

THESE DE DOCTORAT

pour obtenir le grade de

Docteur d'AgroParisTech

Spécialité : Biologie et écologie des forêts et agrosystèmes

École doctorale n° 581

Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES)

par

Antoine BILLARD

**Pour une valorisation optimisée de la biomasse
forestière basée sur une connaissance de la
variabilité de la masse volumique dans l'arbre**

**Thèse présentée et soutenue le 26/11/21 à 14h
à l'INRAE de Champenoux en salle de conférences**

Composition du jury :

M. Alexis ACHIM, Professeur, Université de Laval	Rapporteur & Examinateur
Mme Tahiana RAMANANANTOANDRO, Maître de Conférences, ESSA	Rapporteuse & Examinatrice
Mme Céline MEREDIEU, Chargée de Recherche, INRAE	Examinatrice
Mme Christine GÉRARDIN, Professeure, Université de Lorraine	Examinatrice
Mme Marie-Christine TROUY, Maître de Conférences, ENSTIB	Examinatrice
M. Rémy MARCHAL, Professeur, ENSAM	Examinateur
M. Francis COLIN, Directeur de Recherche, INRAE	Directeur de thèse
Mme Fleur LONGUETAUD, Chargée de Recherche, INRAE	Co-Encadrante de thèse

Titre : Pour une valorisation optimisée de la biomasse forestière basée sur une connaissance de la variabilité de la masse volumique dans l'arbre.

Mots-clés : Infradensité ; Biomasse ; Tronc ; Écorce ; Nœuds ; Branches

Résumé :

L'infradensité est une propriété physique importante du bois car elle permet d'expliquer le comportement de l'arbre *in situ* et du bois en usage. Actuellement, les bases de données regroupant des moyennes d'infradensité du bois sont majoritairement constituées de moyennes du bois de tronc calculées sur des carottes de sondage prélevées à 1,30 mètre. Ainsi, les variations d'infradensité au sein du tronc, entre les compartiments et dans les compartiments sont complètement ignorées. Pourtant, ces variations peuvent avoir un impact important sur le calcul de la biomasse aérienne ligneuse. De plus, l'écorce et les nœuds étant des compartiments de l'arbre riches en extractibles, il est important de connaître la fraction disponible de ces compartiments afin de tester la faisabilité d'une filière chimie des extractibles. Cette thèse contribue ainsi au projet ExtraFor_Est, visant à caractériser et quantifier la ressource en extractibles des forêts des régions Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté.

Dans cette thèse, trois essences résineuses et trois essences feuillues ont été étudiées : le sapin pectiné, *Abies alba* Mill., l'épicéa commun, *Picea abies* (L.) H. Karst., le Douglas, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, le chêne pédonculé, *Quercus robur* L., le chêne sessile, *Quercus petraea* L. et le hêtre commun, *Fagus sylvatica* L. Pour les essences résineuses, les arbres ont été échantillonnés dans des parcelles testant des intensités d'éclaircies contrastées. Finalement, seules les essences résineuses ont pu être étudiées dans le temps de la thèse mais les autres données ont été préparées pour la suite du projet. Quatre compartiments de l'arbre ont été analysés : le bois de tronc, l'écorce du tronc, les nœuds et les branches. Un tomographe à rayons X a été utilisé afin d'obtenir l'infradensité des compartiments.

Dans un premier temps, une comparaison entre l'infradensité moyenne du bois de tronc mesurée à 1,30 mètre et l'infradensité moyenne des compartiments étudiés a été réalisée ainsi que l'impact de la différence observée sur le calcul de biomasse. Il s'est avéré que l'infradensité moyenne du bois de tronc mesurée à 1,30 mètre est significativement supérieure à l'infradensité moyenne du bois de tronc pour *Abies alba* et *Pseudotsuga menziesii*. Les nœuds, les branches et l'écorce sont majoritairement plus denses que le bois de tronc mesurée à 1,30 mètre. Ces différences d'infradensité entre les compartiments entraînent une sous-estimation ou une surestimation de la biomasse en fonction du compartiment et de l'espèce étudiée, la différence pouvant aller jusqu'à plus de 40 % pour les nœuds, par exemple.

Dans un second temps, la variation de l'infradensité avec la hauteur dans l'arbre a été analysée pour le bois de tronc. Les résultats montrent que le sens de variation dépend de l'espèce. Deux formes de modèles descriptifs, ont été développés pour *Abies alba* et *Pseudotsuga menziesii*, l'une prenant en entrée l'infradensité moyenne mesurée à 1,30 mètre et l'autre ne la prenant pas en compte. Les RMSE relatives pour *Abies alba* et *Pseudotsuga menziesii* sont de 9,9 % et 8,1 %, respectivement, pour le modèle sans l'infradensité moyenne mesurée à 1,30 mètre et 7,6 % et 5,9 %, respectivement, pour le modèle avec l'infradensité moyenne mesurée à 1,30 mètre.

Enfin, l'étude des variations longitudinales et selon la hauteur de l'infradensité de l'écorce du tronc, des nœuds et des branches a été démarrée. Pour l'écorce, l'infradensité diminue avec la hauteur pour *Abies alba*, diminue puis augmente pour *Picea abies* et augmente puis diminue légèrement pour *Pseudotsuga menziesii*. Pour les branches, il a été trouvé que l'infradensité diminue rapidement dans les 50 premiers cm à partir de leur insertion sur le tronc puis reste stable jusqu'à leur apex.

Title: For an optimised valorisation of forest biomass based on a knowledge of the density variability in the tree.

Keywords: Basic density; Biomass; Stem; Bark; Knots; Branches

Abstract:

Basic density is an important physical property of wood as it helps to explain the behaviour of the tree *in situ* and the wood in use. Currently, the databases containing mean wood basic density are mainly composed of mean stem wood calculated on core samples taken at 1.30 meters. Thus, variations in basic density within the stem, between components and within components are completely ignored. However, these variations can have an important impact on the calculation of wood aboveground biomass. Moreover, as bark and knots are components of the tree rich in extractives, it is important to know the available fraction of these components in order to test the feasibility of an extractives chemistry pathway. This thesis contributes to the ExtraFor_Est project, which aims to characterise and quantify the extractible resource of forests in the Grand Est and Bourgogne-Franche-Comté regions.

In this thesis, three softwood and three hardwood species were studied: silver fir, *Abies alba* Mill., Norway spruce, *Picea abies* (L.) H. Karst., Douglas fir, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, pedunculate oak, *Quercus robur* L., sessile oak, *Quercus petraea* L. and European beech, *Fagus sylvatica* L. For softwood species, trees were sampled in plots testing contrasting thinning intensities. In the end, only softwood species could be studied during the time of the thesis, but the other data were prepared for the continuation of the project. Four components of the tree were analysed: stem wood, stem bark, knots and branches. An X-ray tomograph was used to obtain the basic density of the components.

In a first step, a comparison between the mean basic density of the stem wood measured at 1.30 m and the mean basic density of the studied components was carried out and the impact of the observed difference on the biomass calculation. It was found that the mean stem wood basic density measured at 1.30 m is significantly higher than the mean stem wood basic density for *Abies alba* and *Pseudotsuga menziesii*. Knots, branches and bark are mostly denser than stem wood measured at 1.30 m. These differences in basic density between components lead to an underestimation or overestimation of biomass depending on the component and the species studied, the difference being up to more than 40% for knots, for example.

In a second step, the variation of basic density with height in the tree was analysed for stem wood. The results show that the direction of variation depends on the species. Two forms of descriptive models were developed for *Abies alba* and *Pseudotsuga menziesii*, one taking as input the mean basic density measured at 1.30 m and the other not taking it into account. The relative RMSEs for *Abies alba* and *Pseudotsuga menziesii* are 9.9% and 8.1%, respectively, for the model without the mean basic density measured at 1.30 m and 7.6% and 5.9%, respectively, for the model with the mean basic density measured at 1.30 m.

Finally, the study of longitudinal and height-dependent variations in the basic density of stem bark, knots and branches was started. For bark, the basic density decreased with height for *Abies alba*, decreased and then increased for *Picea abies* and increased and then decreased slightly for *Pseudotsuga menziesii*. For branches, it was found that basic density decreases rapidly in the first 50 cm from their insertion on the stem and then remains stable until their apex.