurements and stand structural information. Canadian Journal of Forest Research 28, 1686–1696.

Malhi, Y., Meir, P., Brown, S., 2002. Forests, carbon and global climate . Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences 360, 1567–1591.

Manso, R., McLean, J.P., Ash, A., Achim, A., 2020. Estimation of individual knot volumes by mixed-effects modelling. Canadian Journal of Forest Research 50, 81–88.

Manwiller, F.G., 1979. Wood and bark specific gravity of small-diameter, pine-site hardwood in the south. Wood Science 11 (4) : 234-240 .

Marie, M., 2009. La cohabitation entre faune sauvage et élevage de petits ruminants. Considérations éthiques et gestion des conflits. Options Méditerranéennes. Série A : Séminaires Méditerranéens , 125–134.

Martin, P., 2015. Les Combustibles Bois.

Masson, D., Trouy-Triboulot, M.C., 2003. Matériaux dérivés du bois. Ed. Techniques Ingénieur.

Mayer, D., Butler, D., 1993. Statistical validation. Ecol Modell 68, 21–32. doi :https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90105-2.

McKimmy, M.D., Ching, K.K., et al., 1968. Correlating specific gravities of branch and bole wood in young Douglas fir.

McSweeney, C., Palmer, B., McNeill, D., Krause, D., 2001. Microbial interactions with tannins : nutritional consequences for ruminants. Animal Feed Science and Technology 91, 83–93.

Mesavage, C., 1969. Measuring bark thickness. Journal of Forestry 67, 753–754.

Meyer, 1946. Bark volume Determination in Tree, in : Journal of Forestry, pp. 1061–1070.

Miles, J., 2014. R squared, adjusted R squared. Wiley StatsRef : Statistics Reference Online .

Miles, P.D., Smith, W.B., 2009. Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America. US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station.

Miranda, I., Sousa, V., Ferreira, J., Pereira, H., 2017. Chemical characterization and extractives composition of heartwood and sapwood from Quercus faginea. PLoS One 12, 1–14.

Moberg, L., 2000. Models of internal knot diameter for Pinus sylvestris. Scandinavian Journal of Forest Research 15, 177–187.

Molina, J.G.A., Hadad, M.A., Domínguez, D.P., Roig, F.A., 2016. Tree age and bark thickness as traits linked to frost ring probability on Araucaria araucana trees in northern Patagonia. Dendrochronologia 37, 116–125. doi :https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.01.003.

Moore, J.R., Cown, D.J., 2017. Corewood (juvenile wood) and its impact on wood utilisation. Current Forestry Reports 3, 107–118.

Moore, J.R., Lyon, A.J., Searles, G.J., Vihermaa, L.E., et al., 2009. The effects of site and stand factors on the tree and wood quality of Sitka spruce growing in the United Kingdom. Silva Fennica 43, 383–396.

Morais, M.C., Pereira, H., 2012. Variation of extractives content in heartwood and sapwood of Eucalyptus globulus trees. Wood Science and Technology 46, 709–719.

Mörling, T., 2002. Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of scots pine. Annals of Forest Science 59, 29–40.

Mueller-Harvey, I., 2001. Analysis of hydrolysable tannins. Animal feed science and technology 91, 3–20.

Muhairwe, C.K., 2000. Bark thickness equations for five commercial tree species in regrowth forests of Northern New South Wales. Australian Forestry 63, 34–43.

Müller, U., Gindl-Altmutter, W., Keckes, J., 2018. How softwood tree branches are attached to stems : hierarchical extension of Shigo's stem–branch model. Trees 32, 1113–1121.

Myers, N., 1996. Environmental services of biodiversity. Proceedings of the National Academy of Sciences 93, 2764–2769.

Natterer, J., 2004. Construction en bois : matériau, technologie et dimensionnement. PPUR presses polytechniques.

Neary, D.G., Ice, G.G., Jackson, C.R., 2009. Linkages between forest soils and water quality and quantity. Forest ecology and management 258, 2269–2281.

Neiva, D.M., Araújo, S., Gominho, J., Carneiro, A.d.C., Pereira, H., 2018. An integrated characterization of Picea abies industrial bark regarding chemical composition, thermal properties and polar extracts activity. PLoS One 13, e0208270.

Oja, J., Grundberg, S., Fredriksson, J., Berg, P., 2004. Automatic grading of sawlogs : a comparison between X-ray scanning, optical three-dimensional scanning and combinations of both methods. Scandinavian Journal of Forest Research 19, 89–95.

Ojansuu, R., Maltamo, M., 1995. Sapwood and heartwood taper in Scots pine stems. Canadian journal of forest research 25, 1928–1943.

Özçelik, B., Gürbüz, I., Karaoglu, T., Yeşilada, E., 2009. Antiviral and antimicrobial activities of three sesquiterpene lactones from Centaurea solstitialis L. ssp. solstitialis. Microbiological Research 164, 545–552.

Passialis, C., Voulgaridis, E., Grigoriou, A., 1995. Utilization of oleoresin and bark extractives from Pinus halepensis Mill. in wood products. Forêt méditerranéenne 16, 19–27.

Pasztory, Z., Mohácsiné, I.R., Gorbacheva, G., Börcsök, Z., 2016. The utilization of tree bark. BioResources 11, 7859–7888.

Patel, R.N., 1975. Bark anatomy of radiata pine, corsican pine, and Douglas fir grown in New Zealand. New Zealandd Journal of Botany 13, 149–167. doi :https://doi.org/10.1080/0028825X.1975.10430317.

Paul, B.H., et al., 1947. Knots in second-growth Douglas-fir.

Pausas, J.G., 2015. Bark thickness and fire regime. Functional Ecology 29, 315–327.

Pearl, J., 2009. Models, Reasoning, and Inference, Second Edition. Causality.

Penman, J., 1988. Volume, taper, and bark thickness in seedlings and cuttings from Mamaku Forest, New Zealand. New Zealand Journal of Forestry Science 18, 311–317.

Pernot, C., 2012. Comparaison de structure et de biodiversité entre des forêts exploitées et non exploitéesen France : bilan des données acquises et premières perspectives. Sciences de l'environnement doi :hal-02597610.

Persson, B., Downie, B., 1992. Variation in bark thickness of young Pinus contorta var. latifolia engelm. in Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research 7, 99–106.

Persson, B., Persson, A., Ståhl, E.G., Karlmats, U., 1995. Wood quality of Pinus sylvestris progenies at various spacings. Forest Ecology and Management 76, 127–138.

Peyron, J.L., Guo, B., 1995. Bois d'oeuvre et bois de trituration. quelle stratégie de production ? Revue Forestière Française 47, 559–571.

Pfanz, H., Aschan, G., Langenfeld-Heyser, R., Wittmann, C., Loose, M., 2002. Ecology and ecophysiology of tree stems : corticular and wood photosynthesis. Naturwissenschaften 89, 147–162.

Pichersky, E., Gershenzon, J., 2002. The formation and function of plant volatiles : perfumes for pollinator attraction and defense. Current opinion in plant biology 5, 237–243.

Pietarinen, S.P., Willför, S.M., Ahotupa, M.O., Hemming, J.E., Holmbom, B.R., 2006. Knotwood and bark extracts : strong antioxidants from waste materials. Journal of wood science 52, 436–444.

Pietta, P.G., 2000. Flavonoids as antioxidants. Journal of natural products 63, 1035–1042.

Piispanen, R., Willför, S., Saranpää, P., Holmbom, B., 2008. Variation of lignans in Norway spruce (Picea abies [L.] Karst.) knotwood : within-stem variation and the effect of fertilisation at two experimental sites in Finland. Trees 22, 317–328.

Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J.P., Paruelo, J.M., 2008. How to evaluate models : observed vs. predicted or predicted vs. observed ? Ecol Modell 216, 316–322. doi :https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006.

Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., R Core Team, 2019. nlme : Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. URL : https://CRAN.R-project.org/package=nlme. r package version 3.1-139.

Pinta, F., 2003. Le bois, une énergie renouvelable pour la production d'électricité et de froid industriel. Guyan'Info Bois URL : https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=Le+bois%2C+une+%C3%A9nergie+renouvelable&btnG=.

Pinto, I., Pereira, H., Usenius, A., 2003. Analysis of log shape and internal knots in twenty maritime pine (Pinus pinaster Ait.) stems based on visual scanning and computer aided reconstruction. Annals of forest science 60, 137–144.

Poulson, S.R., Chamberlain, C.P., Friedland, A.J., 1995. Nitrogen isotope variation of tree rings as a potential indicator of environmental change. Chemical Geology 125, 307–315.

R Core Team, 2018. R : A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL : https://www.R-project.org/.

Ranger, J., Rantien, C., Brethes, A., Mengin-Lecreulx, P., Sardin, T., 2007. Bois-énergie : maîtriser les impacts. Rendez-vous Techniques ONF 15, 36–45.

Rastogi, S., Pandey, M.M., Rawat, A.K.S., 2015. Medicinal plants of the genus Betula—Traditional uses and a phytochemical–pharmacological review. Journal of ethnopharmacology 159, 62–83.

Repola, J., 2006. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density 40, 673–685.

Richards, K.R., Stokes, C., 2004. A review of forest carbon sequestration cost studies : a dozen years of research. Climatic change 63, 1–48.

Rocha, W.F.C., Nogueira, R., 2012. Monte Carlo simulation for the evaluation of measurement uncertainty of pharmaceutical certified reference materials. Journal of the Brazilian Chemical Society 23, 385–391.

Rosell, J.A., 2016. Bark thickness across the angiosperms : more than just fire. New Phytologist 211, 90–102.

Rosell, J.A., 2019. Bark in woody plants : understanding the diversity of a multifunctional structure. Integrative and comparative biology 59, 535–547.

Rosell, J.A., Gleason, S., Méndez-Alonzo, R., Chang, Y., Westoby, M., 2014. Bark functional ecology : evidence for tradeoffs, functional coordination, and environment producing bark diversity. New phytologist 201, 486–497. doi :https://doi.org/10.1111/nph.12541.

Rosell, J.A., Wehenkel, C., Pérez-Martínez, A., Arreola Palacios, J.A., García-Jácome, S.P., Olguín, M., 2017. Updating bark proportions for the estimation of tropical timber volumes by indigenous community-based forest enterprises in Quintana Roo, Mexico. Forestry 8, 338. doi :https://doi.org/10.3390/f8090338.

Rossi, S., Cairo, E., Krause, C., Deslauriers, A., 2015. Growth and basic wood properties of black spruce along an alti-latitudinal gradient in Quebec, Canada. Annals of Forest Science 72, 77–87.

Royer, M., Houde, R., Stevanovic, T., 2010. Volet 1 : Les extractibles forestiers québécois. Québec Wood Export Bureau.

Royer, M., Houde, R., Stevanovic, T., 2013. Non-Wood Forest Products Based on Extractives-A New Opportunity for Canadian Forest Industry Part 2-Softwood Forest Species. Journal of Food Research 2, 164.

Ruelle, E., Alemany, L., 2020. Récolte de bois et sciages. La récolte de bois et l'activité des scieries en 2018.

Rustagi, K.P., Loveless Jr, R.S., 1991. Compatible variable-form volume and stem-profile equations for Douglas-fir. Canadian journal of forest research 21, 143–151.

Salanova, L., Sohn, M., 2012. L'architecture en bois de la sépulture collective néolithique de Bury (Oise). Mémoires 23, 221–228.

Salem, M.Z.M., Zeidler, A., Böhm, M., Mohamed, M.E., Ali, H.M., 2015. GC/MS Analysis of Oil Extractives from Wood and Bark of Pinus sylvestris, Abies alba, Picea abies, and Larix decidua. BioResources 10, 7725–7737.

Salleo, S., Rosso, R., Lo Gullo, M.A., 1982. Hydraulic architecture of Vitis vinifera L. and Populus deltoides Bartr. 1-year-old twigs : I-hydraulic conductivity (LSC) and water potential gradients. Plant Biosystem 116, 15–27.

Santos, R.B., Capanema, E.A., Balakshin, M.Y., Chang, H.m., Jameel, H., 2012. Lignin structural variation in hardwood species. Journal of agricultural and food chemistry 60, 4923–4930.

Sari, R.K., Syafii, W., Azizah, N., Juliasman, J., Fadli, M., Minarti, M., 2014. Potential Antidiabetic and Anticancer Agents from the Inner bark Extractives of Mount Salak Forest Woods. Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis 12, 108–117.

Savidge, R.A., 2003. Tree growth and wood quality. Wood quality and its biological basis , 1–29.

Schafer, J.L., Breslow, B.P., Hohmann, M.G., Hoffmann, W.A., 2015. Relative bark thickness is correlated with tree species distributions along a fire frequency gradient. Fire Ecology 11, 74–87. doi :https://doi.org/10.4996/fireecology.1101074.

Scholz, F.G., Bucci, S.J., Goldstein, G., Meinzer, F.C., Franco, A.C., Miralles-Wilhelm, F., 2007. Biophysical properties and functional significance of stem water storage tissues in Neotropical savanna trees. Plant, cell & environment 30, 236–248.

Schowalter, T.D., Morrell, J.J., 2002. Nutritional quality of Douglas-fir wood : effect of vertical and horizontal position on nutrient levels. Wood and fiber science 34.

Sedjo, R., Sohngen, B., 2012. Carbon sequestration in forests and soils. Annu. Rev. Resour. Econ. 4, 127–144.

Sherrill, J.R., Bullock, B.P., Mullin, T.J., McKeand, S.E., Purnell, R.C., 2011. Total and merchantable stem volume equations for midrotation loblolly pine (Pinus taeda L.). Southern Journal of Applied Forestry 35, 105–108.

Shigo, A.L., 1985. How tree branches are attached to trunks. Canadian Journal of Botany 63, 1391–1401.

Shukla, J., Mintz, Y., 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate. Science 215, 1498–1501.

Shukla, J., Nobre, C., Sellers, P., 1990. Amazon deforestation and climate change. Science 247, 1322–1325.

Song, C., Lee, W.K., Choi, H.A., Kim, J., Jeon, S.W., Kim, J.S., 2016. Spatial assessment of ecosystem functions and services for air purification of forests in South Korea. Environmental Science & Policy 63, 27–34.

Spicer, R., Gartner, B.L., 1998. Hydraulic properties of Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii) branches and branch halves with reference to compression wood. Tree Physiology 18, 777–784.

Stängle, S.M., Dormann, C.F., 2018. Modelling the variation of bark thickness within and between European silver fir (Abies alba Mill.) trees in southwest Germany. International Journal Forest Research 91, 283–294. doi :https://doi.org/10.1093/forestry/cpx047.

Stängle, S.M., Sauter, U.H., Dormann, C.F., 2017. Comparison of models for estimating bark thickness of Picea abies in southwest Germany : the role of tree, stand, and environmental factors. Annals of forest science 74, 16.

Stängle, S.M., Weiskittel, A.R., Dormann, C.F., Brüchert, F., 2016. Measurement and prediction of bark thickness in Picea abies : assessment of accuracy, precision, and sample size requirements. Canadian Journal of Forest Research 46, 39–47.

Stépanoff, C., 2020. La forêt est en guerre. Enquête sur le conflit autour de la chasse à courre. Terrain. Anthropologie & sciences humaines .

Stern, T., 2014. From Wood to Food : Will Bio-Economy Change Sectors. ÖGA-Jahrestagung 26, 47–48.

Stringer, J.W., Olson, J.R., 2007. Radial and vertical variation in stem properties of juvenile black locust (Robinia pseudoacacia). Wood and Fiber Science 19, 59–67.

Strizincova, P., Haz, A., Vál'ka, J., Surina, I., 2019. USING OF SPRUCE NEEDLE EXTRACTIVES AS PROTECTION AGENT AGAINST INSECTS ATTACK. Journal of Hygienic Engineering and Design 28, 96–101.

Sugiyama, A., Yazaki, K., 2014. Flavonoids in plant rhizospheres : secretion, fate and their effects on biological communication. Plant Biotechnology 31, 431–443.

Syofuna, A., Banana, A., Nakabonge, G., 2012. Efficiency of natural wood extractives as wood preservatives against termite attack. Maderas. Ciencia y tecnología 14, 155–163.

Telmo, C., Lousada, J., 2011. The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. Biomass and bioenergy 35, 1663–1667.

Tenorio, C., Moya, R., 2013. Thermogravimetric characteristics, its relation with extractives and chemical properties and combustion characteristics of ten fast-growth species in Costa Rica. Thermochimica Acta 563, 12–21.

Theander, O., 1985. Cellulose, Hemicellulose and Extractives, in : Overend R.P., Milne T.A., M.L. (Ed.), Fundam Thermochem Biomass Convers. Springer, Dordrecht, pp. 35–60. doi :https://doi.org/10.1007/978-94-009-4932-4_2.

Thibaut, B., 2014. Construction et déconstruction de l'arbre : la cascade des usages du bois, in : Mécanique des matériaux biosourcés-MECAMAT 2014.

Thomas, R.E., Bennett, N.D., 2014. Estimating bark thicknesses of common Appalachian hardwoods, in : In : Groninger, John W. ; Holzmueller, Eric J. ; Nielsen, Clayton K. ; Dey, Daniel C., eds. Proceedings, 19th Central Hardwood Forest Conference ; 2014 March 10-12 ; Carbondale, IL. General Technical Report NRS-P-142. Newtown Square, PA : US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station : 283-294., pp. 283–294.

Thomas, V., Premakumari, D., Reghu, C., Panikkar, A., Saraswathy, C.A., 1995. Anatomical and histochemical aspects of bark regeneration in Hevea brasiliensis. Annals of Botany 75, 421–426.

Tondi, G., Pizzi, A., 2009. Tannin-based rigid foams : Characterization and modification. Industrial crops and Products 29, 356–363.

Tran-Ha, M., Perotte, G., Cordonnier, T., Duplat, P., 2007. Volume tige d'un arbre ou d'une collection d'arbres pour six essences principales en France. Revue Forestière Française 59, 609–624. doi :https://doi.org/10.4267/2042/16781.

Trincado, G., Burkhart, H.E., 2006. A generalized approach for modeling and localizing stem profile curves. Forest Science 52, 670–682.

Trincado, G., Burkhart, H.E., 2008. A model of knot shape and volume in loblolly pine trees. Wood and Fiber Science 40, 634–646.

Trivelato, P., Mayer, C., Barakat, A., Fulcrand, H., Aouf, C., 2016. Douglas bark dry fractionation for polyphenols isolation : From forestry waste to added value products. Industrial Crops and Products 86, 12–15. doi :https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.014.

Trombetta, D., Castelli, F., Sarpietro, M.G., Venuti, V., Cristani, M., Daniele, C., Saija, A., Mazzanti, G., Bisignano, G., 2005. Mechanisms of antibacterial action of three monoterpenes. Antimicrobial agents and chemotherapy 49, 2474–2478.

Trouy, M.C., 2015. Anatomie du bois : Formation, fonctions et identification. Éditions Quae.

Turner, N.J., Hebda, R.J., 1990. Contemporary use of bark for medicine by two Salishan native elders of southeast Vancouver Island, Canada. Journal of Ethnopharmacology 29, 59–72.

Tyree, M.T., Zimmermann, M.H., 2013. Xylem structure and the ascent of sap. Springer Science & Business Media.

Umezawa, T., 2000. Chemistry of extractives. Marcel Dekker, New York.

Valade, A., Bellassen, V., Luyssaert, S., Vallet, P., Djomo, S.N., 2017. Bilan carbone de la ressource forestiere francaise-Projections du puits de carbone de la filière forêt-bois française et incertitude sur ses déterminants. doi :hal-01629845.

Valette, N., Perrot, T., Sormani, R., Gelhaye, E., Morel-Rouhier, M., 2017. Antifungal activities of wood extractives. Fungal Biology Reviews 31, 113–123.

Välimaa, A.L., Honkalampi-Hämäläinen, U., Pietarinen, S., Willför, S., Holmbom, B., von Wright, A., 2007. Antimicrobial and cytotoxic knotwood extracts and related pure compounds and their effects on food-associated microorganisms. International Journal of Food Microbiology 115, 235–243.

Vallauri, D., Neyroumande, E., 2009. Les forêts françaises : une biodiversité à la fois riche et menacée, in : Annales des Mines-Responsabilite et environnement, ESKA. pp. 75–81.

Van Laar, A., 2007. Bark thickness and bark volume of Pinus patula in South Africa. Southern Hemisphere Forestry Journal 69, 165–168.

Venet, J., 1954. Fabrication de pâtes à papiers à base de bois feuillus. Revue Forestière Française 5, 297–310.

Ver Planck, N.R., MacFarlane, D.W., 2014. Modelling vertical allocation of tree stem and branch volume for hardwoods. Forestry : An International Journal of Forest Research 87, 459–469.

Vieira, J., Matos, P., Mexia, T., Silva, P., Lopes, N., Freitas, C., Correia, O., Santos-Reis, M., Branquinho, C., Pinho, P., 2018. Green spaces are not all the same for the provision of air purification and climate regulation services : The case of urban parks. Environmental Research 160, 306–313.

Vincent, J.R., Ahmad, I., Adnan, N., Burwell, W.B., Pattanayak, S.K., Tan-Soo, J.S., Thomas, K., 2016. Valuing water purification by forests : an analysis of Malaysian panel data. Environmental and Resource Economics 64, 59–80.

Voreux, C., 1987. Un matériau riche d'utilisations : le panneau de fibres de moyenne densité (MDF). Revue Forestière Française 39, 209–214.

Watson, P., Garner, C., Robertson, R., Reath, S., Gee, W., Hunt, K., 2003. The effects of initial tree spacing on the fibre properties of plantation-grown coastal western hemlock. Canadian Journal of Forest Research 33, 2460–2468.

Wehenkel, C., Cruz-Cobos, F., Carrillo, A., Lujan-Soto, J.E., 2012. Estimating bark volumes for 16 native tree species on the Sierra Madre Occidental, Mexico. The Scandinavian Journal of Forest Research 27, 578–585. doi :https://doi.org/10.1080/02827581.2012.661453.

Wei, Q., Leblon, B., La Rocque, A., 2011. On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties : a review. Canadian journal of forest research 41, 2120–2140.

Weiskittel, A.R., Maguire, D.A., Monserud, R.A., 2007. Response of branch growth and mortality to silvicultural treatments in coastal Douglas-fir plantations : Implications for predicting tree growth. Forest Ecology and Management 251, 182–194.

West, P.W., 2009. Tree and forest measurement. Springer.

Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spångberg, K., Lundqvist, S.O., Grahn, T., Hedenberg, Ö., Olsson, L., 2002. Models for predicting wood properties in stems of Picea abies and Pinus sylvestris in Sweden. Scandinavian journal of forest research 17, 330–350.

Willför, S., Hemming, J., Reunanen, M., Eckerman, C., Holmbom, B., 2003. Lignans and lipophilic extractives in Norway spruce knots and stemwood. Holzforschung 57, 27–36.

Yabushita, M., Kobayashi, H., Fukuoka, A., 2014. Catalytic transformation of cellulose into platform chemicals. Applied Catalysis B : Environmental 145, 1–9.

Yang, K., Chen, Y., Chiu, C., Hazenberg, G., 1994. Formation and vertical distribution of sapwood and heartwood in Cryptomeria japonica D. Don. Trees 9, 35–40.

Yang, K.C., Hazenberg, G., 1991. Relationship Between Tree Age and Sapwood/Heartwood Width in Populus Tremuloides Michx. Wood and Fiber Science 23, 247–252.

Yartah, T., 2004. Tell'Abr 3, un village du néolithique précéramique (PPNA) sur le Moyen Euphrate. Première approche. Paléorient' 30, 141–158.

Yazaki, Y., 2015. Utilization of flavonoid compounds from bark and wood : a review. Natural product communications 10, 1934578X1501000333.

Zakrzewski, W., 1999. A mathematically tractable stem profile model for jack pine in Ontario. Northern Journal of Applied Forestry 16, 138–143.

Zhang, S., 1995. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. Wood Science and Technology 29, 451–465.

Zhang, S., 1997. Variations and correlations of various ring width and ring density features in European oak : implications in dendroclimatology. Wood Science and Technology 31, 63–72.

Zhang, S.Y., Owoundi, R.E., Nepveu, G., Mothe, F., Dhôte, J.F., 1993. Modelling wood density in European oak (Quercus petraea and Quercus robur) and simulating the silvicultural influence. Canadian Journal of Forest Research 23, 2587–2593.

Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R., Mencuccini, M., 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. FI.

Zimmermann, M.H., 1978. Hydraulic architecture of some diffuse-porous trees. Canadian Journal of Botany 56, 2286–2295.

Zwenger, S., Basu, C., 2008. Plant terpenoids : applications and future potentials. Biotechnology and Molecular Biology Reviews 3, 1–7.

Title : Modeling the volume of tree compartments rich in extractable compounds (bark and knot) in six main tree species from the Grand-Est and Bourgogne Franche-Comté regions.

Keywords : Bark volume, bark area, knot volume, mixed effect models, environmental factors

Abstract : In a context of renewal of the chemical industry and the search for new outlets for forestry, extractives are becoming increasingly interesting molecules, both ecologically and financially speaking. In order to evaluate the relevance of these molecules as a new resource for the chemical industry and a potential outlet for forestry, it is necessary to make a preliminary evaluation of the resource. This requires knowledge of the volume of compartments rich in extractable material, particularly bark and knots. The present study therefore focuses on modeling bark and knot volumes. It focuses specifically on two French regions, the Grand Est and the Bourgogne-Franche-Comté, and on six important species, *Abies alba*, *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii*, *Quercu robur*, *Quercus patraea*, and *Fagus sylvatica*.

This study is made possible, on one hand, by the use of a large database including numerous measurements of bark thickness made at different heights on the stems of many trees. On the other hand, new samplings have been made to allow X-ray scanning of nodes all along the stem and thus to determine precisely the volume on a computer picture.

In order to model the available amount of bark, three types of models were built, models predicting the volume of bark, models predicting the surface area of bark along the stem and models predicting the thickness of bark at 1m30. The former achieved a relative root mean square error (RMSErel) of 16.7% to 27.5% depending on the species.

The study of bark area models showed that it was possible to use a model independent of diameter-over-bark but that model using this variable are more accurate. The RMSErel achieved by these bark area models varied between 23 and 38% depending on the species and model considered.

This work showed the importance of using the bark thickness at 1m30 as an input data. As it is rarely measured today, it was also modelled using the DBH. This allowed us to show the influence of altitude on bark thickness at 1.30 m for three species: *Abies alba*, *Picea abies*, *Fagus sylvatica*. The models obtained RMSErel of the models ranged from 26.8 to 36 % of RMSErel depending on the species considered.

Finally, knot volumes have started to be studied. Although this work has not been fully completed, it already shows the importance of producing new models in order to fit the predicted knot patterns as closely as possible to reality. Moreover, the quantity of these compounds in the wood seems, at this stage of the study, to be too small to provide a large extractable resource, despite their great intrinsic richness. Their interest could therefore be more in the extraction of specific molecules.

Titre : La modélisation du volume des compartiments riches en composés chimiques extractibles (écorce et nœud) dans six essences d'intérêt des régions Grand-Est et Bourgogne Franche-Comté.

Mots-clés : Volume d'écorce, Surface d'écorce, Volume de nœuds, modèles à effets-mixtes, facteurs environnementaux

Résumé : Dans un contexte de renouvellement de l'industrie chimique et de recherche de nouveaux débouchés pour la foresterie, les extractibles deviennent des molécules de plus en plus intéressantes, tant écologiquement que financièrement parlant. Afin d'évaluer la pertinence de ces molécules comme nouvelle ressource pour la chimie et potentiel débouché pour la foresterie, il est nécessaire de faire une évaluation préalable de la ressource. Ceci nécessite de connaître le volume des compartiments riches en extractibles, particulièrement les écorces et les nœuds. La présente étude s'intéresse donc à la modélisation des volumes d'écorce et de nœuds. Elle se concentre spécifiquement sur deux régions françaises, le Grand Est et la Bourgogne-Franche-Comté et six essences d'importance, *Abies alba*, *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii*, *Quercus robur*, *Quercus patraea*, *Fagus sylvatica*.

Cette étude est rendue possible grâce à l'utilisation d'une grande base de données comprenant des mesures d'épaisseur d'écorce pratiquées à différentes hauteurs sur la tige de nombreux arbres. D'autre part de nouveaux échantillonnages ont eu lieu ce qui a permis d'obtenir, grâce à l'utilisation d'un scanner à rayon X, une image informatique des nœuds et d'en mesurer précisément le volume.

Afin de modéliser la quantité d'écorce disponible trois types de modèles ont été construits, des modèles de prédiction du volume d'écorce, des modèles de prédiction de la surface d'écorce le long de la tige et des modèles de prédiction de l'épaisseur d'écorce à 1m30. Les premiers ont permis d'atteindre une racine de l'erreur quadratique moyenne relative (RMSErel) comprise entre 16.7 % et 27.5 % en fonction des espèces.

L'étude portant sur les modèles de surface d'écorce a permis de mettre en évidence la possibilité d'utiliser un modèle indépendant du diamètre-sur-écorce mais que les modèles utilisant en entrée cet variable sont encore plus précis. Le RMSErel atteint par ces modèles de surface d'écorce varie entre 23 et 38 % en fonction de l'espèce et du modèle considéré. Ce travail a montré l'importance de l'utilisation de l'épaisseur d'écorce à 1m30 comme donnée d'entrée. Celle-ci n'étant aujourd'hui que rarement mesurée, elle a aussi été modélisée à partir du D130. Cela a permis de mettre en évidence une influence de l'altitude sur l'épaisseur d'écorce à 1m30 pour trois espèces : *Abies alba*, *Picea abies*, *Fagus sylvatica*. Les modèles obtenus atteignent un RMSErel allant de 26.8 % à 36 % en fonction de l'espèce considérée.

Enfin, les volumes de nœuds ont commencé à être étudiés. Bien que ce travail n'ai pas été entièrement mené, il montre déjà l'importance de produire de nouveaux modèles de volume de nœuds. De plus leur quantité dans le bois semble, à ce stade de l'étude, trop peu importante pour dégager de grandes ressources en extractible, malgré leur grande richesse intrinsèque. Leur intérêt pourrait donc plus se trouver dans l'extraction de molécules spécifiques.

AgroParisTech
16 rue Claude Bernard
F-75231 Paris Cedex 05