
Retour sur le cubage de l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) en région wallonne

Auteur : Servotte, Maxime

Promoteur(s) : Hebert, Jacques; Fayolle, Adeline

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/3688>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

RETOUR SUR LE CUBAGE DE L'EPICEA COMMUN (*Picea abies* [L.] KARST.) EN REGION WALLONE

SERVOTTE MAXIME

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2016-2017

CO-PROMOTEURS: PR. ADELINÉ FAYOLLE & PR. JACQUES HEBERT

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

Le présent document n'engage que son auteur

RETOUR SUR LES TARIFS EPICEA (*Picea abies* [L.] KARST.) EN REGION WALLONE

SERVOTTE MAXIME

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2016-2017

CO-PROMOTEURS: PR. ADELINE FAYOLLE & PR. JACQUES HEBERT

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu durant la réalisation de ce mémoire et qui contribuent ainsi à la clôture de mes années d'études à Gembloux :

- Les Professeurs J. Hébert et A. Fayolle, de Gembloux Agro-Bio Tech, co-promoteurs de mon mémoire, à qui je mesure ce que je leur dois, pour m'avoir chacun à leur manière soutenu et permis de canaliser mon travail, ainsi que pour leurs relectures attentives ;
- L'Axe Gestion des Ressources forestières (département BIOSE), pour l'accueil au sein des locaux mais également pour la disponibilité de ses membres et leur bonne humeur coutumière aux intermèdes détentes, et aussi pour le café;
- Les membres du jury, pour leur relecture et l'intérêt porté au sujet de mon mémoire ;
- Stéphanie Bonnet, doctorante à l'unité, avec qui tout c'est bien passé, pour son soutien constant, ses conseils, sa folie douce et ses piques stimulantes lors de nos digressions;
- Les modélisateurs fous, Jérôme Perin et Nicolas Latte, envers qui je suis reconnaissant pour leur aide précieuse et leur point de vue dans mes analyses et mon combat contre R ;
- Sébastien Bauwens pour son temps, ses idées et ses réflexions qui m'ont permis d'avancer ;
- L'IPRFW, les cantonnements de Saint Hubert (Madame Pauwels, cheffe de cantonnement) et de Nassogne pour leur collaboration et leur partage des données indispensables à mon travail ;
- Antoine, technicien à l'unité, pour la récolte de données de terrain qui n'a pas été si aisée ;
- Samuel, informaticien à l'unité, pour le soutien matériel et informatique, et pour la gestion des encombrants volants ;
- Mes parents pour leurs encouragements, corsés et directs pour mon père et plus enthousiastes pour ma mère, durant ce mémoire mais aussi au long de mes études.
- Les gembloutois et extérieurs, amis, complices et victimes pour leur présence et leur encouragement pas toujours évident.
- Et enfin parce les oublier serait une faute sans nom au vu de ce qu'ils ont enduré avec moi dans un bureau et à l'extérieur, je tiens à remercier particulièrement les tffistes avec qui j'ai partagé joie sans borne et stress sévère : Florine (qui a dû se poser un tas de questions), SS (collègue de situation), Léo (pour ses idées et sa conversation), Claire et Morgane (pour leur patience infinie), Arnaud, Sébastien, Axel, Bastien, Duff, Laurent et les bichettes....

Résumé

En région wallonne, le cubage des lots d'Épicéas annoncés aux ventes publiques est estimé grâce au tarif de cubage basé sur la circonférence et la hauteur dominante, basé sur la hauteur dominante du peuplement (Dagnelie et al., 1985). Cependant, ces estimations sont une source de discordance entre le Département Nature et Forêt et les scieurs, pour qui les volumes seraient surestimés. Cette étude a été réalisée avec comme objectif principal de tester s'il y a effectivement des différences entre les volumes estimés et les volumes réels. Pour ce faire, les différentes sources potentielles d'erreur dans les estimations ont été examinées à partir de données historiques et actuelles. Les quatre questions suivantes ont spécifiquement été posées. 1) La ressource a-t-elle évolué depuis la construction du tarif en 1985 ? 2) Le tarif est-il biaisé ou est-il possible d'utiliser des modèles plus adaptés et plus précis ? 3) Quel est l'impact des erreurs de mesures sur les estimations de volume bois fort ? 4) Est-ce que le volume annoncé par le DNF lors des ventes publiques correspond au volume bois fort exploitable par le scieur ? L'étude a montré que la ressource avait effectivement légèrement évolué dans sa relation allométrique hauteur – circonférence en réponse à une sylviculture plus dynamique aujourd'hui. Qu'il était possible de construire un tarif plus précis que le modèle actuel, qui présente un léger biais conditionnel pour les arbres de faibles et de très grandes dimensions. De plus, la hauteur dominante est la variable qui affecte le plus la précision des estimations suite à des erreurs de mesures, qui peuvent être évitables par validation avec les hauteurs dominantes calculées par Forestimator. Il a également été démontré que les volumes estimés par le tarif Epicéa n'étaient pas significativement différents des volumes exploités en scierie. Le tarif en vigueur pour l'Épicéa semble précis pour les estimations de volume sauf pour les arbres de faibles et de fortes dimensions qui sont respectivement sur et sous-estimés.. En conclusion, malgré le biais conditionnel au sein du tarif pour les arbres de faibles et grandes dimensions, les estimations de volumes sur écorce par le tarif Epicéa sont précises.

Abstract

In Wallonia for the public sale, the Department of Nature and Forest (DNF) organizes an homogeneous batch of spruce and estimates the volume with the equation based on the dominant height of patch (Dagnelie & al., 1985). But this volume is a critical point for sawyers. They find that the estimations aren't accurate enough because the fitted volume is higher than the real volume. The goal of this study is to analyze the differences between volume estimate and real volume. To determine the potentials origin of the problem, four strategies have been developed to answer the following questions: Is the spruce resource changed? Is the model of volume equation biased? What is the impact of the measurement errors on the volume estimates? And in which extend are the estimated volumes by the DNF different from the volumes effectively exploited in the wood industry? The respective answers are: the spruce is changed, the trees are most height. A more adapted volume model for this specie is found to rectify the conditional bias of the current model for the spruce existing for small or very big dimensions. The most impactful parameters regarding the volume estimate are the circumference and the dominant height. Height is more impactful than circumference. The volume estimates by the DNF and those effectively exploited by wood industry are not statistically different. Conclusion: despite the conditional bias of the current volume-equation model regarding small or very big dimensions, the volume estimates on bark established by the model are accurate.

Table des matières

Introduction générale	3
1. Contexte	3
2. Objectif et questions de recherche	5
3. Plan de travail	6
Partie I : Evolution de la ressource depuis les années 1970 et représentativité de l'échantillon historique	8
1. Introduction.....	8
2. Matériel et méthodes	9
2.1. Données historiques et actuelles	9
Analyse des données	12
3. Résultats et discussion	13
Vue d'ensemble des données historiques et actuelles.....	13
Gradient altitudinal.....	14
Circonférence, hauteur et relation allométrique	15
Défilement	18
4. Conclusion	21
Partie II : Qualité de l'ajustement du tarif de cubage en vigueur pour l'Epicéa et construction de nouveaux modèles	22
1. Introduction.....	22
2. Matériel et méthodes	24
2.1. Échantillons historique	24
2.2. Vérification de l'ajustement du modèle de Dagnelie et al. (1985).....	24
2.3. Ajustement d'un tarif à une entrée paramétré	25
2.4. Ajustement d'un tarif à deux entrées paramétrées	26
3. Résultats et discussion	27
3.1. Exploration graphique	27
3.2. Ajustement du modèle polynomial selon différentes pondération.....	28
3.3. Ajustement d'un nouveau modèle à une entrée paramétrée	31
3.4. Ajustement d'un tarif à deux entrées paramétrées	34
4. Conclusion	36
Partie III : Impact des erreurs de mesure sur l'estimation du volume des arbres	37
1. Introduction.....	37

2. Matériel et méthodes	38
2.1. Données historiques	38
2.3. Analyse des données	39
3. Résultats et discussion	40
3.1. Erreur d'estimation du volume	40
4. Conclusion	45
Partie IV : Comparaison entre le volume DNF, volume scierie et volume tarif de cubage.	46
1. Introduction	46
2. Matériel et méthodes	46
2.1. La ressource actuelle	46
2.2. Comparaison volume mesuré et volume tarif	50
2.3. Comparaison volume bois fort scierie et volume tarif	50
3. Résultats et discussion	51
3.1. Comparaison volume mesuré et volume tarif	51
3.2. Comparaison du volume tarif Epicéa et du volume scierie	52
4. Conclusion	57
Conclusion générale	58
Bibliographie	60

Introduction générale

1. Contexte

En Belgique, selon les chiffres de l'Inventaire Forestier Wallon réalisé entre 1994 et 2012 présenté ci-dessous et sauf source extérieure, la majorité des superficies boisées se situent en Wallonie et représentent 544.000 ha, soit 33% de sa surface. Sur ces 544.000 ha de forêts wallonnes, on considère 479.500 ha de forêt productive, dont 52% appartiennent à des propriétaires privés et 48% sont la propriété des régions, des communes et aussi d'autres propriétaires publics comme les CPAS et dont la gestion est assurée par le Département Forêt et Nature (DNF). Les principales essences exploitées en Wallonie sont les chênes indigènes (chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) et chêne pédonculé (*Quercus robur* L.)) qui à eux deux représentent 18 % de la surface productive totale, le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) avec 9% de la surface productive et l'épicéa (*Picea abies* (L.) Karst). A lui seul, l'épicéa représente 41% du volume sur pieds et 35% de la surface productive totale, 57% de la surface productive des pessières appartiennent à des gestionnaires privés. Le prélèvement annuel moyen calculé entre 2008 et 2012 est d'environ 2,8 millions de m³, ce qui représente un prélèvement supérieur à l'accroissement de la ressource puisque celui s'élève à 2 millions de m³/an. La part de ce volume issue du domaine public jusqu'en 2000 était de plus de 40%. On peut dès lors avoir une idée du volume proposé chaque année en vente publique par le DNF. Du côté des scieries résineuses qui valorisent la ressource, leurs besoins en épicéa pour 2010 s'élevaient à environ 2,5 million de m³. Un tel pourcentage de prélèvement (143%) ne pourra pas se maintenir à un niveau si élevé, puisque les plantations issues de 1950 à 1970 arrivent à terme et que la surface consacrée à l'épicéa diminue (Alderweireld et al, 2015). En effet, une diminution des surfaces de pessières a été constaté de 1300 ha /an, entre 1980 et 2008.

Depuis 2015, l'estimation du volume sur pieds des pessières a été uniformisée pour l'ensemble de la région wallonne (D. Pauwels, com. pers.). En effet, auparavant, chaque cantonnement réalisait l'estimation du volume proposé lors de vente publique selon sa technique, laquelle pouvait varier d'un cantonnement à un autre, et même d'un opérateur à un autre. Généralement le volume était calculé à partir de tarifs locaux notamment basés sur la circonférence et le défilement. Cependant dans un souci d'uniformiser les pratiques au sein du Département Nature et Forêt (DNF), il a été décidé que l'estimation du volume bois fort tige serait réalisée à l'aide du tarif basé sur la circonférence à 1m50 et de la hauteur dominante issu de l'ouvrage « Cubage des arbres et des peuplements tables et équations » qui provient du travail de plusieurs forestier de renom. Le travail de terrain a été réalisé par André Thill, sous la supervision de Jacques Rondeux. Les données ont été traitées par Rudy Palm sous la supervision de Pierre Dagnelie et Jacques Rondeux. Les équations ont été publiées dans un ouvrage dont la dernière version date de 2013. Pour rappel un tarif est une équation allométrique qui permet d'estimer le volume à partir de données mesurables rapidement sur le terrain (Rondeux, 1999). Or, les estimations fournies lors des ventes publiques font l'objet de critique de la part des acheteurs et des exploitants forestiers. L'exactitude des volumes est notamment remise en cause. Les exploitants, qui sont intéressés par le volume sous-écorce après recoupe, se plaignent que les volumes sont surestimés par rapport à la réalité. Les exploitants estiment les volumes sur pied et sur-écorce. De mauvaises estimations sur les volumes annoncés pourraient dès lors impacter la marge bénéficiaire de ces entreprises, qui dans un souci de

rentabilité doivent estimer avec précision la valeur d'un lot. De plus, même au sein de l'administration, l'application d'un tarif basé sur la circonférence et la hauteur dominante ne fait pas l'unanimité.

Pour les ventes publiques, des lots d'épicéas constitués de manière à être homogènes sont proposés à l'exploitation. Pour ces lots la répartition en classe de circonférence et le volume sont renseignés à titre d'information. Toutefois, la définition du volume elle-même est sujette à débat. Les uns parlent du volume bois fort tige (VC22), qui représente le volume depuis la base du tronc jusqu'à 22 cm de circonférence (Rondeux, 1999), les autres de volumes sous écorces, ou encore à différentes recoupes. Il n'est donc pas étonnant de se retrouver avec des discordes concernant les volumes annoncés si celui-ci n'a pas la même définition selon l'acteur forestier en question. Le volume bois fort est estimé par le tarif à une entrée paramètre, la hauteur dominante qui est la moyenne arithmétique des cents plus gros arbres hectare (Rondeux, 1999). Pour se faire la circonférence de chaque arbre est mesurée à 1,50 m (C150) et la hauteur dominante calculée suite aux mesures d'arbres issues de plusieurs points observations fonction de la superficie du lot. C'est deux variables dendrométriques sont les entrées utilisées dans le Tarif Epicéa. De plus, elles définissent le domaine de validité du tarif, c'est-à-dire la gamme de circonférences et de hauteurs dominantes pour laquelle un tarif ou une table de cubage est valide (Rondeux, 1999). Cependant, le domaine de validité du tarif utilisé en Région Wallonne en termes de grosseur et de hauteur des épicéas a été défini sur une ressource de 1973, date de la collecte des données (Palm, 1975). Il possible que la ressource ait depuis évoluée suite aux nouvelles normes sylvicoles appliquées, à la génétique des plants et le type de sylviculture. La possible évolution de la ressource sera étudiée (Étape 1, Figure 2). Après la récolte des variables dendrométrique qui caractérisent les arbres, le volume bois fort individuel est estimé grâce à un tarif de cubage, lequel pour l'Epicéa en Région wallonne est celui ajusté sur le modèle de Dagnelie (Dagnelie et al., 1985). Or la forme du modèle du tarif étant générique pour être applicable à de nombreuses essences, il envisageable de pouvoir utiliser d'autres modèles mieux adaptés à l'Epicéa, ou ajustés différemment (étape 2, Figure 2). Cependant, même avec une ressource forestière qui n'aurait pas évolué et un tarif précis, des erreurs dans les estimations de volumes bois fort restent possibles suite à des erreurs de mesures sur le terrain. En effet, la hauteur de mesure de la circonférence et la méthode de mesure de la hauteur dominante ne sont pas toujours correctes. Pour certains, la circonférence doit être prise plus haut pour tenir compte du volume de la souche laissée en forêt, de même la hauteur dominante n'est pas toujours considérée par d'autres comme représentative des arbres du peuplement. La quantification de l'impact de ces erreurs sera également menée (étape 3, Figure 2). Une fois ces informations récoltées, les lots sont proposés à la vente lors de ventes publiques par soumission organisées par le DNF dans des catalogues accessibles à l'avance sur demande, pour que les potentiels acheteurs puissent se renseigner sur les lots et même les visiter, et ainsi se faire une idée de leur valeur grâce à leurs propres tables ou tarifs. À ce niveau ci existe aussi un conflit, il arrive couramment que le volume VC22 estimé par le DNF et celui estimé par les scieurs diffère du fait des méthodes d'estimations distinctes. Une fois le lot acheté, celui est exploité et les arbres sont recoupés à différentes longueurs soit selon l'utilisation prévue du lot, soit pour le transport ou dues à l'abattage et des cassures occasionnées. Ainsi le volume débardé ne correspond pas forcément au volume VC22 annoncé pour le lot dans les catalogues de vente, puisque une part du volume reste en forêt du au coût d'exploitation et aux différentes recoupes qui font que la circonférence finale du dernier billon ou celle la grume n'est pas forcément égale à 22 cm. Enfin les grumes sont amenées en scierie ou le volume de chacune sera mesuré après le passage à l'écorceuse. Encore une fois, un volume avec une définition différente est mesuré à cette étape. Le scieur achète un volume renseigné par le DNF comme le volume bois fort sur écorce suite aux estimations du tarif Epicéa, mais ce dernier scie et transforme un volume sous écorce et de de grume de longueur

variable. Il sera donc procédé à la comparaison des volumes DNF et des volumes scierie pour évaluer s'il y a des différences significative entre les deux (étape 4, Figure 2).

Le fait qu'il y ait une différence entre l'estimation et la réalité n'est pas une surprise, puisque un tarif de cubage, peu importe le nombre d'entrée qu'il utilise, fournit une estimation de volume qui inclut une erreur de prédiction. La variabilité naturelle du volume des arbres en termes de l'erreur moyenne reconnu varie selon les dimensions de l'individu mesuré, celle-ci est inférieure à 8 % pour les grands arbres ou peut être supérieure pour les arbres de faibles grosseurs (Dagnelie, Palm, Rondeux ; 2013). De plus, même si le modèle polynomiale de Dagnelie (Dagnelie et al., 1985) est précis et présente une exactitude élevée entre les bornes des gammes de dimensions. Une fois que l'on s'approche des bornes ou que l'on les dépasse (circonférences ou hauteur hors du domaine) les prédictions de volume sont d'autant plus sujettes à caution. Sachant qu'un tarif ne peut être utilisé que pour l'essence, la zone géographique et le domaine de dimension sur lequel il a été construit (Rondeux, 1999), il existe une panoplie de tarifs selon la région géographique dont ils sont issus mais aussi les variables d'entrées utilisées. Variables qui sont des données facilement mesurable sur le terrain (Rondeux, 1999). Les tarifs peuvent également différer selon qu'ils soient établis sur des variables transformées ou non. Afin d'exploiter ces diverses équations allométriques pour des questions de recherches, divers catalogues rassemblant les équations ont été constitués, tel « Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe » de Dimitris Zianis, Petteri Muukkonen, Raisa Mäkipää et Maurizio Mencuccini en 2005 qui permet de compilé les tarifs et leurs propriétés.

2. Objectif et questions de recherche

L'objectif de cette étude est donc d'éclaircir cette situation afin de savoir si oui ou non les volumes annoncés lors des ventes publiques diffèrent de manière significative de la réalité. Il s'agira également d'apporter des réponses concernant l'imprécision énoncée par les scieurs, de savoir si celle-ci est causée par le tarif lui-même, par l'évolution de la ressource depuis le dernier ajustement des tarifs dans les années 1985, ou une mauvaise application des équations ou des mesures sur le terrain.

Pour se faire, l'étude tente de répondre à plusieurs questions de recherche :

1. Les équations de Dagnelie sont-elles toujours d'actualité ou seraient-elles moins précises suite l'évolution éventuelle de la ressource ?
2. Est-il possible d'utiliser d'autres modèles plus précis ou inclure d'autres variables au tarif Epicéa actuel que pour le rendre plus précis?
3. Dans quelle mesure les erreurs de mesures terrains se propagent-elles dans l'estimation des volumes ?
4. Le volume bois fort estimé par le DNF est différent du volume exploitable pour les scieurs ?

3. Plan de travail

Pour répondre aux objectifs de manière claire, ce travail a été divisé en 4 parties relativement autonomes et complémentaires.

- 1. Evolution de la ressource et représentativité**
 - A. Représentativité le long du gradient environnemental
 - B. Circonférence , hauteur et relation allométrique
 - C. Sylviculture
- 2. Qualité de l'estimation du volume**
 - A. Modèle original Dagnelie
 - B. Qualité des prédictions des autres modèles
 - C. Meilleur modèle
 - D. Intégration de l'âge dans les paramètres du tarif
- 3. Propagation des erreurs**
 - A. Erreur de mesure
- 4. Quantification des tarifs**
 - A. Erreur des mesures sur pied
 - B. Estimation du volume à hauteur de recoupe VC22
 - C. Estimation du volume en scierie

Figure 1: plan de travail de l'étude

L'approche de l'étude a consisté à définir quatre objectifs particuliers afin de répondre à la problématique d'imprécision supposée sur les volume bois fort. Les données utilisées dans cette recherche proviennent de 4 origines bien distinctes. L'échantillon d'épicéas ayant servi à la construction des tarifs dont la première version publiée par Palm et Thill date de 1975 (échantillon historique). L'inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie (IPRFW) a communiqué des données de plusieurs cycles de l'inventaires (échantillon IPRFW). Deux récoltes de données ont également été réalisées dans le cadre de ce travail, l'une sur des coupes de blancs étocs et d'éclaircies (jeu terrain) ; Et la seconde dans une scierie résineuse à Saint-Vith (échantillon scierie).

Le premier objectif spécifique est de vérifier la représentativité des épicéas utilisés pour construire les tarifs de cubage de l'Épicéa et de se rendre compte si la ressource a évolué entre 1975 et aujourd'hui. Afin de répondre à cette première question, les structures diamétriques, l'effet altitude, la relation hauteur-circonférence et le défilement de plusieurs des jeux ont été analysés.

Le second objectif, porte sur la qualité de l'ajustement du tarif à une entrée paramétrée de Dagnelie. Pour ce faire, plusieurs modèles ont été comparés à celui de Dagnelie par l'analyse des estimations de volumes sur la population statistique historique.

La troisième partie de l'étude porte sur la quantification de l'erreur et sa propagation.

Enfin le dernier objectif vise à comparer les volumes DNF et les volumes scierie dans le but de relever une éventuelle différence entre les volumes annoncés aux catalogues de ventes et les volumes exploités et la quantifier.

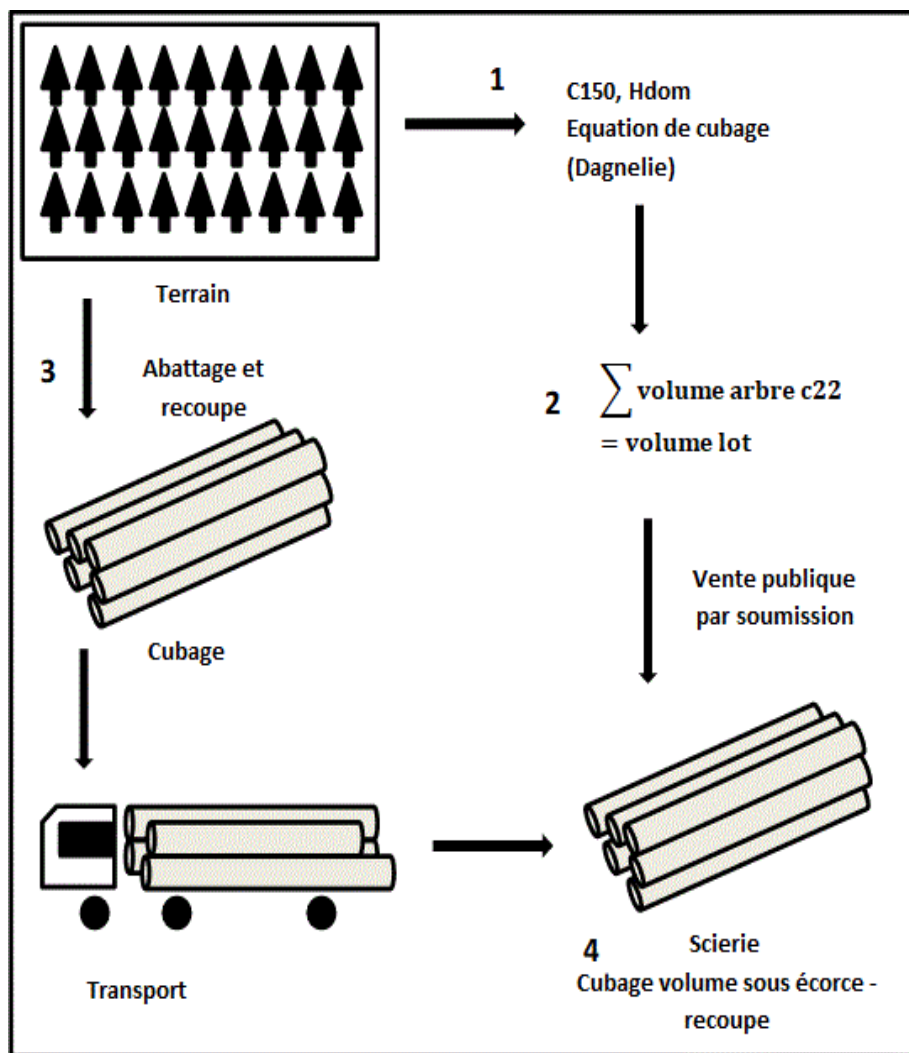


Figure 2 : Schéma de l'exploitation d'un lot arbres avec les différentes étapes de l'analyse.

Partie I : Evolution de la ressource depuis les années 1970 et représentativité de l'échantillon historique

1. Introduction

Préalablement aux ventes publiques, les agents du DNF procèdent à un martelage, préparent des lots de bois homogènes et enregistrent leurs caractéristiques : essence, qualité, nombre de tiges et volume estimé par catégorie de grosseur via des tarifs de cubage. Un tarif de cubage est une équation statistique qui fournit une estimation du volume total ou partiel d'un arbre à partir de ses caractéristiques dendrométriques, comme la circonférence ou la hauteur qui sont aisément mesurables sur le terrain (Lanly, 1965 ; Cailliez, 1980 ; Rondeux, 1999). Ces tarifs ne sont valables que pour l'essence sur lesquels ils sont construits, pour une gamme de dimensions semblables à ceux-ci et pour la zone géographique dont ils sont issus (Rondeux, 1999), on parle du domaine de validité d'un tarif. Le volume dont il est question tout au long de cette partie, est le volume bois fort. C'est-à-dire le volume de la tige sur écorce depuis le sol jusqu'à une découpe à 22 cm de circonférence.

Les volumes affichés en vente publique pour l'Epicéa sont souvent source de désaccord entre le DNF et les scieurs. L'avis des scieurs est que les volumes annoncés seraient surestimés. L'évolution de la ressource par rapport aux arbres avec lesquels les tarifs ont été construits pourrait expliquer cette différence annoncée. Pour rappel, les tarifs de cubage de l'Epicéa que l'on retrouve dans les documents techniques ont été établis à partir de mesures destructives sur des arbres en 1972 (Palm, 1973), il y a donc 45 ans. La sylviculture influence la forme et le volume des arbres selon les différents traitements et interventions sylvicoles (distances de plantation mais aussi fréquence, intensité et type des coupes d'éclaircie) dont bénéficie le peuplement. Or à l'époque de l'élaboration, les normes sylvicoles appliquées dans le secteur public étaient différentes, par exemple, à cette époque les densités de plantation étaient très élevées, l'élagage de pénétration était effectué 16-18 ans après la plantation, les pessières subissaient une première coupe d'éclaircie vers 25 ans et renouvelées à intervalle de 3-4 ans puis 5 à 6 ans avec le vieillissement du peuplement (Thill & Palm, 1975). Aujourd'hui les densités de plantation sont moindres et les peuplements sont conduits de manière plus dynamique.

Dans cette première partie, l'évolution de la ressource en réponse à une sylviculture plus dynamique depuis les années 1970 a été étudiée afin de savoir si l'échantillon sélectionné pour élaborer les tarifs et tables de cubage (Dagnelie et al, 1985), échantillon historique, est représentatif de la ressource actuelle. L'analyse de l'évolution de la ressource repose sur trois approches : (i) le gradient environnemental échantillonné (plus spécifiquement altitudinal), (ii) la gamme de dimensions des arbres échantillonnés (et l'allométrie hauteur-circonférence) et (iii) la forme des tiges (défilement) ; pour les raisons détaillées ci-dessous.

- (i) Dans le but de tester la représentativité spatiale de l'échantillon historique, avec lequel les tarifs ont été élaborés, et la gamme des conditions environnementales échantillonnées, la distribution des épicéas le long du gradient altitudinal a été analysée, et comparée à la distribution actuelle de la ressource, tel que représentée dans l'inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie (IPRFW, échantillon actuel ci-après). En effet, en région wallonne les territoires écologiques sont fortement liées à l'altitude (Van den Perre et al., 2015).
- (ii) Afin de vérifier la validité du tarif, les gammes de dimensions (circonférence et hauteur) des épicéas dans l'échantillon historique et dans l'échantillon actuel de l'IPRFW ont été comparées. Comme le volume dépend de la relation qui lie la circonférence et la hauteur des arbres, la relation allométrique entre la hauteur et la circonférence a également été comparée entre l'échantillon historique et l'échantillon actuel, en intégrant le statut social des arbres dans l'analyse.
- (iii) Pour tester l'effet d'une sylviculture différente, la forme des arbres, et plus précisément le défilement des épicéas dans l'échantillon historique a été analysé, été comparé au défilement des arbres actuels provenant de plusieurs lots d'Ardenne et mesurés à l'occasion de la première transformation en scierie. Le défilement traduit la diminution de circonférence par mètre entre 1,5 m et la moitié de la hauteur de la tige (Rondeux, 1999). Ces données de scierie viennent compléter la description de la ressource actuelle pour ce qui est de la forme des arbres.

2. Matériel et méthodes

2.1. Données historiques et actuelles

2.1.1. L'échantillon historique

Pour l'élaboration des tarifs et tables de cubage pour l'Épicéa, un total de 991 arbres issus de 57 peuplements ont été mesurés par des opérateurs expérimentés (Palm, 1973). Les pessières qui ont été sélectionnées sont des pessières pures équiennes, issues de campagnes de plantation des landes, des fagnes et de terre agricoles en friches, et les densités de plantations variaient entre 4444 et 2500 plants par hectare (Thills & Palm, 1975). Parmi ces 57 peuplements, 40 se situaient dans la province du Luxembourg, 16 dans la province de Liège et un seul était issu de la province de Namur. Parmi ces peuplements, 43 provenaient de la forêt publique et le reste de propriétés privées. L'altitude et la hauteur dominante sont disponibles pour l'ensemble des peuplements. Sur les 991 épicéas mesurés lors de cet échantillonnage, 357 sont issus de coupes rases, 313 d'éclaircies et 321 de chablis. Pour chaque arbre, la hauteur totale (du sol jusqu'à l'apex) et la hauteur de bois fort tige (du sol jusqu'à circonférence 22 cm) ont été mesurées en centimètres après abattage. Le statut social (dominant ou non) de chaque arbre a été déterminé en comparant la hauteur mesurée de l'arbre à la hauteur dominante du peuplement. Tous les arbres dont la hauteur est supérieure ou égale à la hauteur dominante du peuplement ont été considérés comme dominant. Les mesures de circonférence ont été réalisées au mètre ruban tous les mètres jusqu'à 10 m puis tous les deux mètres jusqu'à l'apex, et sont exprimées en centimètres. Le volume en dm³ de chaque épicéa a été obtenu par la méthode des billons successifs, le volume de chacun des billons étant calculé à partir de la formule du tronc de cône (Rondeux, 1999).

2.1.2. La ressource actuelle

2.1.2.1. A partir des données de l'IPRFW

Les données de l'IPRFW ont été utilisées dans cette partie, afin d'examiner les différences environnementales entre l'échantillon historique et la ressource actuelle, mais aussi pour comparer la gamme de dimensions dans les deux échantillons. La relation allométrique entre la hauteur et la circonférence a également été examinée dans les deux échantillons, en intégrant le statut social des arbres dans l'analyse. L'IPRFW s'appuie sur un échantillonnage systématique étendu à l'ensemble de la région Wallonne à raison d'une placette par 50 ha. La cellule scientifique de l'inventaire (Sébastien Bauwens, avec l'accord de Hugues Lecomte) a transmis les caractéristiques dendrométriques (hauteur et circonférence à 1,50 m) de 6857 épicéas mesurés sur pied par les agents de terrain entre 1994 et 2012, considérés comme représentatifs de la ressource actuelle. Les peuplements équiennes et purs correspondant couvrent 5 écorégions mais sont majoritairement situés en Ardenne.

La méthodologie suivie par l'inventaire dans le cas de pessières consiste notamment à mesurer la hauteur totale (en m) et la circonférence (en cm) à 1,50 m du sol des plus gros arbres dans chaque placette de 2,5 ares. Les mesures ont donc été prises sur les arbres dominants. Le nombre d'individus mesurés par placette dépend de la circonférence de ceux-ci. Si la circonférence moyenne des arbres est inférieure à 70 cm, seulement les deux plus gros arbres sont mesurés. Ce nombre passe à trois pour une circonférence moyenne comprise entre 70 et 119 cm et à cinq si la circonférence moyenne est supérieure à 120 cm. Les mesures sont prises à l'aide d'un vertex pour la hauteur et d'un mètre ruban pour la circonférence (Rondeux & Lecomte ; 2010).

De plus, pour comparer les différences de sylviculture entre 1985 et aujourd'hui à travers les densités appliquées tout au long de la révolution, l'IPRFW a également communiqué les densités d'arbres à l'hectare (NHA) et l'âge de 3954 pessières du cycle de 1984 et de 1459 pessières de l'inventaire actuellement en cours. Pour l'inventaire de 1984 les mesures ont été réalisées entre 1978 et 1982. Tandis que pour le second les mesures ont été prises entre 2008 et 2015.

A partir des données de première transformation

Pour examiner le défilement des arbres actuellement exploités en Région Wallonne et tester l'effet d'une sylviculture plus dynamique depuis les années 1970 sur la forme des arbres, un total de 350 grumes d'épicéa issues de peuplements de Libin, Saint Hubert, Burmontige, Vielsam, Jalhay, Theux, Saint Vith, Elsenborn, Butgenbach ont été mesurées en scierie. Parmi l'ensemble des grumes proposées à la première transformation, une sélection des grumes a été réalisée sur base d'un tri visuel pour ne choisir que celles qui présentaient une conformation standard (sans défaut apparent) le long de la grume.

Les valeurs de 2 diamètres perpendiculaires sous écorce exprimés en mm ont été mesurées tous les mètres par scanner laser. Le volume de la grume (dm³) est calculé par la formule de Huber, à partir du diamètre à mi-longueur et de la longueur de la grume. Pour ces grumes, la hauteur de la souche et la longueur de la

tête ne sont pas connues et devront être estimées pour recalculer les circonférences à 1,50 m et à mi-longueur, et la hauteur totale (voir ci-après l'approche développée pour la reconstruction des épicéas).



Figure 3 : Grume écorcée à la sortie des scanners de mesure. Avec le code indiquant son origine sur sa face.

Reconstruction des épicéas

Pour ces données issues d'une scierie, la hauteur de souche n'est pas connue de même que la hauteur totale. En effet, les arbres sont recoupés à une longueur maximale de 24 mètres pour autoriser leur transport. Les pointes sont regroupées sans pouvoir associer par la suite la grume dont elles proviennent. Il est donc impossible de reconstituer l'arbre une fois à la scierie (2017 Hoffmann, com. pers.). Pour reconstituer les arbres, une approche de modélisation statistique a été développée (Figure 1). Les différentes étapes de la modélisation sont détaillées ci-après.

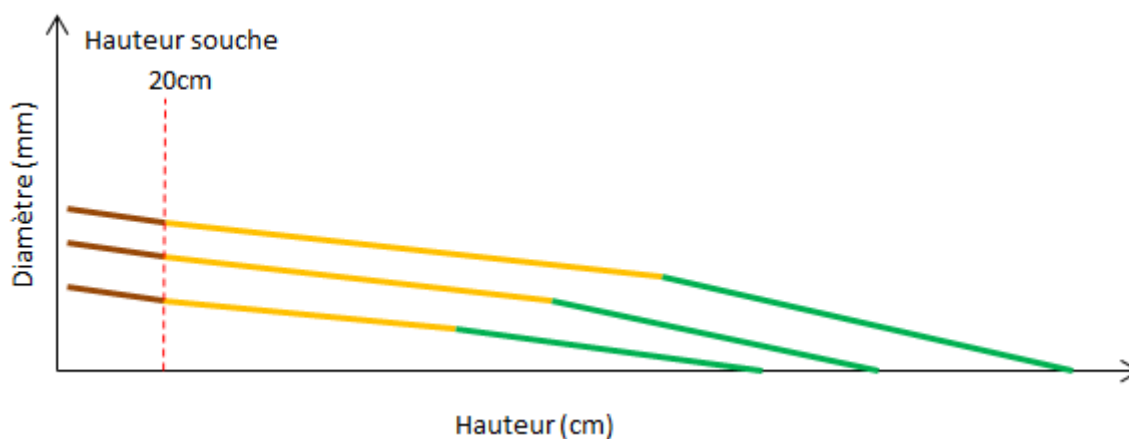


Figure 4: Profil schématique de 3 épicéas après reconstruction de la base et de la tête. La souche est représentée en brun, la bille en jaune et la tête en vert.

Etape 1. La hauteur de la souche a tout d'abord été supposée constante et égale à 20 cm (Jacques Hébert, com. pers., en brun sur la Figure 4) de telle sorte que le niveau de 1,50 m de l'arbre sur pied se situe à 1,30 m de la base de la grume.

Etape 2. Le diamètre sous écorce à 1,30 m de la base de chaque grume est estimé par interpolation linéaire entre les mesures de diamètres prises à 1 m et à 2 m.

Etape 3. Le diamètre sur écorce a ensuite été estimé en additionnant le diamètre sous-écorce à deux fois l'épaisseur d'écorce. L'épaisseur de l'écorce a été estimée par la formule de Dagnelie et al. (1985) qui

exprime l'épaisseur d'écorce (E en mm) en fonction de la circonférence (C en mm), $E = -0,23783 \times 10^{-2} + 0,78826 \times 10^{-2} \times C - 0,67 \times 10^{-5} \times C^2$.

Etape 4. Ce diamètre sur-écorce a ensuite été converti en circonférence.

Etape 5. La longueur de tête de chaque bille (en vert sur la Figure 4) a ensuite été estimée, à partir d'une équation spécifique à chaque classe de longueur de grume, et ajustée sur l'échantillon historique. Dans l'échantillon historique, la longueur de tête de chaque arbre a été obtenue en soustrayant la longueur de grume à la hauteur totale de l'arbre. Cette longueur de tête a ensuite été reliée à un prédicteur, la circonférence du fin bout de la grume. Une équation a ainsi pu être développée pour chaque classe de longueur de grume (Tableau 1)

Tableau 1 : Paramètres de la régression linéaire reliant la longueur de tête (Lg_tête, en cm) à la circonférence fin bout de la grume en (Cfb, en mm) pour différentes classes de longueurs de grume $Lg_tête = a + b \times Cfb$

Longueur grume (cm)	<i>a</i>	<i>b</i>	R ²
1520	127,56	4,551	0.87
1620	64,957	4,685	0.87
1720	95,803	4,365	0.86
1820	81,758	4,247	0.88
1920	81,549	4,099	0.86
2020	74,962	3,967	0.88
2120	83,619	3,799	0.85
2220	45,005	3,872	0.87

Une fois les arbres reconstruits, la circonférence à 1,50 m (C150 en cm) sur pied (ou à 1,30 m le long de la grume) et la circonférence à mi-hauteur (C0.5H, en cm) ainsi que la hauteur totale et la mi-hauteur, ont ainsi pu être obtenues, et par la suite utilisées pour le calcul du défilement (K'), et l'estimation du volume bois fort (VC22, en dm³) à partir du tarif à deux entrées (C150 et Htot).

Analyse des données

Dans le but d'examiner la représentativité spatiale de l'échantillon historique par rapport à la ressource actuelle, un test de Chi² a été réalisé pour comparer les distributions de fréquences par classe d'altitude. Le gradient altitudinal a été découpé en classe d'altitude de 50 m, sauf pour la première classe qui est comprise entre 0 et 250 m et la dernière, elle comprise entre 600 et 700 m.

Afin de vérifier la validité du tarif, les gammes de dimensions (circonférence et hauteur) des épiceas dans l'échantillon historique et dans l'échantillon actuel ont été comparées. Ensuite, la relation allométrique entre la hauteur et la circonférence a également été étudiée entre l'échantillon historique et l'échantillon actuel, pour les arbres dominants (seuls mesurés dans l'IPRFW). Trois modèles allométriques ont été ajustés aux données, un modèle linéaire (M1, $H_{tot} = a + b \times C150$), un modèle

puissance (M2, $H = a \times C150^b$) et un modèle asymptotique (M3, $H_{tot} = (a \times C150) / (b + C150)$). Dans le dernier modèle correspond au modèle de Michaelis Menten, et a récemment été proposé pour l'étude des relations allométriques (Fayolle et al., 2016 ; Molto & al, 2014). Dans ce modèle, la valeur du paramètre a correspond à la hauteur maximale asymptotique. Il est apparu après observation des valeurs prises par le critère d'Akaike (AIC) et par l'erreur résiduelle (RSE) que le modèle asymptotique est le meilleur pour décrire la relation entre la hauteur et la circonférence (résultats non présentés, les valeurs d'AIC et de RSE sont simplement reportées). Pour tester les différences d'allométrie hauteur - circonférence entre l'échantillon historique et l'échantillon actuel, le modèle de Michaelis Menten a été dérivé en 3 sous-modèles, incluant un effet source sur les deux paramètres (M3.1) sur le paramètre a uniquement (M3.2) et sur le paramètre b uniquement (M3.3). Ces trois sous modèles ont été comparés au modèle général sur base de l'AIC et de l'AICw qui correspond à la probabilité du modèle à être le meilleur parmi les modèles testés et sachant le jeu de données. La structure des résidus des modèles sélectionnés a été examinée graphiquement (résultats non montrés).

Pour décrire le changement de sylviculture depuis les années 1970, une analyse complémentaire a été réalisée sur les données de l'IFPRW, et spécifiquement une comparaison des NHA par classes d'âge des pessières pour les deux cycles de l'inventaire (1984 et 2015), considérés comme représentatif de la ressource historique et actuelle, respectivement. Pour se faire, les pessières ont été groupées en classe d'âge de 10 à 130 ans par intervalle de 10 ans, et les valeurs moyennes de NHA par classes et par cycles de l'inventaire (1984 et 2015) ont été comparées.

Pour tester l'effet d'une sylviculture différente, le défilement des épicéas dans l'échantillon historique a été analysé et comparé au défilement des arbres actuels provenant de plusieurs lots d'Ardenne et mesurés à l'occasion de la première transformation en scierie. Le défilement (K') de chaque arbre de l'échantillon historique et du jeu de données actuel issu des observations faites à la scierie a été calculé grâce à l'équation suivante : $K' = (C150 - C0,5H) / (0,5H - 1,5)$. Le test t de Student a été utilisé pour tester la différence de défilement entre la ressource historique et actuelle, en moyenne. Une analyse de covariance (ANCOVA) a été utilisée pour tester l'effet de la ressource (historique ou actuelle) sur la relation entre le défilement et la circonférence des arbres.

3. Résultats et discussion

Vue d'ensemble des données historiques et actuelles

Un certain nombre de jeux de données ont été rassemblés dans cette étude. Le jeu de données historiques utilisé par Dagnelie et al. (1985) pour établir les tarifs de cubage à une et deux entrées actuellement utilisés pour estimer le volume des arbres comporte 991 arbres, issus de 57 sites. Le jeu de données de l'IPRFW pour l'Épicéa, comporte 6857 arbres utilisés à l'échelle arbre pour vérifier le domaine de validité du tarif de cubage en terme de dimension. A l'échelle peuplement, 5413 sites issus deux cycles d'inventaire sont utilisés pour tester le changement de sylviculture, à travers l'étude des NHA. Le jeu de données issu des observations faites à la scierie Hoffman comporte 350 arbres et est utilisé dans cette partie pour tester l'effet d'une sylviculture plus dynamique sur la forme des arbres, et plus spécifiquement sur le défilement.

Les caractéristiques des jeux de données sont reprises ci-dessous (Tableau 2).

Variable	Échantillon historique	Ressource actuelle	
		IPRFW	Scierie
N	991	6857	350
Altitude (m)	[275 ; 635]	[80 ; 677]	
C150 (cm)	106.5 [22 ; 267]	121 [20 ; 262]	136.20 [73.31 ; 204.30]
H (cm)	2495 [450 ; 4260]	2610 [450 ; 4150]	2080 [988 ; 2389]
K' (cm/m)	3,11 [1,738 ; 5,831]		3,15 [1,053 ; 7,308\$]

Tableau 2: Caractéristique des différents jeux de données utilisés pour décrire l'évolution de la ressource en Épicéas depuis les années 1970 et tester la validité des tarifs de cubage employés par le DNF. Deux jeux de données sont présentés, le premier est l'échantillon historique. Le second, échantillon représentant la ressource actuelle est divisé en échantillon de l'inventaire et l'échantillon de la scierie. Pour chaque échantillon sont repris la moyenne, le minimum et le maximum des variables altitude, circonférence (C150), hauteur (H) et défilement (K'). Le nombre d'arbres par échantillon est également repris. L'étude du domaine de validité du tarif et de la relation allométrique sont réalisées sur l'échantillon historique et l'échantillon de l'IPRFW via l'étude des circonférences et des hauteurs. La représentativité spatiale a été étudiée le long du gradient altitudinal pour l'échantillon historique et l'échantillon IPRFW. L'effet d'un changement de sylviculture a été analysé à travers le défilement des épicéas de l'échantillon historique et l'échantillon scierie.

Gradient altitudinal

Dans le but de tester la représentativité spatiale de l'échantillon historique avec lequel les tarifs ont été élaborés, et la gamme des conditions environnementales échantillonnées, la distribution des épicéas le long du gradient altitudinal (en rouge, Figure 5) a été analysée, et comparée à la distribution actuelle de la ressource, tel que représentée dans l'IPRFW (en bleu, Figure 5). On observe une distribution unimodale des fréquences pour les deux jeux de données avec un optimum entre 400 et 500 m d'altitude. La distribution des données de l'inventaire couvre une plus large gamme d'altitude et possède un maxima pour la classe]450-500] m d'altitude. La distribution des données historiques est plus restreinte, elle ne commence qu'à partir de la classe]250-300] m. De plus, elle possède deux pics pour les classes altitudinales de]450-500] et]500-550] m. A l'exception de ces deux classes, les fréquences par classes pour l'échantillon historique sont toujours inférieures à celle de l'IPRFW. Néanmoins, les classes de]350-400],]400-450] et]600-700] m présentent des fréquences absolues assez proches entre les deux sources de données. Cela n'est pas le cas des autres classes. Les deux distributions sont significativement différentes d'après le résultat du test Chi² ($X^2 = 325,6$, pour 9 degrés de liberté, et $P < 0.001$).

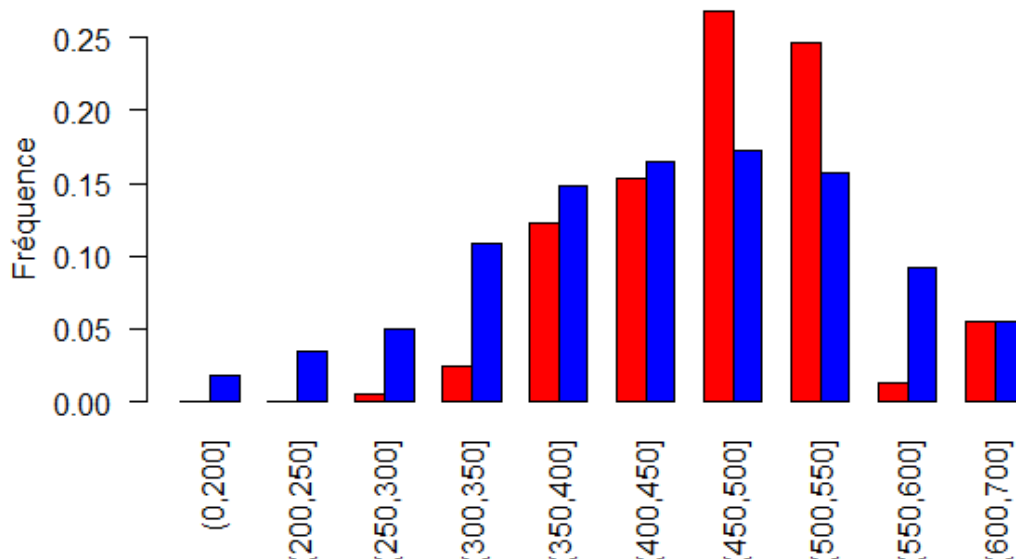


Figure 5: Distribution des arbres en fonction de l'altitude dans les deux jeux de données (historique en rouge et IPRFW en bleu).

Ces résultats montrent qu'il existe une différence significative dans la répartition des arbres sur le gradient altitudinal entre l'échantillon historique et actuel, notamment du fait que l'échantillon historique ne comportait pas d'arbres issus de sites de basses altitudes. Ces différences sont néanmoins faibles, et les deux jeux de données contiennent un grand nombre de sites de « hautes » altitudes, pour la plupart situés en Ardenne, zone de production principale de l'Epicéa (IPRFW, 2012). Historiquement, 18% de la ressource en Epicéa était située à une altitude inférieure à 350 m (Claessens et al., 2001), aujourd'hui la proportion est comparable d'après les données de l'inventaire (Figure 5).

Circonférence, hauteur et relation allométrique

Afin de vérifier la validité du tarif, les gammes de dimensions (circonférence et hauteur) des épicéas dans l'échantillon historique et dans l'échantillon actuel ont été comparées. La circonférence des arbres échantillonnés dans le jeu de données historique varie de 22 à 267 cm, et dans l'inventaire de 20 à 262 cm. Ces variations sont donc semblables, et le domaine de validité du tarif est respecté en ce qui concerne la gamme de circonférence. La hauteur des arbres échantillonnés dans le jeu de données historique varie de 450 à 4260 cm, et dans l'inventaire de 450 à 4150 cm. Ces variations sont donc semblables, et le domaine de validité du tarif est respecté en ce qui concerne la gamme de hauteur.

Comme le volume dépend de la relation qui lie la circonférence et la hauteur des arbres, la relation allométrique entre la hauteur et la circonférence a également été comparée entre l'échantillon historique et l'échantillon actuel, en intégrant le statut social des arbres dans l'analyse. Pour tester les différences d'allométrie hauteur - circonférence entre l'échantillon historique (pour les arbres dominants) et l'échantillon actuel, le modèle de Michaelis Menten a été dérivé en 3 sous modèles, incluant un effet source de données sur les deux paramètres (M3.1) sur le paramètre a uniquement (M3.2) et sur le

paramètre b uniquement (M3.3). Ces trois sous-modèles ont été comparés au modèle général sur base de l'AIC et de l'AICw (Tableau 3).

Tableau 3 : Sous modèles allométriques hauteur – circonférence, modèle de Michaelis Menten, incluant un effet source de données sur les deux paramètres (M3.1) sur le paramètre a uniquement (M3.2) et sur le paramètre b uniquement (M3.3). Ces trois sous-modèles ont été comparés au modèle général sur base de l'AIC et de l'AICw qui correspond à la probabilité du modèle à être le meilleur modèle parmi les modèles testés sur les données de l'échantillon historique n'incluant que des arbres avec un statut social de dominant, et de l'échantillon de la ressource actuelle. Le meilleur sous modèle a les critères de sélection en gras (AIC le plus petit et AICW le plus haut).

Modèles	Données historique et actuelle (N=7145)	
	AIC	AICw
M3.1	107512,8	1
M3.2	107600,3	9.99*10⁻²⁰
M3.3	107573,2	7,66*10⁻¹⁴

Il ressort que le sous modèle qui exprime le mieux la relation allométrique hauteur - circonférence est celui qui tient compte de l'effet de la source sur les deux paramètres du modèle de Michaelis Menten M3.2 (Tableau 3). Afin de représenter l'effet source, le sous modèle incluant l'effet source sur les deux paramètres a été réalisé (Figure 6).

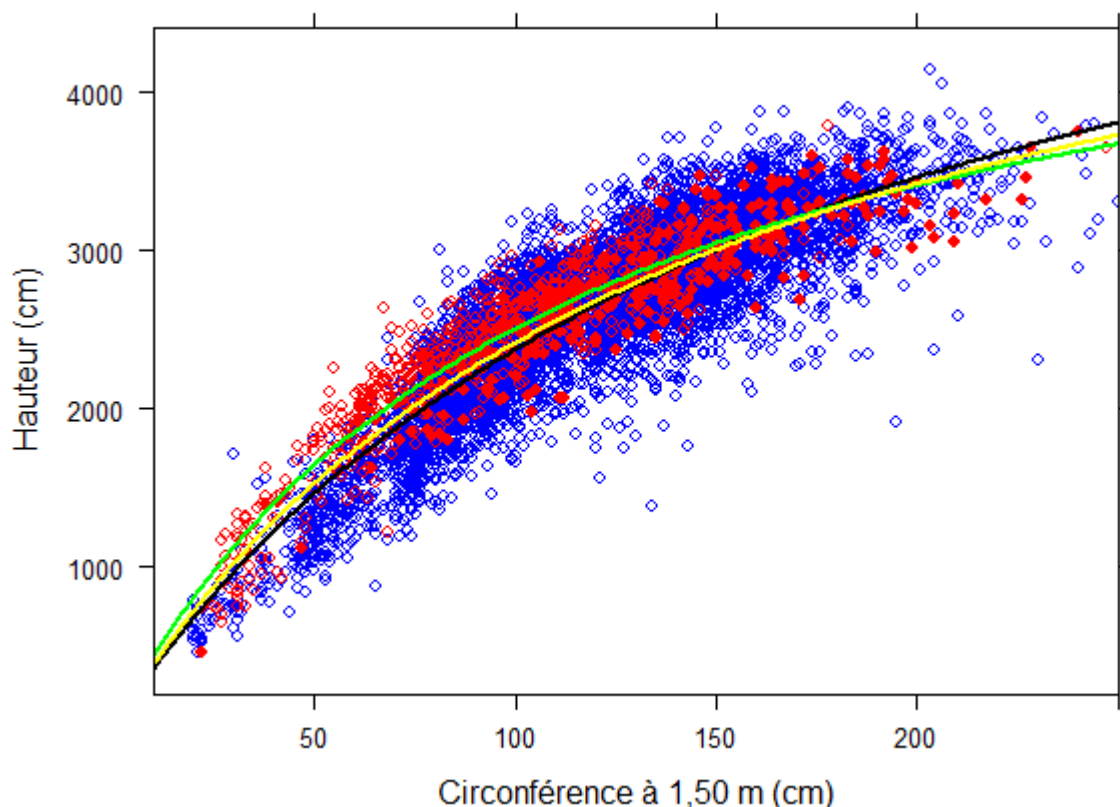


Figure 6 : Relations allométriques hauteur - circonférence des épicéas des deux jeux de données (historique et IPRFW), avec les épicéas sont représentés par des cercles rouges plein pour les arbres dominants du jeu historique représentés, des cercles rouges creux pour les autres arbres de cet échantillon et des cercles bleus creux pour les arbres de l'échantillon IPRFW. Les courbes de Michaelis Menten ajustée selon le jeu (jaune pour les épicéas dominants de l'échantillon historique, vert pour l'échantillon historique non trié et bleu pour IPRFW).

Le modèle de Michéalis Mentens a été ajusté séparément sur trois populations statistiques : un premier ajustement sur l'ensemble de l'échantillon historique, un second sur les arbres dominants de l'échantillon historique et le troisième sur l'échantillon représentant la ressource actuelle (IPRFW). Les trois ajustements sont représentés respectivement par une courbe asymptotique verte, jaune et noire (graphique 3). On observe une augmentation non linéaire de la hauteur avec la circonférence, bien décrite par le modèle de Michaelis-Menten pour les deux sources de données. Cependant, les individus de circonférences inférieures à 150 cm sont pour le jeu historique plus grands que les arbres de l'IPRFW à même circonférence. Après le seuil de 150 cm de circonférence par contre cela s'inverse et les arbres de l'échantillon historique sont plus petits. Les valeurs de l'AIC et de l'erreur standard (résultats non présentés), permettent de remarquer que les deux paramètres du modèle de Michaelis-Menten varient selon la source des données (échantillon historique *versus* ressource actuelle). Le modèle M3.1 fournit par origine des épicéas une estimation des coefficients et un intervalle de confiance à 95%. Pour les épicéas de l'échantillon historique le paramètre a (cm) est de 5314,8 [5122,25-5522,79] et b (cm) de 111,5 [103,41-120,29]. Ces mêmes paramètres pour les arbres dominants du jeu historique sont pour a (cm) égal à 5836,5 [5497,99-6220,45] et pour b (cm) à 140,9 [124,64-159,37]. Pour l'IPRFW le paramètre a (cm) annoncé est de 6364,3 [6247,54-6485,66] et b (cm) de 167,4 [161,99-173,04].

Le modèle de Michaelis Menten est un modèle asymptotique pertinent pour caractériser la relation allométrique hauteur - circonférence à l'échelle de parcelle (Molto et al., 2014) et à l'échelle des espèces (Fayolle et al. 2016). La relation hauteur - circonférence est différente entre les échantillons, celle qui traduit le mieux la relation hauteur - circonférence est celle qui tient compte de l'effet site sur les deux paramètres du modèle (Tableau 3). On remarque que le paramètre a est supérieur pour les épicéas de l'IPRFW. Le fait qu'il soit supérieur pour l'IPRFW pourrait traduire un échantillonnage différent ou une meilleure fertilité des stations d'où proviennent les épicéas. Il en va de même pour le paramètre b . Les données dendrométriques de l'IPRFW proviennent d'arbres dominants suite aux modalités d'inventaire définies précédemment, alors que ceux de l'échantillon historique n'appartiennent pas forcément à un statut social dominant. Quand on ne considère que les arbres dominants dans l'échantillon historique, les différences d'allométrie hauteur - circonférence sont moindres, les paramètres des modèles sont plus proches et les courbes sont également proches. Néanmoins, la ressource actuelle diffère de l'échantillon historique jugé représentatif de la ressource en 1973. Une hypothèse avancée peut être la sylviculture de l'époque qui maintenait une compétition élevée entre les arbres. Dans cette situation de compétition, la croissance en hauteur n'est que faiblement impactée (Zedaker et al, 1987) ou peut même augmenter faiblement dans une tentative d'arriver à la strate dominante (Cole et Newton, 1987 ; Wagner, 2000). À l'inverse, la croissance en circonférence est, elle, impactée négativement par la compétition (Jobidon, 2000 ; Wagner, 2000 ; Larcher, 1995). Dans ces conditions, pour une même hauteur les arbres présentent une circonférence plus faible. Il ne faut donc pas appréhender les arbres de moindre circonférence de l'échantillon historique comme des arbres qui ont poussé plus vite en hauteur mais à l'inverse comme des arbres qui à cause de la concurrence d'arbres dominant ont grossi moins vite d'autant que les densités de plantation et de gestion appliquées étaient supérieures à celles réalisées aujourd'hui (Thills et Palm, 1975). De plus, pour l'épicéa un statut social stable s'installe dès qu'il y a de la compétition entre individus (Delvaux, 1981). Pour les gammes de circonférences plus élevées (>100), la différence de relation allométrique s'estompe et les deux courbes se rapprochent fortement, ce qui suggère que soit les éclaircies successives, soit la mortalité naturelle ont permis de diminuer la compétition. Enfin pour les arbres de très forte grosseur ($C > 200$ cm), on observe que ceux de l'IPRFW sont plus grands, ce qui est sous doute le résultat de révolution plus longue permettant aux arbres d'atteindre des hauteurs supérieures.

Comparaison des NHA entre 1984 et aujourd'hui

Pour décrire le changement de sylviculture depuis les années 1970, une analyse complémentaire a été réalisée à partir des données de l'IFPRW, et spécifiquement une comparaison des NHA par classes d'âge des pessières pour les deux cycles de l'inventaire (1984 et 2015), considérés ici comme représentatif de la ressource historique et actuelle, respectivement. Pour se faire, les pessières ont été groupées en classe d'âge de 10 à 130 ans par intervalle de 10 ans, et les valeurs moyennes de NHA par classes et par cycles de l'inventaire (1984 et 2015) ont été comparées. On observe que le nombre moyen d'épicéas par hectare diminue avec l'avancement dans les classes d'âge, ce qui suit une courbe logique d'évolution de peuplement, mais aussi que les densités sont toujours supérieures pour l'IPRFW de 1984 que pour les populations actuelles (Figure 7).

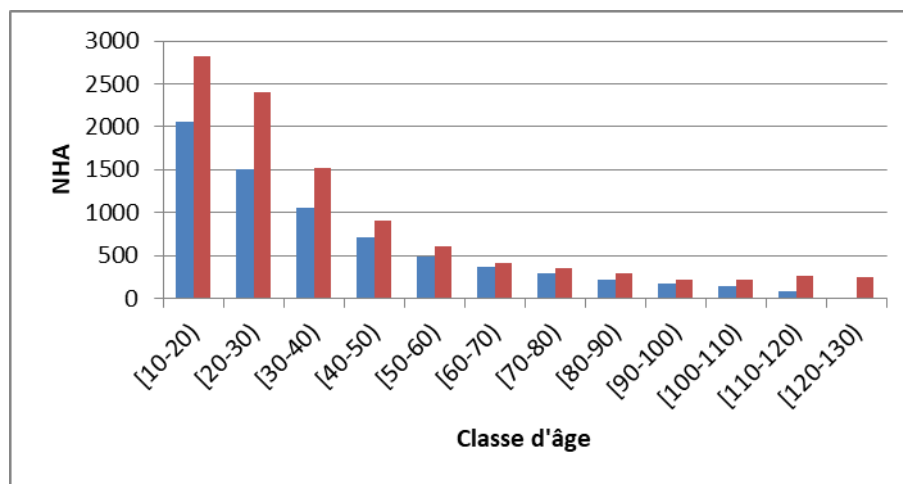


Figure 7 : Densité (nombre d'arbres/ ha) par classe d'âge et par inventaire (IPRFW de 1984 en rouge et actuelle en bleu).

Il apparaît que les densités de plantation en 1984 étaient largement supérieures (Thills et Palm, 1975) à celles préconisées aujourd'hui de 2 × 2 m ou de 2 × 2,5 m (Périn et al, 2016). Ces résultats confirment que les normes sylvicoles en vigueur aujourd'hui dans les pessières sont bien différentes, et vont dans le sens d'une sylviculture plus dynamique.

Défilement

Analyse des défilements

Pour tester l'effet d'une sylviculture plus dynamique aujourd'hui, la forme des arbres et plus spécifiquement le défilement des épicéas dans l'échantillon historique a été analysé, et comparé au défilement des arbres actuels provenant de plusieurs lots d'Ardenne et mesurés à l'occasion de la première transformation en scierie. Une comparaison des défilements entre les deux échantillons (historique et actuel) à l'aide d'un test de Student d'égalité des moyennes a été effectué. Il en résulte que les défilements moyens respectifs de 3,11 cm/m pour l'échantillon historique et de 3,15 cm/m pour l'échantillon de scierie ne sont pas significativement différents (Figure 8, $t = -1,0055$; $df = 814,36$; $p\text{-value} = 0,315$).

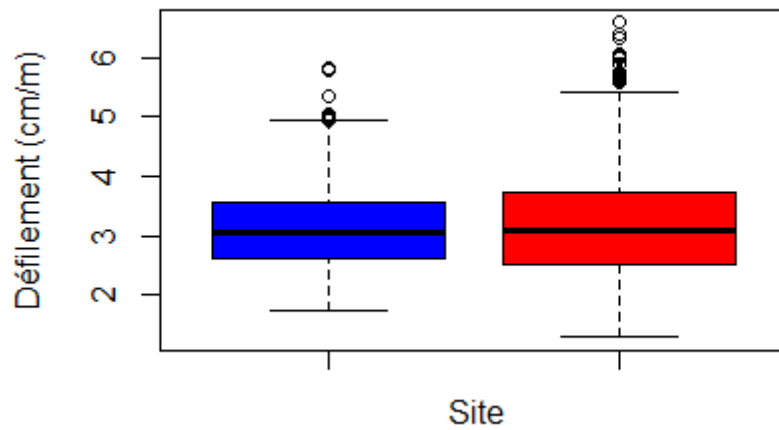


Figure 8 : Structure des défilements selon le jeu de données (scierie en bleu et historique non trié en rouge), avec le défilement (cm/m) en ordonnée et l'origine des données en abscisse.

Quand on ne considère que les arbres de circonférence supérieure à égale 65 cm, il n'y a toujours pas de différence de défilement entre l'échantillon historique et la ressource actuelle ($K'=0.396 \text{ cm.m}^{-1}$).

Dans l'échantillon historique (en rouge, Figure 9), le défilement des arbres présente une variation unimodale avec le diamètre. Le défilement est assez élevé pour les arbres de faible circonférence, puis décroît progressivement jusqu'à une circonférence de 50 cm, et ensuite augmente linéairement avec la circonférence (Figure 6). Quand on considère les arbres de plus de 65 cm de circonférence, la tendance est tout à fait comparable dans les deux échantillons. Une analyse de covariance (ANCOVA) a été utilisée pour tester l'effet de la ressource (historique restreint aux arbres ≥ 65 cm ou actuelle) sur la relation entre le défilement et la circonférence des arbres.

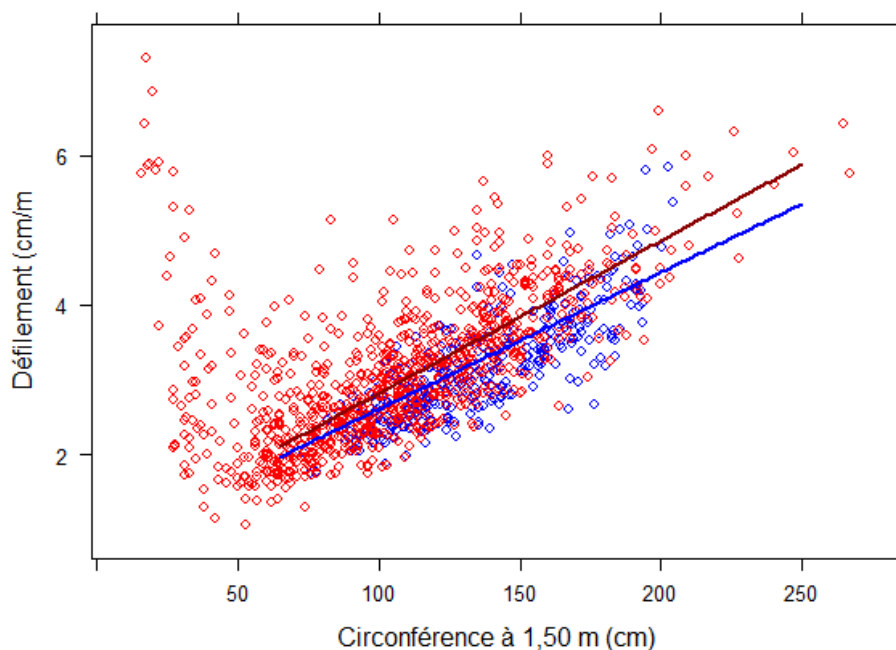


Figure 9 : Défilement en fonction de la circonférence à 1,50 m pour l'échantillon historique en rouge et l'échantillon scierie en bleu, avec les droites issues de la régression linéaire tenant compte de l'effet source (en rouge pour l'échantillon historique et en bleu pour l'échantillon scierie).

Pour les arbres de circonférence supérieure à 65 cm de l'échantillon historique, on observe que le défilement ne fait que croître avec la grosseur. Néanmoins même si les deux droites de régression ont la même origine (Figure 9), la pente est significativement différente entre les deux échantillons (Tableau 4). La droite de régression des épicéas de scierie croît moins vite que celle des épicéas de l'échantillon historique. Cette différence de pente pour un même intercepte tend à montrer la différence de relation entre le défilement et la grosseur selon la source de données. Cet impression visuelle confirmée par le résultat de l'ancova (Tableau 4) où l'interaction entre la circonférence et la source à une importance très hautement significative. Le R^2 ajusté de la régression linéaire du défilement en fonction de la circonférence est de 0,3504.

Tableau 4 : Résultats de la régression sur le défilement en fonction de la circonférence avec effet source (échantillon historique et échantillon scierie).

Régression	Estimate	Erreur std.	Pr(> t)
Intercept	0,469	$1,392 \times 10^{-1}$	$7,83 \times 10^{-4}$ ***
Circonférence	0.0197	$9,99 \times 10^{-4}$	$< 2 \times 10^{-16}$ ***
Source*C	$5,015 \times 10^{-5}$	$1,156 \times 10^{-3}$	0,956

Même si le défilement moyen de chaque échantillon n'est pas significativement différent, la relation entre le défilement et la circonférence est néanmoins différente entre l'échantillon historique et la ressource actuelle. En effet, on constate que pour une même circonférence les épicéas de la ressource actuelle défilent moins que ceux de 1975.

La même démarche a été appliquée mais cette fois en tenant compte de la hauteur des épicéas et non plus de leur circonférence. Les résultats (non montrés) ont aboutis à la même conclusion (moyennes non-significativement différentes mais relations hauteur – circonférence contrastés entre les deux échantillons).

Les arbres de la scierie sont donc plus proches du cylindre entre le mètre cinquante et la mi-hauteur que ceux de l'échantillon historique. Mais cela ne signifie pas que les défilements de l'échantillon historique en fonction de la grosseur ne sont pas égaux à ceux du reste de la ressource actuelle. En effet, les arbres qui constituent l'échantillon de scierie proviennent de peuplements sélectionnés par l'exploitant en fonction des qualités recherchées par celui-ci. Il existe donc un biais potentiel dans la création de l'échantillon dû aux attentes de l'exploitant. Cependant il n'en reste pas moins que les arbres défilent moins pour des circonférences égales. Cela peut s'expliquer par des mesures sylvicoles différentes appliquées aux arbres actuels et dont les épicéas de l'échantillon historique n'ont pas bénéficiées. On peut par exemple, citer l'élagage des branches vivantes qui diminue le défilement sur la zone élaguée et la rapproche d'une forme cylindrique (Keller et Thiercelin, 1984).

De plus, un tarif établi sur environ mille arbres ou les classes de dimensions sont bien représentées peut servir au cubage d'essences aux caractéristique peu variables comme l'épicéa (Palm, 1983).

Enfin, il est bon de se souvenir que les arbres qui ont été utilisés pour l'élaboration du tarif sont des épicéas qui devaient répondre à une autre demande que celle d'aujourd'hui. Aujourd'hui la ressource est tournée vers d'autres utilisations dont certaines nécessitant du bois de haute qualité obtenu par différentes interventions.

4. Conclusion

Pour rappel, l'objectif principal de cette partie était de comparer l'échantillonnage des épicéas qui ont servi pour l'élaboration des tarifs de cubage et de se rendre compte si la ressource a changé par rapport à 1973. Pour se faire, plusieurs sous objectifs spécifiques ont été posés.

Dans le premier sous objectif, le but a été de tester la représentativité spatiale de l'échantillon historique, avec lequel les tarifs et tables de cubage ont été élaborés, et la gamme des conditions environnementales échantillonnées. Il a été montré qu'effectivement l'échantillonnage de la population statistique historique est différent de l'échantillonnage de l'IPRFW. Néanmoins dire que cette différence apporte un biais dans l'élaboration de l'échantillon d'arbres pour le tarif serait présomptueux puisque entre 350 m et le maximum altitudinale belge, l'épicéa est à l'optimum du moins par rapport à l'altitude.

Le second objectif a été de vérifier la validité du tarif, les gammes de dimensions (circonférence et hauteur) des épicéas dans l'échantillon historique et dans l'échantillon actuel et également l'évolution de la ressource à travers la relation allométrique hauteur - circonférence. Il a été montré que la ressource actuelle se trouve bien dans les gammes de dimensions couvertes par le domaine de validité de hauteur et de circonférence du tarif. Il est aussi apparu que la relation allométrique entre la ressource historique et actuelle a changé, que la ressource actuelle atteint une hauteur supérieure à celle de la ressource historique pour de grandes circonférences.

Le dernier objectif de cette partie était de tester l'effet d'une sylviculture différente sur la ressource. Pour faire, le défilement des épicéas dans l'échantillon historique a été analysé, été comparé au défilement des arbres actuels provenant de plusieurs lots d'Ardenne et mesurés à l'occasion de la première transformation en scierie. Il a été montré qu'à l'échelle peuplement les défilements ne diffèrent pas mais qu'à l'échelle arbre, il y a une différence de défilement entre l'échantillon historique et l'échantillon scierie avec le biais que l'on sait dû à la sélection des arbres par le scieur. L'approche est correcte mais nécessite de multiplier les campagnes de récolte au sein de plusieurs scieries pour réduire le biais de sélection des arbres par les scieurs. Pour ce qui est de l'évolution de la ressource, les hypothèses avancées pour expliquer la différence de défilement, mais également la différence de relation entre la hauteur circonférence peuvent apporter une confirmation que la population actuelle diffère de celle de 1973, du moins pour les arbres qui ont été comparés ici. Cependant, la forme d'un arbre est issue d'un dosage entre les densités de plantation, les mesures d'éclaircies et les élagages. La ressource sur pied est corrélée à ces facteurs. Ces mêmes facteurs peuvent former des combinaisons variées, dû au grand nombre de propriétaires, de pratiques sylvicoles mais aussi dû à la diversité des conditions stationnelles rencontrées en Wallonie. Ils sont donc responsables de la faible harmonisation de la ressource wallonne à laquelle il est difficile d'ajuster un tarif global (Hebert ; Herman ; Jourez , 2002).

En conclusion, oui il existe des différences entre les variables dendrométriques de l'échantillon historique de 1973 et les arbres composant la ressource actuelle. La population actuellement sur pied n'est pas exactement comparable à celle de jadis. Mais ces différences n'interdisent en rien l'utilisation du tarif basé sur la circonférence et la hauteur dominante, d'autant que les tarifs de l'Épicéa ont été modernisés à plusieurs reprises par des scientifiques de renom en dendrométrie que sont Dagnelie, Palm, Rondeux et Thill.

Partie II : Qualité de l'ajustement du tarif de cubage en vigueur pour l'Epicéa et construction de nouveaux modèles

1. Introduction

Lors de la première partie de cette étude, nous avons conclu que les tarifs et tables de cubage en vigueur pour l'Epicéa (Dagnelie, Palm, Rondeux ; 2013) établis sur un jeu de 991 arbres échantillonnés en 1973 pouvaient être appliqués sur la ressource actuelle. Les méthodes de calcul disponibles aujourd'hui étant plus performantes, dès lors, il s'agit ici de vérifier la qualité de l'ajustement réalisé à l'époque et de voir si ce dernier ne peut être amélioré. Cette partie de l'étude ne vise pas à mettre en doute la qualité de l'ajustement du tarif mais plutôt à voir s'il n'est pas possible avec les outils statistiques actuels de pouvoir affiner le tarif, comme ce dernier l'a été à différentes reprises entre 1973 et aujourd'hui (Palm et Thill, 1975 ; Palm, 1981b ; Palm, 1983). Par ailleurs, il existe un intérêt aujourd'hui pour l'amélioration des estimations de volume des arbres de petites dimensions, proches de la borne inférieure du domaine de validité du tarif. La valeur financière de ces arbres en 1973 était faible en raison de leur valorisation industrielle difficile et du coût des coupes d'éclaircie. De fait, connaître avec précision le volume d'arbres éliminés lors des premières éclaircies n'était pas important. Aujourd'hui le développement industriel est tel et les possibilités d'utilisation permettent de mettre en valeur les arbres de faibles grosseurs, d'où un gain d'intérêt à connaître ces volumes avec plus de précision. De plus, les estimations de volumes pour des dimensions proches des bornes par un modèle polynomiale sont sensibles à discussion, contrairement aux modèles de type puissance, qui permettent d'estimer avec une bonne fiabilité en dehors de l'intervalle de calibration (Picard et al. 2012). Il faut bien rappeler que le modèle polynomiale employé par Dagnelie et al. (1985) présentait l'avantage d'être suffisamment général pour être applicable à de nombreuses essences en changeant la valeur des paramètres des tarifs selon l'essence concernée (Dagnelie, Palm, Rondeux, 2013) à une époque où les possibilités d'automatisation étaient limitées. Cette approche standardisée de la méthode d'estimation des volumes, ne signifie pas forcément que la forme du modèle soit la meilleure pour chaque essence, et/ou que les paramètres du modèle soient tous significatifs. Dans ce contexte, un modèle simplifié mais peut-être mieux adapté à l'Epicéa en Région Wallonne pourrait être envisagé.

Une autre possibilité pour améliorer la précision du tarif actuel de l'Epicéa serait l'ajout d'une nouvelle variable paramétrée, qui est une caractéristique du peuplement (Rondeux, 1999). Actuellement le tarif de cubage de l'Epicéa à une entrée paramétrée comprend comme variable paramétrée la hauteur dominante du peuplement (Dagnelie et al. 2013). Or l'ajout d'une seconde variable propre au peuplement pourrait potentiellement permettre d'améliorer les estimations de volume, sans pour autant devoir mesurer cette seconde entrée du tarif pour chaque arbre à cuber et ainsi faire une économie de travail de mesure sur le terrain et réduire le risque d'erreur mesure. Parmi les variables paramétrées, l'âge du peuplement qui est une variable commune à tous les individus dans un peuplement pur équienne pourrait potentiellement apporter une contribution significative, via un effet sur la forme des arbres. En effet, suite à la remontée du houppier vivant durant la vie du peuplement soit par l'élagage artificiel, soit par la

mortalité naturelle des branches, le défilement le long de la zone élaguée est réduit (Keller et Thiercelin, 1984).

Dans cette partie, il s'agit de vérifier la qualité de l'ajustement du tarif en vigueur pour l'Epicéa en Région Wallonne. Ce tarif, basé sur la circonférence et la hauteur dominante, a été ajusté sur un échantillon de 991 épicéas (échantillon historique de la partie I) ; et une pondération a été utilisée pour prendre en compte l'hétéroscédasticité dans les données (Dagnelie et al. 1985). En effet, il existe généralement une forte hétéroscédasticité dans les données dendrométriques (Picard et al., 2012) : la variance du volume ou de la biomasse des arbres augmente fortement avec la circonférence des arbres. Pour analyser la qualité de l'ajustement du tarif en vigueur, et proposer des pistes d'amélioration une approche en quatre étapes a été développée :

- (i). L'échantillon historique avec lequel les tarifs ont été élaborés, et la gamme des dimensions échantillonnées, seront analysés dans un premier temps. En effet, la possible présence d'hétéroscédasticité, c'est-à-dire l'inégalité des variances des volumes pour des arbres de mêmes dimensions (Palm, 1983) va être étudiée par l'analyse de la distribution des volumes en fonction de la circonférence.
- (ii). La pondération de la régression, qui peut améliorer la précision des volumes estimés pour certaines classes de circonférence, notamment dans le cas d'hétéroscédasticité, sera étudiée dans un second temps. En effet, pour diminuer l'impact de l'hétéroscédasticité, les tarifs actuels ont été construits par régression pondérée (Palm, 1981b ; Palm, 1983). L'utilisation d'une pondération permet d'accorder plus de poids aux résidus relatifs des arbres de faibles dimensions et ainsi d'obtenir un ajustement plus précis du tarif pour ces mêmes arbres (Palm, 1994). Le domaine de variabilité des paramètres ainsi obtenus est plus faible que dans le cas d'une régression non pondérée dans le cas d'hétéroscédasticité (Draper et Smith, 1966 ; Theil, 1971). Cependant la sélection du critère de pondération et le poids accordé ne sont pas régies par des lois spécifiques (Rondeux, 1993) et il existe différentes approches pour sélectionner la « meilleure » pondération (Picard et al. 2012). De plus, selon la technique employée, la pondération que l'on choisirait d'appliquer aujourd'hui ne sera pas forcément celle de 1985. Le choix des facteurs à pondérer peut également changer. Il a donc été réalisé plusieurs pondérations sur le modèle polynomial à une entrée paramétrée afin d'examiner celle qui fournissait le meilleur ajustement.
- (iii). De nouveaux modèles ont été ajustés dans un troisième temps, et les prédictions de ces modèles ont été comparées à celle du tarif à une entrée paramétrée. Pour tester la qualité du tarif de l'Epicéa celui-ci a été comparé à un autre modèle polynômial construit pour ajuster au mieux les données à l'Epicéa wallon. En effet, le modèle actuel pour les tarifs de cubage des essences wallonnes, est un modèle générique dont il suffit de changer les paramètres selon l'essence. Il est donc possible de construire un modèle plus pertinent uniquement pour l'Epicéa, cependant le modèle polynomial a été préféré pour la construction d'un tarif car généralement considéré comme plus pertinent (Rondeux, 1999).
- (iv). La comparaison du tarif à une entrée paramétrée avec un tarif à deux entrées paramétrées, puisque le nombre d'entrées d'un tarif de cubage a un effet direct sur la précision (Dagnelie, Palm, Rondeux ; 2013), il est logique de penser que l'ajout d'une seconde variable paramétrée d'acquisition aisée puisse encore augmenter la précision sans surcharger la charge de travail des forestiers. Ainsi l'âge est une variable propre aux peuplements équiennes, généralement connue

pour ces derniers issus de plantation. Outre son acquisition aisée, l'âge influence le volume et notamment à travers la forme des arbres, notamment par le défilement.

2. Matériel et méthodes

2.1. Échantillons historique

Les analyses réalisées dans cette partie, ont été effectuées sur l'échantillon historique présenté dans la première partie de l'étude. Cependant pour l'ajustement des nouvelles pondérations du modèle de Dagnelie (Dagnelie et al., 1985) et la construction du modèle avec comme variable l'âge, ceux-ci ont été effectués sur 984 arbres suite aux données manquantes. De plus, l'ajustement d'un nouveau modèle à une entrée paramétrée a été réalisé sur 976 arbres, suite à l'enlèvement des individus de moins 22 cm de circonférence à 1,30 m.

2.2. Vérification de l'ajustement du modèle de Dagnelie et al. (1985)

Le tarif analysé ici est modèle cubique basé sur la circonférence et la hauteur dominante, obtenu par une équation (M4) de régression linéaire multiple qui est ensuite ajusté par la méthode des moindres carrés pondérés (Dagnelie et al., 2013).

$$VC22 = b_0 + b_1 \times C130 + b_2 \times C130^2 + b_3 \times C130^3 + b_4 \times HDOM + b_5 \times HDOM \times C130^2 \quad (M4)$$

Afin de vérifier l'ajustement du tarif en vigueur (Dagnelie et al. 1985), les épicéas de l'échantillon historique présenté dans la première partie de l'étude et sur lesquels les tarifs et les tables sont construits ont été analysés pour s'assurer que le jeu ne présente pas de données aberrantes.

Une fois que le jeu historique vérifié, le modèle polynomial (M4) été ajusté par régression linéaire avec différentes pondérations pour réduire l'hétérogénéité de la variance des résidus (Thibaut, Claessens, Rondeux, 1998). Les différents poids de pondérations classiques et couramment utilisés dans d'autres études qui ont été appliquées dans la recherche d'un meilleur modèle par régression linéaire sont « $1/C130^2$ » pour le modèle (M4.1) et « $1/(C130^2 \times Hdom)$ » pour le modèle (M4.2). Une seconde démarche de pondération a été appliquée, visant cette fois à déterminer le poids « $1/C130^{\alpha}$ » de la pondération après un processus itératif d'analyses des résidus pour le modèle (M4.3). Le paramètre alpha est obtenu par itérations successives réalisées de manière à avoir un modèle qui présente un AIC faible et l'ensemble de ses paramètres significatifs.

Une deuxième approche, de modélisation de la variance, a également été réalisée sur le modèle polynomial (M4), par régression non linéaire (M4.4) et avec la fonction *varpower* issue du package « nlme » dans R. cette fonction permet de modéliser la variance, et de trouver la meilleur pondération, selon le maximum de vraisemblance plutôt que d'appliquer une pondération définie à l'avance.

Différents critères statistiques sont ensuite utilisés pour comparer les modèles : la significativité des paramètres, le coefficient de détermination (R^2), l'erreur résiduelle standard (RSE), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et la valeur du critère d'Akaike (AIC) qui pénalise la

vraisemblance du modèle par le nombre de paramètres, ce qui permet d'éviter la sur-paramétrisation (Fayolle et al., 2013). Ces indicateurs sont utilisés comme critère de validation des différents tarifs analysés dans cette partie (Mayer, Butler; 1993). L'exploration graphique des volumes estimés en fonction des volumes réels et des résidus en fonction de la circonférence a également été réalisée.

Une fois la meilleure pondération choisie, l'analyse de la moyenne des résidus par classe de circonférence a été réalisée afin d'observer si la nouvelle pondération a pu remédier au problème d'hétéroscédasticité.

2.3. Ajustement d'un tarif à une entrée paramétré

Afin d'analyser la qualité de l'ajustement du tarif de l'épicéa basé sur la circonférence et la hauteur dominante, plusieurs modèles polynomiaux différents (M5, $V = b_0 \times H_{dom} + b_1 \times C130$; M6, $V = b_0 + b_1 \times C130^2 + b_2 \times C130^2 \times H_{dom}$; M7, $V = b_0 + b_1 \times C130 + b_2 \times C130^2 + b_3 \times C130^2 + b_4 \times H_{dom}$ et M8, $V = b_0 \times H_{dom} + b_1 \times C130^2 + b_2 \times C130 \times H_{dom} + b_3 \times C130^2 \times H_{dom}$) ont été ajustés sur l'échantillon historique suivant plusieurs modalités de pondération par une procédure stepwise (Tableau 5), avec pour objectif d'obtenir une précision semblable au premier. Ils ont été construits pour estimer le volume en dm^3 à partir de circonférence à 1,30 m en cm et de hauteur dominante en m.

Tableau 5 Valeurs des différents paramètres des modèles testés. Avec pour chacun des modèles la pondération appliquée, la valeur de l'AIC, la RSME et le R². les modèles ont été ajusté pour estimer le volume en dm^3 à partir de circonférence en cm et de hauteur dominante en m.

Modèle	Pondération	R ²	AIC	RSME	b0	b1	b2	b3
M5	$C130^{1,362}$	0,89	487	0,600	-0,413 ***	0,014 ***		
M6	$(1/C^2 H_{dom})^{1,65}$	0,98	-1975	0,177	$-8,723 \times 10^{-3}$ ***	$1,317 \times 10^{-5}$ ***	$2,86 \times 10^{-6}$ ***	
M7	$C130^{2,198}$	0,97	-1773	0,190	$3,799 \times 10^{-2}$ ***	0,005 ***	$1,310 \times 10^{-3}$ ***	$1,991 \times 10^{-3}$ ***
M8		0,98	-2030	0,174	2,76 ***	$2,33 \times 10^{-4}$ ***	$4,10 \times 10^{-3}$ ***	$2,36 \times 10^{-3}$ ***

Après cette procédure, le modèle qui a été sélectionné d'après le R², l'AIC et la RSME est le suivant :

$$V = b_0 \times H_{dom} + b_1 \times C130^2 + b_2 \times C130 \times H_{dom} + b_3 \times C130^2 \times H_{dom} \quad (M8)$$

L'ajustement avec pondération de ce nouveau modèle a été analysé à l'aide du R² du modèle et mais aussi par la distribution des résidus en fonction des valeurs estimées. Il a également été procédé à la régression linéaire des résidus du modèle en fonction des volumes estimés afin de s'assurer de l'absence de biais présent dans ce nouveau modèle (M8). Pour ensuite le comparer à celui du tarif actuel de l'Epicéa et aussi modèle M4.3 ajusté avec une pondération différente.

2.4. Ajustement d'un tarif à deux entrées paramétrées

Afin d'augmenter la précision du tarif de l'Epicéa, un modèle polynomiale comprenant l'âge comme seconde variable paramétrée en plus de la hauteur dominante a été ajusté sur les arbres de l'échantillon historique. En effet, lors de la construction des tarifs Epicéa par Palm, un modèle avec l'âge comme variable paramétrée a été établis (Palm, 1973) mais ce dernier n'est pas utilisé. De plus, l'âge est une variable qui été utilisée comme prédicteur dans étude comme celle de Saint-André et al. en 2003. L'âge a été également choisi, car il permet de tenir compte des traitements sylvicoles des peuplements. En effet, pour des arbres de mêmes circonférence mais d'âges différents, le volume bois fort ne sera pas le même. Les arbres les plus âgés auront connu une concurrence plus forte plus forte qui aura freiné leur croissance en grosseur (Jobidon, 2000 ; Wagner, 2000 ; Larcher, 1995) et réduit leur défilement par la remontée du houppier vivant. L'ajustement du modèle M9 intégrant l'âge de la plantation a été réalisé. La régression a été pondérée grâce à la fonction *varpower* dans le logiciel statistique R sur la variable circonférence.

$$V=b_0+b_1\times C130+b_2\times C130^2+b_3\times C130^3+b_4\times Hdom+b_5\times C130^2\times Hdom+b_6\times AGE \quad (M9)$$

De la même manière que précédemment, la qualité de l'ajustement du modèle a été étudiée à travers les valeurs de R^2 , de RSME et l'analyse de la régression des résidus en fonction des volumes estimés.

3. Résultats et discussion

3.1. Exploration graphique

La distribution des 984 épicéas de l'échantillon historique selon les classes de circonférences a été réalisée pour analyser la représentativité des classes de circonférences au sein de l'échantillon (Figure 10). On remarque que l'ensemble des classes est représenté entre les bornes de validité du tarif et que la distribution est en forme de cloche avec plusieurs pics, en effet le nombre d'individu par classes n'est pas constant.

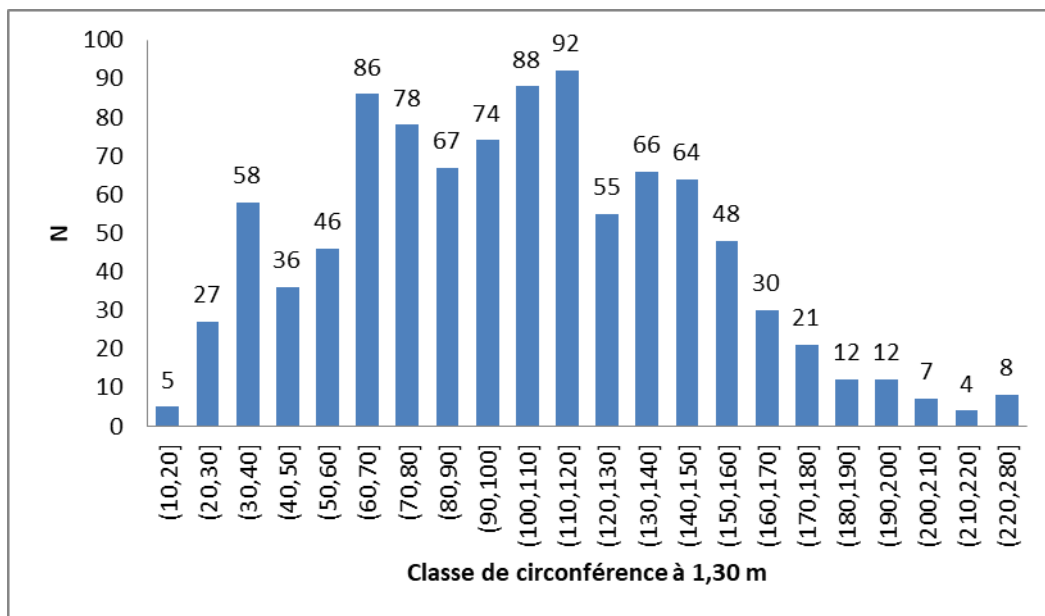


Figure 10: Distribution du nombre d'épicéa (N) par classe de circonférence 1,30 m pour visualiser la répartition de l'échantillonnage.

Afin d'ôter les potentielles données aberrantes de l'échantillon historique, il a été procédé à la projection des volumes fonction de leur circonférence à 1,30 m pour les 57 sites d'échantillonnages (Figure 11). On observe un accroissement du volume de type non linéaire avec l'augmentation de la circonférence. On remarque également un élargissement de la courbe pour des circonférences plus grandes, ce qui traduit de l'hétéroscédasticité dans les données. L'étude des volumes en fonction de la circonférence à 1,30 m n'a pas mis en avant de données jugées aberrantes ou sensibles.

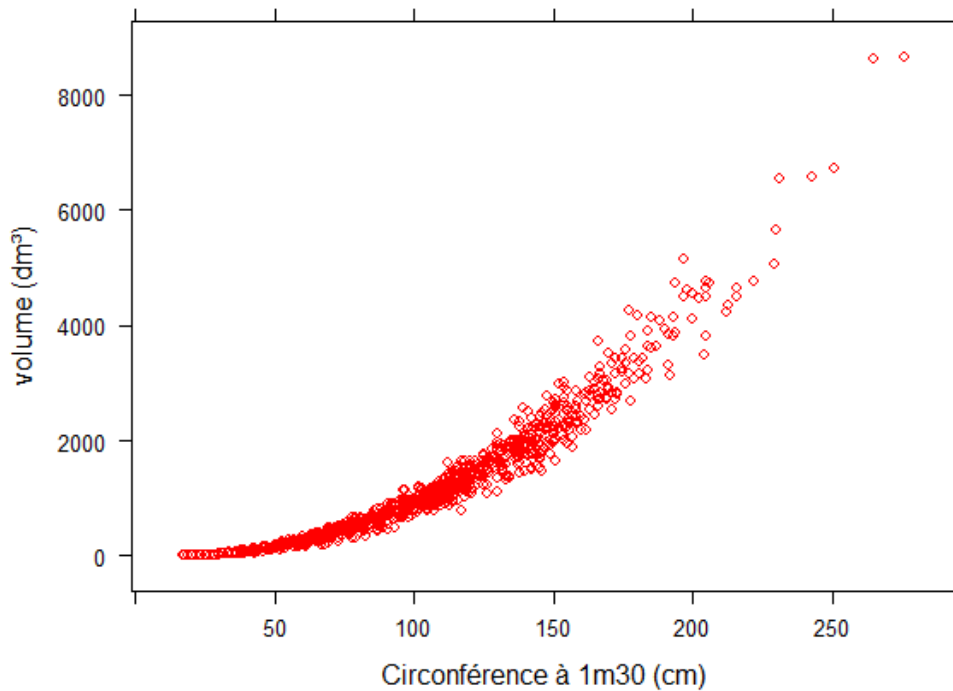


Figure 11: Caractéristiques dendrométriques des épicéas du jeu historique, avec en abscisse la circonférence (en cm) à 1,30 m et le volume (en dm³) en ordonnée.

L'échantillon historique est constitué d'un nombre suffisant d'individus (N=991) pour la construction d'un tarif précis pour une région (Bouchon, 1988) même si dans d'autres régions, comme en Europe du Nord, des effectifs bien supérieurs sont utilisés, notamment pour la Norvège où plusieurs tarifs Epicéa sont basés sur des échantillons de plus de 5000 individus (Zianis et al. 2009). Cependant, le nombre d'individu par classe de circonférence étudiées n'est pas constant, et certaines classes sont sous-représentées (Figure 10). Or le type de distribution et le nombre d'individus influencent la fiabilité que l'on peut accorder aux estimations et notamment pour les estimations de volume des arbres de faibles dimensions (Palm et Rondeux, 1976). Les estimations de volumes par les tarifs basés sur ce jeu pour les classes de circonférences qui compte assez peu d'arbres sont donc moins précises que celles des arbres dont les dimensions sont mieux représentées. Les classes les moins représentées ici sont celles à proximités des bornes de validité du tarif (C130 < 30 cm et C130 > 190). Cependant, comme la variabilité des volumes des petits arbres est plus faible que celle d'arbres de dimensions supérieures (Bouchon, 1974), il n'est pas forcément nécessaire d'avoir un nombre de petits arbres équivalent aux autres classes pour un tarif de cubage avec un grand domaine de validité.

3.2. Ajustement du modèle polynomial selon différentes pondération

Afin d'analyser la qualité de l'ajustement réalisé et la pondération appliquée, le modèle polynomial a fait l'objet de plusieurs régressions avec différents pondération et poids (Tableau 6).

Nouveaux ajustements						Tarif Epicéa 1985
N=984						N=991
Modèle	M4	M4.1	M4.2	M4.3	M4.4	
Pondération	NULL	1/C130 ²	(C130 ² HDOM) ⁻¹	(1/C130 ²) ^{2,3}	C130 ^{2, 2839}	
AIC	-645,145	-1543,097	-1708,577	-2040,737	-2036,77	
R²	0,9761	0,9837	0,9840	0,9842		
RSE (m³)	0,1736	1,193×10 ⁻³	2,209×10 ⁻⁴	2,584×10 ⁻⁶		
RSME (m³)	0,1731	0,1737	0,1768	0,1757	0,1757	0,1810
b0	-2,625×10 ⁻²	-9,800×10 ⁻³	-1,025×10 ⁻³	1,113×10 ⁻² *	1,105×10 ⁻² *	0,136×10 ⁻¹
[borne inf.- borne sup.]	-1,109×10 ⁻¹ 5,846×10 ⁻²	-3,815×10 ⁻² 1,855×10 ⁻²	-2,057×10 ⁻² 1,852×10 ⁻²	1,486×10 ⁻³ 2,078×10 ⁻²		
b1	-2,769×10 ⁻³	-8,952×10 ⁻⁵	-5,667×10 ⁻⁴	-1,286×10 ⁻³ **	-1,281×10 ⁻³ **	-0,129×10 ⁻²
[borne inf.- borne sup.]	-6,515×10 ⁻³ 9,763×10 ⁻⁴	-1,989×10 ⁻³ 1,810×10 ⁻³	-2,051×10 ⁻³ 9,171×10 ⁻⁴	-2,127×10 ⁻³ -4,445×10 ⁻⁴		
b2	6,019×10 ⁻⁵ ***	3,175×10 ⁻⁵ **	3,587×10 ⁻⁵ ***	4,810×10 ⁻⁵ ***	4,801×10 ⁻⁵ ***	0,457×10 ⁻⁴
[borne inf.- borne sup.]	2,727×10 ⁻⁵ 9,311×10 ⁻⁵	9,146×10 ⁻⁶ 5,435×10 ⁻⁵	1,648×10 ⁻⁵ 5,527×10 ⁻⁵	3,280×10 ⁻⁵ 6,341×10 ⁻⁵		
b3	-1,922×10 ⁻⁸	-2,395×10 ⁻⁸	-3,786×10 ⁻⁸	-8,636×10 ⁻⁸ ***	-8,630×10 ⁻⁸ ***	-0,770×10 ⁻⁷
[borne inf.- borne sup.]	-8,047×10 ⁻⁸ 4,203×10 ⁻⁸	-7,265×10 ⁻⁸ 2,475×10 ⁻⁸	-8,073×10 ⁻⁸ 5,012×10 ⁻⁹	-1,294×10 ⁻⁷ -4,336×10 ⁻⁸		
b4	4,897×10 ⁻³	-1,064×10 ⁻³	-8,405×10 ⁻⁴	-9,541×10 ⁻⁴ ***	-9,541×10 ⁻⁴ ***	-0,114×10 ⁻¹
[borne inf.- borne sup.]	-7,072×10 ⁻⁴ 1,050×10 ⁻²	-3,192×10 ⁻³ 1,063×10 ⁻³	-2,328×10 ⁻³ 6,474×10 ⁻⁴	-1,487×10 ⁻³ -4,2082×10 ⁻⁴	***	
b5	1,824×10 ⁻⁶ ***	2,437×10 ⁻⁶ ***	2,456×10 ⁻⁶ ***	2,438×10 ⁻⁶ ***	2,438×10 ⁻⁶ ***	0,258×10 ⁻⁵
[borne inf.- borne sup.]	1,404×10 ⁻⁶ 2,245×10 ⁻⁶	2,092×10 ⁻⁶ 2,783×10 ⁻⁶	2,138×10 ⁻⁶ 2,774×10 ⁻⁶	2,157×10 ⁻⁶ 2,721×10 ⁻⁶		

Tableau 6 : Valeurs et intervalles de confiance des différents paramètres des modèles testés. Avec pour chacun des modèles la pondération appliquée, la valeur de l'AIC, la RSE, la RSME, le nombre d'arbres (N) et le R².

Il apparaît que parmi les pondérations testées, la meilleure (AIC le plus faible) est « (1/C130²)^{2,3} » celle appliquée pour le modèle M4.3, c'est aussi la seule dont l'ensemble des paramètres sont significatifs.

Enfin, la pondération obtenue par la fonction *varpower* est la suivante C130^{2,2839}. Cette pondération permet que l'ensemble des paramètres soient significatifs et soient d'ailleurs proches voir identiques à ceux fournis par le modèle M4.3. L'analyse des volumes estimés et des résidus (résultats non présenté ici) obtenus par les modèles M4.3 et M4.4 montre que ceux-ci sont très proches et que M4.3 est celui qui est considéré comme le meilleur parmi ceux testés ici, puisque celui-ci est caractérisé par l'AIC et la RSE les plus bas et le R² le plus élevé.

Par calcul du pourcentage de différence entre M4.3 et le tarif de cubage, nous avons obtenu que la sous-estimation est de l'ordre de 2%.

Afin d'analyser si la nouvelle pondération a permis de résoudre le phénomène d'hétéroscédasticité, l'analyse des moyennes des résidus par classes de circonférence du tarif de cubage de l'Epicéa et le modèle M4.3 été réalisée (Figure 12).

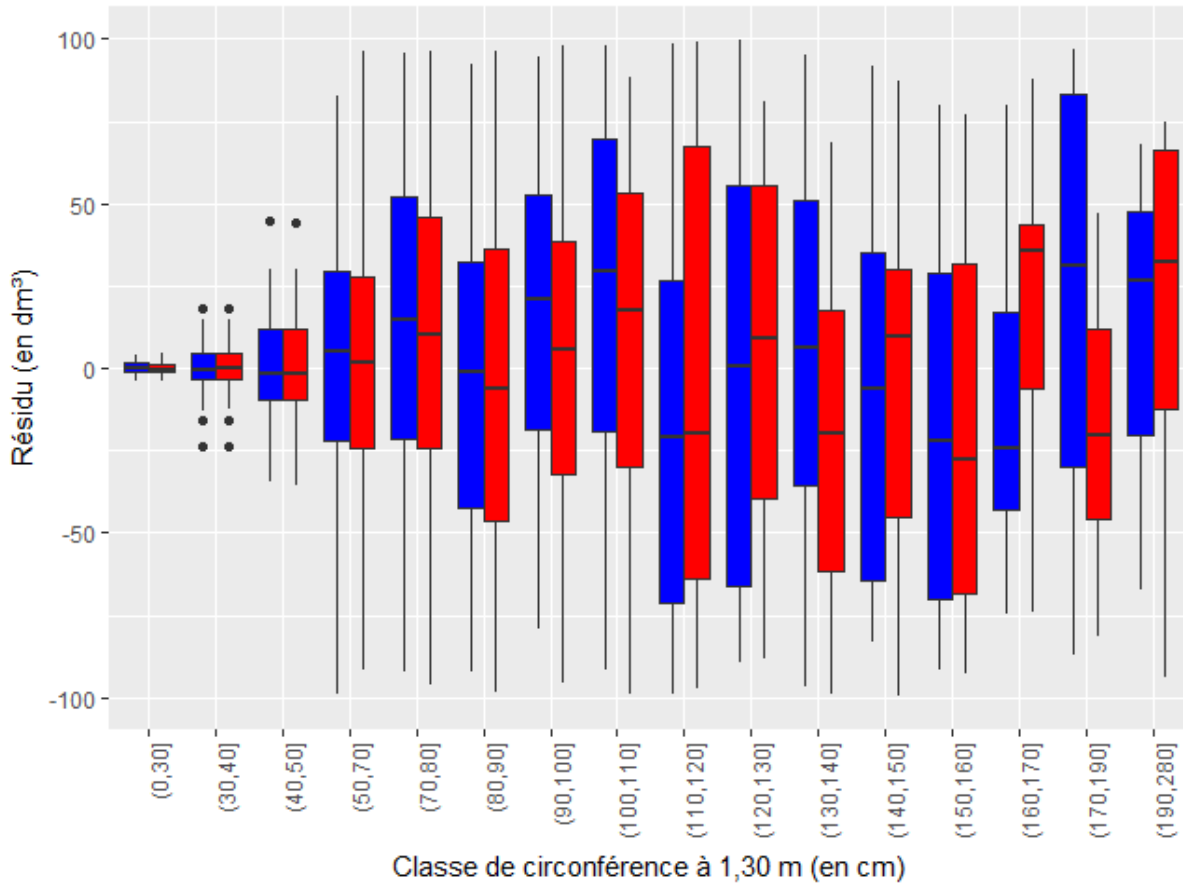


Figure 12: Répartition des résidus (en dm^3) par classes de circonférence à 1,30m (en cm) calculés sur l'échantillon historique afin d'étudier l'effet de la pondération sur l'hétéroscédasticité, avec en rouge les résidus calculés avec le modèle M4.3 et en bleu les résidus calculés par le tarif de l'Épicéa.

La nouvelle pondération (M4.3) appliquée au tarif de l'Épicéa ne permet pas de résoudre le phénomène d'hétéroscédasticité. En effet, la nouvelle pondération n'a pas permis d'obtenir une moyenne nulle des résidus pour chacune des classes de circonférence étudiée.

L'étude des résidus (Figure 12) montre que le modèle M5.3 est légèrement plus exacts que le tarif actuel, notamment pour les petits bois. De plus, une comparaison des estimations a été réalisée (résultats non montrés) et ce modèle issu d'une nouvelle pondération estime les volumes en moyenne 2% inférieure par rapport à ceux de estimés par le tarif Épicéa.

Le changement de pondération ne permet pas pour le modèle polynomiale basé sur l'échantillon historique d'améliorer grandement l'exactitude actuelle. Une possibilité qui permettrait de réduire les phénomènes d'hétéroscédasticité serait de baser l'ajustement du modèle sur un échantillon où le nombre d'individus par classe serait approximativement constant. Dans cette optique d'un nouvel ajustement du modèle polynomiale basé sur la circonférence et la hauteur dominante sur un échantillon où la répartition en classe de grosseur des épicéas serait régulière, deux possibilités sont envisageables. La première consisterait à compléter l'échantillon historique dans le but d'augmenter la représentativité des classes de circonférences les moins pourvues. Dans cette démarche se pose néanmoins la question de peut-on compléter l'échantillon historique de 1973 (Palm, 1973) avec des mesures sur des épicéas de la ressource actuelle. Alors que dans la première partie de cette étude que la ressource avait évolué au niveau de la relation allométrique hauteur circonférence pour les arbres dominants et notamment pour les arbres de faibles circonférences ($C_{150} < 100$ cm) et de circonférence importantes ($C_{150} > 200$). Or c'est justement pour ces classes que la représentativité dans l'échantillon devrait être augmentée, l'échantillon

combinerait alors des arbres issus de deux ressources faiblement différentes. Une seconde possibilité serait la création d'un nouvel échantillon entièrement basé sur la ressource actuelle et dans lequel chaque classe de grosseur serait bien représentée. Cependant cette démarche demanderait un coût important du point de vue financier, temps et une charge de travail importante pour les agents de terrains en charge. De plus, une telle démarche ne serait justifiable que si les coûts étaient compensés par une amélioration conséquente de la précision des tarifs et table actuelle de l'Epicéa ce qui n'est pas garanti au vu de la qualité du modèle actuel. Une autre option, statistique, serait de re-échantillonner dans le jeu de données historique (approche par « Bootstrap ») de manière à construire un échantillon où le nombre d'individu par classe serait constant. Néanmoins, dans une telle optique, les classes d'intervalles choisies auraient un impact sur l'effectif de l'échantillon et donc sur le domaine de validité du tarif.

Une autre perspective d'amélioration de la précision des volumes pour des dimensions proches des bornes du domaine de validité serait d'ajuster sur l'échantillon un modèle non polynomial et/ou d'utiliser une transformation de variable. La transformation logarithmique des données permet de linéariser des modèles de type puissance (log-log) ou exponentielle (log-linéaire), et d'améliorer la structure des résidus (Picard et al. 2012). Il est possible que les prédictions de volumes pour des arbres de faibles dimensions soient alors moins sujet à caution mais le tarif perdrait sa souplesse actuel qui lui permet de prédire avec une précision élevée les volumes d'arbres dont les dimensions se trouvent bien représentée dans l'échantillon historique.

3.3. Ajustement d'un nouveau modèle à une entrée paramétrée

Lors de l'analyse et de la comparaison des résidus entre le tarif en vigueur pour l'Epicéa en Région Wallonne (Dagnélie et al. 1985) et le modèle retenu dans le paragraphe précédent (Figure 12) on a pu constater une différence systématique dans les prédictions. Ceci peut provenir de la présence d'un biais au sein du modèle appliqué. Il a donc été procédé à l'examen des résidus en fonction des valeurs estimées (Figure 13) ainsi que à l'analyse de la régression des résidus en fonction des valeurs estimés par modèles testés (Tableau 7)

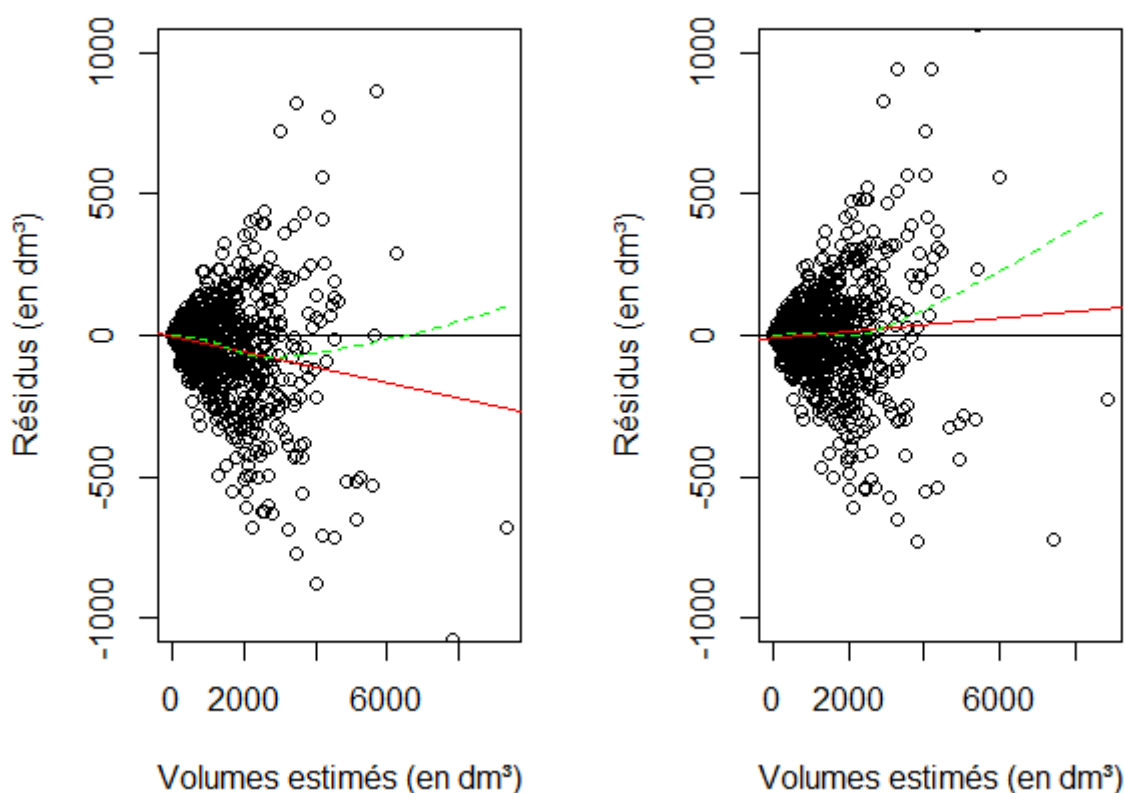


Figure 13: Distribution des résidus en fonction des volumes estimés par les deux modèles comparés : le tarif de l'Epicéa (Dagnelie et al. 1985) à gauche et le modèle M4.3 à droite. La droite de régression linéaire (en rouge) des résidus en fonction des volumes estimés est donnée pour chacun des modèles, en rouge pour le tarif en vigueur pour l'Epicéa, en bleu celle du modèle M4.3. La courbe (en vert) correspond à l'ajustement de la régression non paramétrique. Une valeur nulle indique une adéquation parfaite entre l'estimation du volume et le volume réel. Les valeurs négatives et positives indiquent les sur et sous- estimations, respectivement.

Tableau 7: Comparaison des régressions des résidus en fonction des volumes estimés pour chacun des deux modèles (tarif de l'Epicéa, M4.3), avec pour chacun la valeur des paramètres de l'équation de régression et le R^2 .

Modèle	Résidu= $a \times V_{est} + b$		R^2	P valeur
	a	b		
Tarif Epicéa	-0,0275***	-1,256ns	0,031	$2,464 \times 10^{-8}$
M4.3	-0,0118*	-12,725ns	0,004	0,0214

L'analyse des paramètres des régressions et de leur significativité (Tableau 7), nous informe de la présence d'un biais proportionnel au sein des deux modèles. L'étude graphique des résidus ainsi que des droites de régressions (Figure 13) montre que les dispersions des résidus sont assez semblables pour chacun et qu'il augmente avec l'accroissement des volumes estimés. Cependant l'analyse de la courbe (en vert) de régression non linéaire pour les résidus issus du tarif Epicéa, nous renseigne des problèmes de courbures dans l'ajustement de l'équation de volume. En effet, pour les volumes estimés par le tarif Epicéa, ceux-ci sont sous-estimés pour les arbres de faibles dimensions et sont surestimés pour les arbres présentant un volume réel supérieur à 6 m³. Pour le modèle M4.3, l'analyse de la régression non linéaire des résidus, nous apprend que les estimations sont correctes jusqu'à 3 m³ puis un biais systématique fait que les volumes sont sous-estimés par rapport aux volumes réels.

Pour tenter de réduire le problème de courbure présent dans le tarif de l'épicéa dû à la pondération du modèle général d'équation, plusieurs modèles polynomiaux comportant moins de paramètres que l'actuel ont été ajustés suivant plusieurs modalités de pondération par procédure stepwise, avec pour objectif d'obtenir une précision au moins semblable au premier mais avec un modèle plus simple et non biaisé. L'équation (Eq1) qui a été retenue après des analyses préalables est la suivante :

$$V = -2,76 \times H_{dom} + 2,33 \times 10^{-4} \times C130^2 + 4,10 \times 10^{-3} \times C130 \times H_{dom} + 2,40 \times 10^{-3} \times C130^2 \times H_{dom} \quad (\text{Eq1})$$

Une fois le modèle mis au point, il a été procédé à l'analyse du biais potentiel à travers l'étude de la distribution des résidus en fonction des volumes estimés (Figure 14) et l'analyse des régressions (linéaire et non linéaire) des résidus en fonction des volumes estimés.

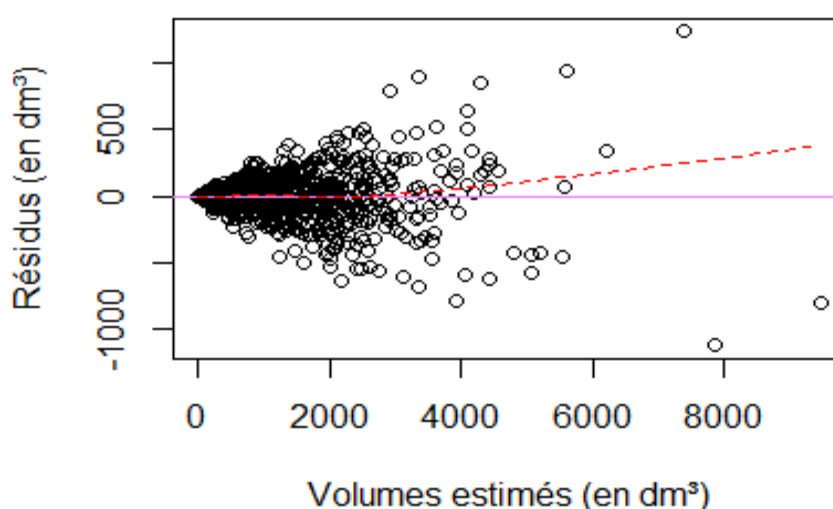


Figure 14: Distribution des résidus en fonction des volumes estimés (en dm^3) par l'équation de volume (Eq 1) du nouveau modèle. La droite de régression linéaire des résidus en fonctions des volumes estimés est donnée pour le modèle M8 en mauve. La droite de régression non linéaire (en rouge) des résidus en fonctions des volumes estimés est donnée pour le modèle M8

La régression des résidus en fonction des volumes estimés par le modèle M8 ne présente pas de paramètres significatifs ($a = -0,0002ns$ et $b = 0,257ns$) et un R^2 très faible, et < 0.001 . Ces résultats couplés à l'analyse de la distribution des résidus (Figure 14) montre qu'il y a un très faible biais négligeable de sous-estimation présent pour les estimations supérieures à 4 m^3 pour ce nouveau modèle de tarif, en effet la droite de régression linéaire se superpose à l'abscisse mais la courbe de régression non linéaire a une pente positive.

Les résultats des analyses menées ne signifient pas que le tarif en vigueur pour l'Epicea (Dagnélie et al. 1985) est déficient mais plutôt qu'en changeant légèrement la forme du modèle, on peut ajuster une forme de modèle, mieux adaptée pour l'Epicea, que la forme générique utilisée pour toutes les essences. C'est par ailleurs parce que certains formes sont plus adaptées à certaines essences, qu'une grande variabilité de formes de modèles utilisés pour les principales essences européennes existe (Zianis et al. 2009).

Quel que soit le modèle ajusté, on observe que le faible nombre d'individu de grosses dimensions présents au sein de l'échantillon historique ont un impact énorme les résultats des équations de volume.

De plus, des analyses non montrées ici des volumes estimés par le tarif de l'Épicéa et le nouveau modèle (M8) sur des épicéas compris dans une gamme de circonférence entre 120 et 150 cm, montre que les volumes estimés par le nouveau modèle pour ces circonférences sont inférieurs de près de 3% et en moyenne 1% pour l'ensemble des gammes de circonférence. On peut souligner ici que ce pourcentage pour la gamme 120-150 correspond à la valeur de la différence annoncée par certains scieurs.

3.4. Ajustement d'un tarif à deux entrées paramétrées

Dans le but d'augmenter la précision du tarif de l'Épicéa un modèle polynomial comprenant l'âge comme seconde variable paramétrée en plus de la hauteur dominante a été ajusté sur les données de l'échantillon historique. Ce nouveau modèle a été construit par simple addition de la variable de l'âge du peuplement au tarif de l'Épicéa. L'ajustement du modèle a été réalisé par régression non linéaire avec une pondération par la fonction *varpower* qui a permis de pondérer l'ajustement par la circonférence exposant 2,372. Après un premier ajustement du modèle (M9), il est apparu que le paramètre b_4 n'était pas significatif. Un nouveau modèle M10 n'incluant plus ce paramètre a ensuite été construit :

$$V=b_0+b_1\times C130+b_2\times C130^2+b_3\times C130^3+b_5\times C130^2\times H_{dom}+b_6\times AGE \quad (M10)$$

Il a ensuite été procédé à un second ajustement du modèle en ne conservant que les paramètres significatifs. L'équation de volume obtenue est la suivante

$$V=2,275\times 10^{-2}-1,421\times 10^{-3}\times C130+4,882\times 10^{-5}\times C130^2-1,600\times 10^{-7}\times C130^3+2,887\times 10^{-6}\times C130^2\times H_{dom}-1,284\times 10^{-3}\times AGE \quad (Eq2)$$

La qualité de l'ajustement est améliorée, avec un R^2 de 0,985 et une RSME de 0,181 m³ ainsi qu'une valeur d'AIC de -2082.

On peut remarquer immédiatement, qu'indépendamment de la qualité du modèle, la contribution de la variable « AGE » est négligeable. En effet, même pour un arbre âgé de 100 ans, la prise en considération de l'âge a un impact de l'ordre de 0,1 dm³.

Afin d'étudier la qualité la qualité du modèle à deux entrées paramétrées, il a été procédé à l'analyse des résidus en fonction des volumes estimés à partir de ce nouveau tarif à deux entrées paramétrées (Figure 15).

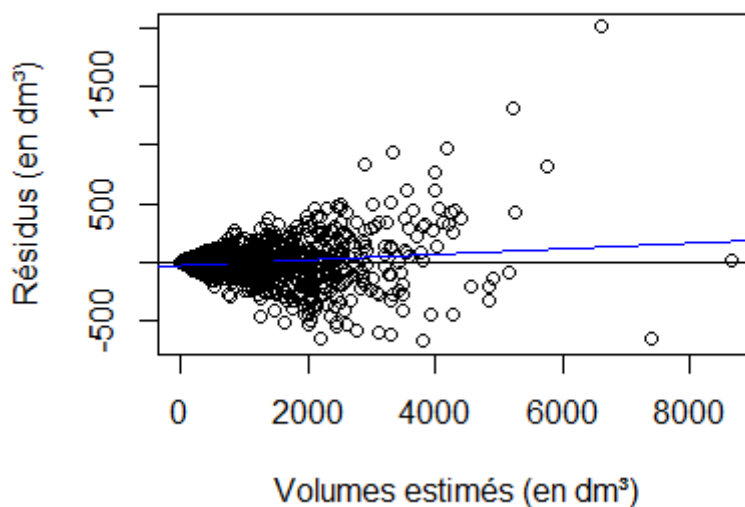


Figure 15 : Dispersion des résidus en fonction des volumes estimés par le modèle à deux entrées paramétrée à partir de l'échantillon historique. Avec en bleu la droite issue de la régression linéaire des résidus en fonction des volumes estimés

L'analyse de la régression linéaire des résidus en fonction des volumes estimés nous informe de la relation suivante « Résidu= $0,0233 \times V_{\text{est}} - 24,652$ », avec les paramètres a et b très hautement significatifs, un R^2 de 0,018 et une p valeur de $1,455 \times 10^{-5}$ pour la relation. Le modèle ajusté présente donc un biais systématique et un biais proportionnel qui sont responsables de la sous-estimation des arbres de grandes dimensions.

On observe sur la dispersion des résidus en fonction des volumes estimés par le modèle comprenant l'âge comme deuxième entrée paramétrée (Figure 15) que les résidus augmentent avec les volumes et sont plus symétriques par rapport à l'abscisse mais tendent vers des valeurs positives, le modèle testé sous estimerait légèrement les volumes importants notamment.

De plus, si on compare les RSME du tarif de l'Épicéa et des autres modèles (Tableau 6) et celle de ce modèle sur l'âge, on constate que la RSME est supérieure pour ce modèle comprenant l'âge par rapport à celle du tarif Épicéa et celle du modèle M4.3. Le R^2 de la régression des résidus est également inférieur pour ce modèle par rapport à celui du tarif Épicéa. Pour le coefficient de significativité du modèle, celui-ci est légèrement meilleur à tous ceux obtenus précédemment. En effet l'ajout de l'âge a permis d'augmenter le R^2 et le biais montré pour les épicéas de grandes dimensions est moindre par rapport au biais conditionnel du tarif Épicéa. Cependant même si l'âge augmente la significativité du tarif, cette élévation reste très faible ce qui est courant avec les tarifs à deux entrées paramétrées (Rondeux, 1999). En plus, le modèle à deux entrées paramétrées comprend toujours un biais proportionnel alors qu'il a été possible de le réduire fortement pour le modèle simplifié à une entrée paramétrée (M8). Enfin même si l'âge semble être une donnée caractéristique des peuplements simple et rapide d'acquisition pour les plantations, il s'est avéré que dans les faits cette donnée n'est pas toujours disponible rendant l'utilisation d'un tel tarif peu pratique.

4. Conclusion

Dans cette seconde partie du travail de fin d'études, la qualité de l'ajustement des tarifs en vigueur pour l'Epicéa en Région Wallonne, a été étudiée, à partir de l'échantillon historique utilisé pour la construction des tarifs et tables de cubage. Ce même échantillon a également été utilisé pour ajuster d'autres modèles, légèrement différents, à une (Hdom) et deux entrées paramétrées (Hdom et âge). Les quatre étapes de l'approche ont aboutis aux résultats suivants.

- (i.) Après analyse de l'échantillon historique, nous en avons conclu que ce dernier était plus que suffisant pour l'établissement de tarifs de cubage pour l'Epicéa en Région Wallonne, même si l'échantillon historique n'est pas parfaitement équilibré. En effet, il présente peu d'arbres de faibles dimensions, qui n'avaient pas de valeurs en 1985 et pour lesquels une précision aussi importante que pour les arbres de plus grande dimension (exploitables) n'était pas demandée.
- (ii.) Afin de réduire et de prendre en compte l'hétéroscédasticité présente dans les données une nouvelle pondération obtenue avec les nouveaux outils disponibles aujourd'hui a été appliquée au modèle de Dagnelie et al. (1985) sur l'échantillon historique. Les valeurs des paramètres obtenues avec cette nouvelle pondération sont extrêmement proches des paramètres du modèle d'origine, à l'exception du paramètre lié à la hauteur dominante. Cependant, les volumes estimés avec cette nouvelle pondération sont en moyenne 2% plus faibles que ceux estimés par le modèle d'origine. En outre, le changement de pondération n'a pas permis d'améliorer de manière importante la précision du tarif.
- (iii.) Plusieurs modèles polynomiaux simplifiés ont été testés pour ne finalement en retenir qu'un seul (M9), qui ensuite été comparé avec le tarif Epicéa basé sur la circonférence et la hauteur dominante. Nous avons conclu que ce nouveau modèle était plus adapté pour cette essence puisque ce ne présente plus de biais et qu'il a un R^2 élevé.
- (iv.) Enfin, un modèle à deux entrées paramétrées (Hdom et âge) a été ajusté sur les données de l'échantillon historique. Il s'est avéré que ce terme supplémentaire permettait effectivement d'améliorer le tarif mais pas forcément assez que pour justifier l'introduction d'une nouvelle variable. De plus, ce modèle, présentant un léger biais doit encore être amélioré.

Partie III : Impact des erreurs de mesure sur l'estimation du volume des arbres

1. Introduction

L'objectif de ce travail de fin d'étude est de tenter de répondre aux remarques concernant les différences entre les estimations réalisées par le DNF lors de la préparation de lots homogènes d'épicéas pour les ventes publiques et les volumes exploités dans les unités de première transformation. Dans les parties précédentes de cette étude, l'évolution de la ressource en Epicéa depuis les années 1973 (partie I) et la qualité de l'ajustement du tarif de cubage en vigueur pour l'Epicéa (partie II) ont été étudiés. Cette troisième partie est ici centrée sur les paramètres d'entrés des tarifs de cubage et l'impact des erreurs de mesure sur l'estimation du volume. Il a en effet été montré que la ressource n'avait pas tellement changé depuis 1973 (partie I) et que le tarif utilisé présente un biais conditionnel dû à la forme du modèle (partie II). Pour rappel les paramètres d'entrée d'un tarif de cubage sont des données dendrométriques facilement mesurables sur le terrain pour estimer le volume d'un arbre (Rondeux, 1999). Si le tarif est correct et le domaine de validité respecté, l'imprécision des estimations de volumes peut être due à l'introduction de données d'entrée incorrectes dans le tarif de cubage, comme la circonférence à 1,50 m et la hauteur dominante, dans ce cas précis (Figure 16).

Parmi les erreurs de mesures les plus répandues pour la circonférence, on évaluera ici l'impact d'une mauvaise hauteur de prise de mesure de la circonférence sur le volume. En effet, les tarifs et tables de cubages sont basés sur une mesure de la circonférence à 1,50 m (C150 en cm) pour la Belgique (Rondeux, 1999). Que ce soit la mesure de la circonférence au mètre ruban ou la mesure du diamètre à l'aide du compas forestier, la hauteur de mesure est la même et est à 1,50 m du sol. Cependant, cette hauteur de mesure n'est pas toujours respectée sur le terrain. Certains forestiers vont jusqu'à mesurer la circonférence ou le diamètre à une hauteur proche du 1,70 m (Hébert, com. pers.). Or cette démarche entraîne un biais puisque le tarif fournit une estimation du volume bois fort tige (recoupe 22 cm de circonférence) en supposant une souche de 10 cm de haut (Dagnelie et al., 2013). Ou encore d'autres mesurent la circonférence ou le diamètre à une hauteur incorrecte. La hauteur de mesure peut être également plus basse que celle imposée, notamment suite à la fatigue de l'opérateur. Ceci est d'autant plus vrai pour ceux qui utilisent un compas, plus lourd et encombrant que le mètre ruban. Une erreur de hauteur de mesure dans le cas du compas forestier peut également être due à l'inclinaison des bras l'instrument. Enfin le manque d'attention peut être également responsable de la mauvaise hauteur de mesure de la circonférence dans un sens ou dans l'autre. Il n'est ici question d'analyser que l'erreur de hauteur de mesure et non pas d'autres sources d'erreur de mesure comme la tension du mètre ruban ou sa pose autour de l'arbre le long d'une courbe qui n'est pas perpendiculaire à l'axe de la tige.

La deuxième variable d'entrée dans le tarif utilisé par le DNF est la hauteur dominante (Hdom en cm). La hauteur dominante correspond à la moyenne arithmétique des hauteurs totales des 100 plus gros arbres à l'hectare (Rondeux, 1999). Cependant, la méthodologie appliquée sur le terrain par les opérateurs peut s'écarter de la définition de la variable, généralement dans un but de gain de temps. Pour estimer la hauteur dominante, il convient de calculer la hauteur totale moyenne en sélectionnant chaque arbre le plus

gros observé dans un nombre variable de placettes d'un are disposées aléatoirement dans le peuplement concerné. Le nombre de placettes circulaires de 5,6 m rayon est fonction de la superficie du peuplement et de son homogénéité. Pour un peuplement uniforme de 0,5 ha à 2 ha le nombre de points d'observation est de 6 puis 8 entre 2 et 10 ha et enfin de 10 pour une surface supérieure à 10 ha (Rondeux & Thill, 1989). Comme la circonférence, il arrive que la hauteur dominante soit sous ou surestimée suite à des erreurs de mesure issues du au non-respect de la méthodologie, à l'estimation à l'œil des hauteurs totales au lieu de l'utilisation correcte d'un dendromètre qui offre une grande précision de mesure tel que le vertex (Rondeux & Pauwels, 1998). Parfois, les hauteurs dominantes annoncées ne sont pas obtenues en respectant la méthode de mesure

Dans le but de quantifier l'impact de l'erreur de mesure de la circonférence et de la hauteur dominante sur le volume, une analyse de l'erreur relative (en %) sur le volume d'un arbre a été réalisée en introduisant de mauvaises données de hauteur dominante et de circonférence sur un jeu restreint d'arbres modèles.

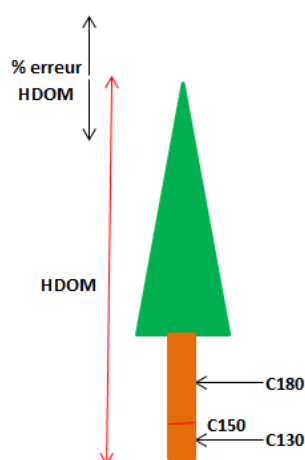


Figure 16: Représentation des variables dendrométriques nécessaires à l'estimation du volume par le tarif, la circonférence à 1,50 m (C150) et hauteur dominante (HDOM) avec les erreurs de mesures possibles qui ont été analysées dans cette partie de l'étude. Le pourcentage d'erreur sur la hauteur dominante et l'intervalle du niveau de mesure de la circonférence.

2. Matériel et méthodes

2.1. Données historiques

Le jeu de données qui a été utilisé dans cette partie est l'échantillon historique présenté dans la première partie de l'étude.

2.2. Arbres modèles

Pour étudier l'impact des erreurs de mesure sur la circonférence et la hauteur dominante, six épicéas de dimensions différentes ont été choisis. Les circonférences ont été choisies pour correspondre aux gammes de grosseurs couramment utilisées en foresterie et couvrant l'éventail possible de dimension. Les hauteurs dominantes ont été estimées pour correspondre à la hauteur attendue en fonction de la

circonférence à hauteur de poitrine, à partir des observations issues de l'échantillon historique. Par conséquent, les dimensions des arbres simulés rentrent parfaitement dans les gammes de validité de circonférences et de hauteurs du tarif.

Les caractéristiques dendrométriques des six épicéas simulés sont reprises ci-dessous (Tableau 8)

Tableau 8 : Caractéristique dendrométriques des six épicéas simulés pour étudier de l'impact d'erreur de mesure de la hauteur de mesure de la circonférence et de l'erreur de mesure de la hauteur dominante sur les volumes prédits par le tarif Epicéa. Pour chaque arbre sont reprises les valeurs des variables circonférence (C150), hauteur dominante (Hdom), défilement local (D) et le volume bois fort (V).

Arbre	C150 (cm)	Hdom (cm)	D (cm/m)	V (dm ³)
1	35	1380	1,78	51
2	65	2240	4,63	331
3	95	2680	7,48	860
4	125	2960	10,33	1631
5	155	3140	13,15	2625
6	185	3250	16,03	3814

2.3. Analyse des données

Pour étudier l'impact de l'erreur de mesure des variables d'entrée du tarif de cubage de l'Epicéa (Dagnelie, Palm, Rondeux ; 2013), il a été supposé que ce dernier est fiable et sans imprécisions supérieures à celles annoncées pour ce tarif. De plus, les volumes bois fort obtenus par la méthode des billons successifs (VC22 en dm³) estimés par le tarif Epicéa ont été considérés comme les volumes réels et servent de volume de comparaison pour quantifier l'erreur.

Pour calculer l'erreur due à l'introduction d'une circonférence prise à un mauvais niveau, il convient de fixer l'intervalle de hauteur ou la circonférence pouvait être mesurée sur le terrain. Suite aux constatations de terrain et échanges réalisés avec les forestiers, le niveau de mesure effectif varie entre 1,30 m et 1,80 m du sol. Les valeurs seront simulées avec un intervalle de 0,1 m entre chaque hauteur de mesure. Ensuite pour chacune des six hauteurs de mesure, la circonférence a été estimée pour chacun des six épicéas simulés. Pour ce faire, une fonction de défilement local entre 1,30 m et 1,50 m a été élaborée à partir de la relation linéaire entre les circonférences à ces deux hauteurs. Cette relation est basée sur les valeurs de circonférence à 1,30 m (C130) et de circonférence à 1,50 m (C150) présentées dans la table des volumes de l'Epicéa à différentes découpes (Dagnelie, Palm, Rondeux ; 2013).

$$C130 \text{ (cm)} = 1,019 \times C150 \text{ (cm)} - 0,3084 \quad (\text{Eq3})$$

La fonction de défilement locale (D) qui en a été élaborée à partir de la régression linéaire est

$$D \text{ (cm/m)} = (0,019 \times C150 - 0,3084) / 0,2 \quad (\text{Eq4})$$

A partir de ce défilement local, les circonférences à chaque hauteur de mesure de l'intervalle considéré entre 1,30 et 1,80 ont pu être calculées pour chaque épicéa.

Pour étudier l'impact sur le volume engendré par une erreur de calcul de la hauteur dominante, on a fait varier la hauteur de dominante introduite dans l'équation de -20% à +20% de la hauteur dominante attendue par intervalle de 5%.

Pour chaque épicéa simulé, le volume a été estimé par le tarif à une entrée paramétrée dans un premier temps avec les variables de C150 et HDOM correct. Puis les volumes ont été estimés en faisant varier la circonférence pour une hauteur dominante correcte. Ensuite les volumes ont été estimés pour chaque possibilité de combinaison de circonférence et de hauteur dominante disponible pour chaque épicéa.

Enfin, l'erreur relative (en %) a été calculée pour chaque estimation de volume par rapport à la valeur jugée correcte fournie par le tarif Epicéa avec les données exactes de circonférence et de hauteur dominante.

3. Résultats et discussion

3.1. Erreur d'estimation du volume

Afin d'analyser l'impact de l'introduction dans le tarif de cubage de valeurs erronées de la circonférence et/ou de la hauteur dominante, il a été procédé à l'introduction volontaire de ces erreurs dans l'estimation du volume de six épicéas suivi du calcul du pourcentage d'erreur par rapport à un volume jugé correct estimé par le tarif Epicéa avec des données correctes. Les résultats obtenus pour les six épicéas simulés sont repris ci-dessous sous forme de six tables (Tables 1 à 6), fournissant le pourcentage d'erreur sur le volume bois fort (repris dans la table) en fonction de la hauteur de mesure de la circonférence et du pourcentage d'erreur sur l'estimation de la hauteur dominante.

Table 1 : Pourcentage d'erreur sur le volume bois fort calculé pour l'épicéa 1 (c150 = 35 cm ; hdom = 13,8 m) entre le volume réel repris dans la table en dm³ pour un niveau de mesure de la circonférence à 150 cm et une erreur de hauteur dominante égale à zéro, et le volume estimé grâce à la circonférence mesurée à d'autres niveaux et une hauteur dominante sur ou sous-estimée.

1	Niveau de mesure la circonférence (cm)					
% Erreur HDOM	130	140	150	160	170	180
-20%	-9%	-10%	-11%	-13%	-14%	-15%
-15%	-6%	-7%	-9%	-10%	-11%	-13%
-10%	-3%	-4%	-6%	-7%	-9%	-10%
-5%	0%	-1%	-3%	-4%	-6%	-7%
0%	3%	2%	51	-1%	-3%	-4%
5%	6%	4%	3%	1%	0%	-2%
10%	9%	7%	6%	4%	3%	1%
15%	12%	10%	9%	7%	5%	4%
20%	15%	13%	11%	10%	8%	6%

Table 2 Pourcentage d'erreur sur le volume bois fort calculé pour l'épicéa 2 (c150 = 65 cm ; hdom = 22,4 m) entre le volume réel repris dans la table en dm³ pour un niveau de mesure de la circonférence à 150 cm et une erreur de hauteur dominante égale à zéro, et le volume estimé grâce à la circonférence mesurée à d'autres hauteurs et une hauteur dominante sur ou sous-estimée.

2	Niveau de mesure la circonférence (cm)					
% Erreur HDOM	130	140	150	160	170	180
-20%	-11%	-12%	-14%	-15%	-16%	-18%
-15%	-7%	-9%	-10%	-12%	-13%	-15%
-10%	-4%	-5%	-7%	-8%	-10%	-11%
-5%	0%	-2%	-3%	-5%	-7%	-8%
0%	3%	2%	331	-2%	-3%	-5%
5%	7%	5%	3%	2%	0%	-2%
10%	10%	9%	7%	5%	3%	2%
15%	14%	12%	10%	8%	7%	5%
20%	17%	15%	14%	12%	10%	8%

Table 3 : Pourcentage d'erreur sur le volume bois fort calculé pour l'épicéa 3 (c150 = 95 cm ; hdom = 26,8 m) entre le volume réel repris dans la table en dm³ pour un niveau de mesure de la circonférence à 150 cm et une erreur de hauteur dominante égale à zéro, et le volume estimé grâce à la circonférence mesurée à d'autres hauteurs et une hauteur dominante sur ou sous-estimée.

3	Niveau de mesure la circonférence (cm)					
	130	140	150	160	170	180
% Erreur HDOM						
-20%	-11%	-13%	-14%	-16%	-17%	-19%
-15%	-8%	-9%	-11%	-12%	-14%	-15%
-10%	-4%	-6%	-7%	-9%	-10%	-12%
-5%	0%	-2%	-4%	-5%	-7%	-8%
0%	3%	2%	860	-2%	-3%	-5%
5%	7%	5%	4%	2%	0%	-2%
10%	11%	9%	7%	5%	4%	2%
15%	14%	13%	11%	9%	7%	5%
20%	18%	16%	14%	12%	11%	9%

Table 4 : Pourcentage d'erreur sur le volume bois fort calculé pour l'épicéa 4 (c150 =125 cm ; hdom = 29,6 m) entre le volume réel repris dans la table en dm³ pour un niveau de mesure de la circonférence à 150 cm et une erreur de hauteur dominante égale à zéro, et le volume estimé grâce à la circonférence mesurée à d'autres hauteurs et une hauteur dominante sur ou sous-estimée.

4	Niveau de mesure la circonférence (cm)					
	130	140	150	160	170	180
% Erreur HDOM						
-20%	-12%	-13%	-15%	-16%	-18%	-19%
-15%	-8%	-10%	-11%	-13%	-14%	-15%
-10%	-4%	-6%	-7%	-9%	-10%	-12%
-5%	0%	-2%	-4%	-5%	-7%	-8%
0%	3%	2%	1631	-2%	-3%	-5%
5%	7%	5%	4%	2%	0%	-1%
10%	11%	9%	7%	6%	4%	2%
15%	15%	13%	11%	9%	7%	6%
20%	19%	17%	15%	13%	11%	9%

Table 5 : Pourcentage d'erreur sur le volume bois fort calculé pour l'épicéa 5 (c150 = 155 cm ; hdom = 31,4 m) entre le volume réel repris dans la table en dm³ pour un niveau de mesure de la circonférence à 150 cm et une erreur de hauteur dominante égale à zéro, et le volume estimé grâce à la circonférence mesurée à d'autres hauteurs et une hauteur dominante sur ou sous-estimée.

5	Niveau de mesure la circonférence (cm)					
	130	140	150	160	170	180
% Erreur HDOM						
-20%	-12%	-14%	-15%	-17%	-18%	-19%
-15%	-8%	-10%	-11%	-13%	-14%	-16%
-10%	-4%	-6%	-8%	-9%	-11%	-12%
-5%	-1%	-2%	-4%	-5%	-7%	-9%
0%	3%	2%	2625	-2%	-3%	-5%
5%	7%	6%	4%	2%	0%	-1%
10%	11%	9%	8%	6%	4%	2%
15%	15%	13%	11%	9%	8%	6%
20%	19%	17%	15%	13%	11%	9%

Table 6 : Pourcentage d'erreur sur le volume bois fort calculé pour l'épicéa 6 (c150 = 185 cm ; hdom = 32,5 m) entre le volume réel repris dans la table en dm³ pour un niveau de mesure de la circonférence à 150 cm et une erreur de hauteur dominante égale à zéro, et le volume estimé grâce à la circonférence mesurée à d'autres hauteurs et une hauteur dominante sur ou sous-estimée.

6	Niveau de mesure la circonférence (cm)					
	130	140	150	160	170	180
% Erreur HDOM						
-20%	-13%	-14%	-15%	-17%	-18%	-20%
-15%	-9%	-10%	-12%	-13%	-14%	-16%
-10%	-5%	-6%	-8%	-9%	-11%	-12%
-5%	-1%	-2%	-4%	-5%	-7%	-9%
0%	3%	2%	3814	-2%	-3%	-5%
5%	7%	6%	4%	2%	0%	-1%
10%	11%	10%	8%	6%	4%	2%
15%	15%	13%	12%	10%	8%	6%
20%	19%	17%	15%	13%	12%	10%

On observe que les erreurs relatives sur les volumes sont relativement proches pour des combinaisons identiques d'erreurs sur la circonférence et sur la hauteur dominante quel que soit l'épicéa concerné (Tables 1-9). Cependant l'impact n'est pas le même pour les volumes concernés en valeur absolue. En effet, par exemple une erreur relative causée par une surestimation de la hauteur dominante de 20% et une circonférence à 1,70 m est pour un petit arbre de 8% (

Table 1) et pour un gros épicéa de 12% (Table 6). Mais ces erreurs relatives d'estimation du volume se traduisent respectivement par un volume supplémentaire de 4,08 dm³ pour le premier et 457 dm³ pour le second. L'impact n'est donc pas négligeable selon les dimensions de l'arbre.

On remarque également que pour une hauteur dominante correcte, l'erreur d'estimation du volume due à la hauteur de mesure de la circonférence est presque symétrique. Par contre dans le cas de combinaison entre des erreurs de hauteurs de mesure et d'estimation de la hauteur, il est apparu que c'est la hauteur dominante qui a le plus d'impact par rapport à celui de la circonférence. En effet, une sous-estimation de la hauteur dominante conduit à une sous-estimation du volume bois fort, et ce même si la circonférence est surestimée car mesurée à une hauteur inférieure.

On constate dans certains cas à un phénomène de compensation des erreurs. L'effet d'une mesure de circonférence réalisée 20 cm trop bas (circonférence à 1,50 m surestimée) est annulé si la hauteur dominante est sous-estimée de 5%. De même, si la circonférence est mesurée à 1,70 m et qu'en même temps, la hauteur dominante est surestimée de 5%, l'erreur sur le volume sera négligeable.

L'enseignement principal de cette analyse est la très grande sensibilité du tarif de cubage à une erreur sur la hauteur dominante. Or, cette variable est précisément celle qui est estimée avec le moins de rigueur sur le terrain (Hébert, pers. com.).

La précision d'un tarif dépend à la fois de l'équation de volume mais aussi de la variabilité naturelle des arbres, également nommé variabilité résiduelle. Elle correspond à la variabilité de volume des arbres de même circonférence pour le tarif à une entrée ou de même circonférence et même hauteur dominante pour le tarif à une entrée paramétrée et à une grande importance dans l'estimation du volume d'un faible nombre d'arbres (Palm, 1981a et 1983). Or l'utilisation de tarifs à une entrée paramétrée permet de réduire l'erreur dû à la variabilité naturelle des arbres par rapport aux tarifs à une entrée et d'améliorer les estimations de volume (Dagnelie, Palm, Rondeux ; 2013). Néanmoins, il a été constaté que dans le cas où la hauteur dominante qui est la variable paramétrée n'est pas correctement estimée, elle influence grandement les estimations de volumes et la précision de celles-ci qui diminue rapidement. De plus, l'impact d'erreur de la hauteur dominante est plus fort sur les estimations de volume que celui des erreurs de hauteur de mesure de la circonférence. En effet, une surestimation de la hauteur dominante implique toujours une sur estimation du volume même pour des circonférences sous-estimées car mesurées bien trop haut. Une telle erreur à répétition se traduit pour les exploitants par un volume réellement disponible inférieur à celui qui a été annoncé lors des ventes publiques. La variable hauteur dominante est d'autant plus importante que contrairement à la circonférence qui est mesurée pour chaque d'arbres du lot, la hauteur dominante est calculée pour l'ensemble d'un lot censé homogène. De fait, une erreur dans de calcul se reporte d'office sur l'ensemble des arbres à cuber. La précision de la mesure de la hauteur dominante est donc importante pour les exploitants des pessières dont la marge bénéficiaire dépend en partie d'estimations correctes des volumes exploitables.

Il convient d'envisager plusieurs possibilité pour remédier à l'erreur de mesure de la hauteur dominante, la première est évidemment d'estimer correctement cette dernière à l'aide des instruments de précision disponibles, selon la méthodologie de référence. Une seconde possibilité serait de ne plus mesurer la hauteur dominante sur le terrain en ayant soit recours à des modèles numériques de hauteur tels que ForEstimator. Cette extension du programme de cartographie Qgis permet d'estimer la hauteur avec précision grâce à des données lidar et une actualisation à la date de mesure (Dedry et al., 2015). Seule la circonférence serait ainsi mesurée sur le terrain, diminuant l'imprécision due aux opérateurs. Une

autre alternative qui ne nécessite pas la mesure de la hauteur dominante sur le terrain serait l'utilisation de tarifs locaux à une seule entrée. Cependant l'utilisation de tarifs à une entrée augmenterait la variabilité résiduelle (Dagnelie, Palm, Rondeux ; 2013) qui pourrait représenter une source d'imprécision supérieure dans l'estimation de volume. De plus, cette démarche s'éloignerait du but original de l'utilisation du tarif basé sur la circonférence et la hauteur dominante, qui est l'utilisation d'un tarif unique pour l'ensemble de la Wallonie.

4. Conclusion

L'objectif de cette partie de l'étude a été d'analyser l'impact de l'introduction dans le tarif Epicéa d'une circonférence correctement mesurée mais à une hauteur incorrecte, soit une hauteur dominante erronée, ou la combinaison des deux, qui sont dues à des mesures incorrectes réalisées sur le terrain. Les analyses réalisées ici nous ont permis de quantifier l'impact de ces erreurs sur les estimations de volumes. Bien que la hauteur dominante augmente la précision du tarif par rapport au tarif à une entrée, elle peut également diminuer la précision des estimations de volume et être responsable d'erreurs importantes suite à de l'utilisation d hauteurs dominantes sous ou surestimées.

Pour conclure, nous recommandons de profiter de la disponibilité de logiciel en accès libre ForEstimator (<http://hdl.handle.net/2268/181427>) pour valider les mesures de hauteur effectuées sur le terrain, dans le but de réduire les erreurs possible alliées à chaque méthode de calcul de la hauteur dominante et ainsi garantir les estimations de volumes réalisées par les tarifs de cubage.

Partie IV : Comparaison entre le volume DNF, volume scierie et volume tarif de cubage.

1. Introduction

Chaque année des milliers de mètres cubes d'Épicéa sont achetés par les scieurs lors de ventes publiques organisées par le Département Nature Forêt (DNF). Dans un but de rentabilité et de suivi des opérations de transformation, les scieries procèdent à leur propre calcul du volume pour le comparer à celui annoncé lors des ventes. Cette comparaison entre les volumes annoncés et ceux estimés par les scieurs permet également aux soumissionnaires de pouvoir ajuster le prix d'achat des lots de manière la plus judicieuse selon le cantonnement en charge de la vente publique, voire même du forestier responsable du cubage du lot. En effet, un sujet de débat constant entre le DNF et les scieurs porte sur les volumes bois fort d'épicéa issus du tarif de cubage basé sur la circonférence et la hauteur dominante (Dagnelie, Palm, Rondeux ; 1985) réalisé par les premiers et les volumes exploités par les seconds. Or dans les différentes parties de cette étude, l'analyse de l'évolution ressource et la qualité de l'ajustement ont montrées que le tarif de l'Épicéa actuellement utilisé par le DNF est précis et qu'il n'était pas responsable de différences supérieures à 3% entre le volume réel et celui estimé sauf dans le cas d'erreurs de mesures de la circonférence et surtout de la hauteur dominante comme montré précédemment dans l'étude.

Afin de se rendre compte si les volumes estimés par le tarif de l'Épicéa à une entrée paramétrée basé sur la circonférence et la hauteur dominante et les volumes réels issus des lots proposés à l'achat lors des ventes diffèrent entre eux, il a été procédé à deux approches : (i) le volume bois fort d'épicéas calculé par billons successifs assimilés à des troncs de cône est-il différent du volume estimé par le tarif ? Pour répondre à cette première question, les volumes prédits par le tarif de cubage basé sur la circonférence à 1,50 m et la hauteur dominante ont été analysés, et comparés aux volumes réels mesurés sur le terrain, afin de vérifier via un cas concret que les volumes prédits sont compatibles avec les valeurs issues des tables et tarifs de cubage de l'Épicéa, (ii) les volumes estimés par le DNF et ceux exploités par les scieurs sont-ils différents ? Pour le savoir, il a été procédé à la comparaison des volumes annoncés par le tarif avec les volumes bois fort d'épicéas issus de coupes rases et de d'éclaircie cubés à l'aide d'un scanner en scierie qui mesure deux diamètres perpendiculaires tous les mètres le long de chaque grume.

2. Matériel et méthodes

2.1. La ressource actuelle

2.1.1. A partir des données issues de mesures terrain

Des données prélevées dans la ressource actuelle ont été utilisées dans cette partie de l'étude, afin d'examiner les différences entre les volumes arbres bois fort (VC22) annoncés par le tarif Épicéa basé sur

la circonférence à 1,50 m (C150) et la hauteur dominante (Hdom) et les volumes bois fort réels, mais aussi pour comparer les estimation selon les gammes de grosseur. Le jeu de données s'appuie sur la récolte en forêt de données dendrométriques prises dans deux peuplements équiennes situés à Saint Hubert et à Nassogne, suites à des mesures d'éclaircies. Le DNF (par l'intermédiaire de la cheffe de cantonnement de Saint Hubert Madame Pauwels) a transmis les hauteurs dominantes mesurées par ses agents et utilisées pour le cubage et celles issues du modèles numérique de terrain ForEstimator pour le peuplement de Saint Hubert.

La méthodologie de mesure a consisté à mesurer sur des arbres abattus la longueur totale (en m), la longueur jusqu'à 22 cm de circonférence (Lc22, en m) ou jusqu'à la première coupe si celle-ci est effectuée à une circonférence supérieure à 22cm, la hauteur la souche (en m), le diamètre minimum de la souche (en cm), la circonférence (en cm) à 1,50 m du sol, la circonférence à mi- longueur de la bille (Cm, en cm) et la circonférence à la première recoupe. Les mesures ont donc été prises sur le plus grand nombre d'épicéas possible indépendamment de leur statut social. Le volume (en dm³) de chaque épicéa a ensuite été estimé par la formule de Newton, $V = (LC22 / (24 \times \pi)) \times \sum (C_{souche}^2 + C22^2 + 4Cm^2)$. Les deux peuplements ont été choisis pour recueillir des données sur des arbres de grandes dimensions (Saint Hubert, C150 compris entre 94 cm et 176 cm) et de petites dimensions (C150 comprises entre 31 cm et 59 cm) issus de la première éclaircie (peuplement du cantonnement de Nassogne).

2.1.2. A partir des données de première transformation

Les volumes issus du tarif et les volumes reconstruits à partir de l'échantillon d'épicéas mesurés en scierie et présentés dans la première partie de l'étude ont été comparés.

Pour rappel la hauteur totale de chaque arbre a été calculée puisque ces derniers avaient été billonnés, il en va de même pour la circonférence sur écorce à 1,50 m puisque les billes avaient été écorcées avant la prise de mesure et que le niveau de mesure à 1,50 m a été estimé en supposant que la hauteur des souches était de 20 cm.

Le volume bois fort de chaque arbre a été obtenu suite à la sommation du volume d'une partie de la souche, de 10 à 20 cm du sol (en dm³), du volume de la grume (dm³) estimé par la formule du tronc de cône par billon de un mètre, à partir du diamètre moyen sur écorce mesuré tous les mètres le long de la bille à mi- longueur et du volume de la tête entre la fin de la grume et 22 cm de circonférence. Pour ces grumes, les diamètres moyens sur écorce tous les mètres et la longueur jusqu'à 22 cm de circonférence ne sont pas connus et ont été estimés pour recalculer le volume bois fort (voir ci-après l'approche développée pour la reconstruction des épicéas).

Reconstruction des épicéas

Pour ces données issues d'une scierie, la hauteur de souche n'est pas connue de même que la hauteur jusqu'à 22 cm de circonférence. En effet, les arbres sont recoupés à une longueur maximale de 24 mètres pour autoriser leur transport. Les pointes sont regroupées sans pouvoir être associées par la suite la grume dont elles proviennent. Il est donc impossible de reconstituer l'arbre une fois à la scierie (2017

Hoffmann, com. pers.). Pour reconstituer les arbres, une approche de modélisation statistique a été développée (Figure 17). Les différentes étapes de la modélisation sont détaillées ci-après.

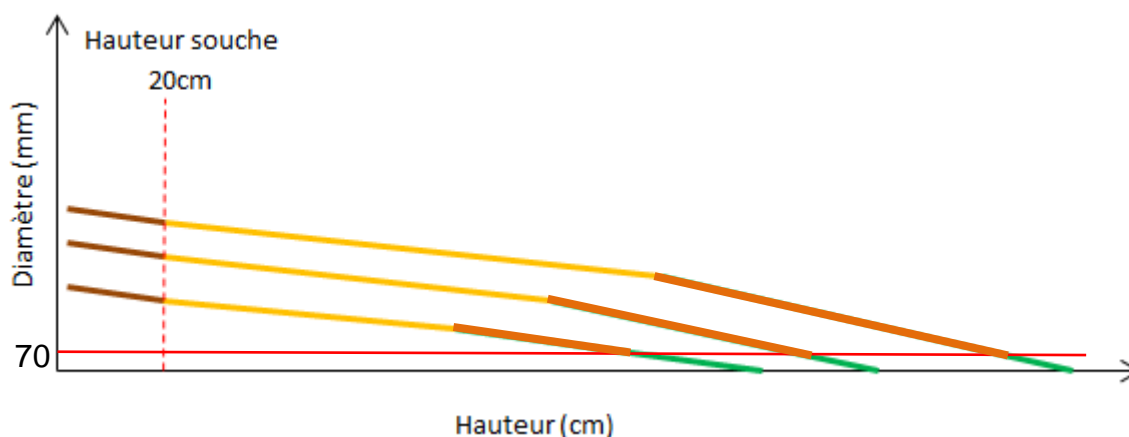


Figure 17: Profil schématique de 3 épicéas après reconstruction de la base et de la tête. La souche est représentée en brun, la bille en jaune, la partie de la tête jusqu'à 22 cm de circonférence en brun et la fin de la tête en vert.

Etape 1. La hauteur de la souche a tout d'abord été supposée constante et égale à 20 cm (Jacques Hébert, com. pers., en brun sur la Figure 17) de telle sorte que le niveau de 1,50 m de l'arbre sur pied se situe à 1,30 m de la base de la grume.

Etape 2. Le diamètre sous écorce à 1,30 m de la base de chaque grume est estimé par interpolation linéaire entre les mesures de diamètres prises à 1 m et à 2 m.

Etape 3. Les diamètres moyens sur écorce tous les mètres le long de la bille ont ensuite été estimés en additionnant le diamètre sous-écorce à deux fois l'épaisseur d'écorce. L'épaisseur de l'écorce a été estimée par la formule de Dagnelie et al. (1985) qui exprime l'épaisseur d'écorce (E en mm) en fonction de la circonférence (C en cm), $E = -0,23783 \times 10^{-2} + 0,78826 \times 10^{-2} \times C - 0,67 \times 10^{-5} \times C^2$.

Etape 4. Ce diamètre sur-écorce a ensuite été converti en circonférence.

Etape 5. La longueur de tête de chaque bille jusqu'à 22 cm de circonférence (LC22) (en brun sur la Figure 17) a ensuite été estimée, à partir d'une équation spécifique à chaque classe de longueur de grume, et ajustée sur l'échantillon historique. Dans l'échantillon historique, la longueur de tête jusqu'à 22 cm de circonférence de chaque arbre a été obtenue en soustrayant la longueur de grume à la hauteur bois fort de l'arbre. Cette longueur de tête a ensuite été reliée à un prédicteur, la circonférence du fin bout de la grume. Une équation a ainsi pu être développée pour chaque classe de longueur de grume (Tableau 9).

Tableau 9 : Paramètres de la régression linéaire reliant la longueur de tête jusqu'à 22 cm de circonférence (LC22, en cm) à la circonférence fin bout de la grume en (Cfb, en mm) pour différentes classes de longueurs de grume $LC22 = a+b \times Cfb$

Longueur grume (cm)	<i>a</i>	<i>b</i>	R ²
1520	-160,42	4,566	0.88
1620	-202,33	4,575	0.90
1720	-269,02	4,812	0.89
1820	-266,14	4,636	0.91
1920	-240	4,402	0.90
2020	-240,06	4,265	0.91
2120	-210,56	4,027	0.89
2220	-215,65	3,914	0.91

Reconstruction du volume bois fort individuel

Le volume bois fort (en dm³) de chaque arbre a pu être calculé par la somme de trois volumes que sont celui de la souche, de la bille et de la tête jusqu'à 22 cm de circonférence suite à la démarche explicitée ci-dessous.

Etape 1. Le volume de la souche (V_{souche}, en dm³) a tout d'abord été calculé par factorisation de la surface de la base de la grume par une hauteur égale à 10 cm, puisque la hauteur de souche est supposée constante et égale à 20 cm et que le volume bois fort estimé par le tarif Epicéa ne tient pas compte des 10 premiers centimètres de hauteur de la souche dans son calcul (Dagnelie, Palm, Rondeux ; 2013). La surface de la base de la grume a été calculée en multipliant le carré du diamètre moyen sur écorce de la base de la grume (calculé précédemment dans la démarche de reconstruction) par $\pi/4$.

Etape 2. Le volume de la grume (V_{grume}, en dm³) a été calculé par la sommation des volumes des billons d'un mètre cubés selon la formule du tronc de cône (Rondeux, 1999). La formule du tronc de cône a été privilégié car c'est celle qui s'adapte le mieux à la forme générale des arbres et se prête la mieux au cubage de billons successifs (Palm, 1982)

Etape 3. Le volume de la tête entre la fin de la grume et la circonférence de 22 cm (V_{tête}, en dm³) a ensuite calculé par l'équation du volume du tronc de cône.

Etape 4. Le volume bois fort (VC22, en dm³) de chaque épicéa a ensuite été calculé par l'addition des trois sous volumes calculés précédemment, $VC22 = V_{souche} + V_{grume} + V_{tête}$. Une fois le volume bois fort individuel des arbres estimé par tronc de cône, un second volume est estimé pour chaque épicéa mais cette fois avec le tarif à une entrée paramétrée, à savoir la la hauteur dominante. La hauteur dominante pour chaque peuplement a été obtenue grâce au modèle numérique de hauteur (MNH), ForEstimator

appliqué sur les parcelles dont issus les lots d'épicéa. Cependant pour les lots provenant de Burmontige et de Blanc Sart, l'estimation du volume par le tarif n'a pas pu être réalisée car ces derniers provenaient de peuplements de propriétaires privés dont il n'a pas été possible de localiser précisément les parcelles. Avec ce retrait de deux peuplements, le nombre d'épicéas utilisables est passé de 350 à 278.

2.2. Comparaison volume mesuré et volume tarif

Afin d'évaluer la qualité des estimations de volume réalisées par le DNF, deux lots d'épicéa, l'un à Saint-Hubert et l'autre à Nassogne ont fait l'objet de mesures complémentaires sur arbres abattus. Le DNF utilise le tarif à une entrée paramétré avec la hauteur dominante.

Pour le lot de Saint Hubert, deux estimations de la hauteur dominante sont disponibles. La première a été estimée par les forestiers et s'élève à 31,4 m, la seconde est fournie par le modèle numérique de hauteur ForEstimator qui prédit une hauteur dominante actualisée de 33m, soit près de 5% en plus. Deux estimations de volumes par le tarif ont été réalisées, une estimation basée sur la hauteur dominante estimée après mesures sur le terrain (volume DNF) et la seconde basée la hauteur dominante issue de ForEstimator (volume MNH). Le volume réel de chaque arbre a également été calculé par la formule de Newton grâce aux mesures terrain. Les trois volumes bois fort calculés pour ce lot ont ensuite été comparés par test de Student apparié.

Pour le lot de Nassogne composés de petits bois de première éclaircie, il a également été procédé à la comparaison entre le volume estimé par le tarif Epicéa avec la hauteur dominante calculée par ForEstimator et le volume réel à l'aide du test de Student apparié pour s'assurer que les volumes estimés par le tarif ne sont pas différents des volumes réels.

2.3. Comparaison volume bois fort scierie et volume tarif

Les volumes des tiges reconstituées avec les données disponibles en scierie et les volumes bois fort estimés par le DNF en application du tarif de cubage de l'Epicéa ont été comparés à l'aide d'un test Student apparié. Dans un premier temps, l'analyse a porté sur l'ensemble des arbres de l'échantillon scierie et ensuite sur chacun des 8 lots.

Les volumes annoncés par le tarif Epicéa étant des estimations et les volumes scieries des volumes recréés, il a été procédé à l'analyse de la dispersion de l'ensemble des résidus en fonction des volumes moyens grâce à un diagramme de Bland et Altman pour étudier la concordance et la justesse des résultats (Freund, 2016), ainsi que de la présence d'un biais éventuel qui pourrait soit résulter de l'application du tarif, soit de la démarche de reconstitution des arbres, il également été procédé à des régressions linéaires des résidus en fonction de la circonférence et ensuite du volume moyen.

De plus, comme l'échantillon scierie est constitué d'arbres originaires de huit peuplements différents où les conditions stationnelles et la sylviculture ne sont pas homogènes, et que les épicéas ont

été prélevés suite à des opérations sylvicoles différentes (coupe rase et éclaircie). Il est possible que l'origine du lot influence les estimations de volume par le tarif ou les volumes reconstitués. Dans le but d'analyser les estimations mais aussi les volumes reconstitués, l'étude de la dispersion de résidus pondérés en fonction de la circonférence à 1,50 m a été réalisée pour chaque lot. Les résidus pondérés ont été calculés à partir des résidus simples divisés par les volumes moyens, résidus pondérés = $(\text{Volume_tarif} - \text{Volume_reconstruit}) / ((\text{Volume_tarif} + \text{Volume_reconstruit})/2)$.

3. Résultats et discussion

3.1. Comparaison volume mesuré et volume tarif

Il a été procédé à une comparaison des volumes à l'aide de plusieurs test de Student appariés, afin de comparer les volumes estimés par le tarif Epicéa (selon deux hauteurs dominantes différentes, celle mesurée par le DNF et celle disponible par ForEstimator) et les volumes mesurés sur le terrain pour le lot de Saint Hubert. Le premier test a été effectué entre les deux estimations de volume par le tarif Epicéa, c.-à-d. entre le volume DNF et le volume MNH. Ensuite un test a été réalisé entre le volume réel et le volume DNF, puis entre le volume réel et le volume MNH (Tableau 10).

Tableau 10: Résultats des tests de Student appariés réalisés entre les trois de volumes (Volume réel, volume DNF et volume MNH) réalisés sur les épicéas de Saint Hubert de l'échantillon terrain. Avec pour chaque test le degré de liberté (df), la valeur du test de Student (t), la P-valeur, la moyenne des différences de volume entre estimations (Moy. diff.), la moyenne du volume réel (V_{réel} Moy.), la moyenne du volume DNF (V_{DNF} Moy.) et la moyenne du volume MNH (V_{MNH} Moy.).

df	t	P valeur	Moy. diff.	V _{réel} Moy.	V _{DNF} Moy.	V _{MNH} Moy.
56	-25,503	<2,2e ⁻¹⁶ ***	-68,591		1795,201	1863,791
56	3,528	8,435e ⁻⁰⁴ ***	171,282	1966,483	1795,201	
56	2,095	0,041 *	102,692	1966,483		1863,791

On observe d'après les résultats des tests de Student appariés (Tableau 10) que les estimations des volumes individuels réalisées avec la hauteur dominante du mesurée par le DNF ou par le MNH sont très hautement significatives. De même, les différences entre les volumes estimés par le DNF et les volumes réels sont également très hautement significatives. Enfin, cette différence n'est plus que significative entre les volumes réels et les volumes estimés par le tarif Epicéa avec la hauteur dominante calculée par ForEstimator. Cependant les volumes totaux calculés pour ce lot sont pour le volume réel, le volume DNF et le volume MNH respectivement de 112089,5 dm³, 102326,4 dm³ et 106236,1 dm³. Le volume lot annoncé dans les catalogues lors de la vente publique est donc bien disponible pour l'acheteur.

Pour le lot de Nassogne mesuré sur des petits bois de première éclaircie, il a également été procédé à la comparaison entre le volume estimé par le tarif Epicéa et le volume réel à l'aide du test de Student apparié pour s'assurer que les volumes estimés par le tarif ne sont pas différents des volumes

réels dans le cas de bois de faibles dimensions (C150<60 cm). Le test de Student apparié ($t = 1,3231$, $df = 20$, $p\text{-value} = 0,201$) permet de constater qu'il n'y a pas de différence significative entre les volumes estimés et mesurés. Néanmoins au vu du faible nombre d'estimations, nous ne pouvons affirmer que cela soit toujours le cas et recommandons de poursuivre les comparaisons sur un nombre d'arbres plus élevé.

3.2. Comparaison du volume tarif Epicéa et du volume scierie

Afin de comparer les volumes calculés d'après les mesures récoltées en scierie et les volumes estimés par le tarif de l'Epicéa, le volume total de chaque lot fourni par les deux méthodes (tarif Epicéa et reconstruction) ont été comparés et la différence moyenne calculée $[(\text{volume reconstruit} - \text{volume tarif}) / \text{volume reconstruit}] \times 100$ (Tableau 11).

Tableau 11: Caractéristiques des lots d'épicéa issus de l'échantillon scierie avec pour chacun l'origine du lot, son identifiant (ID), le nombre d'arbres (N), le volume bois fort calculé, le volume estimé par le tarif Epicéa à une entrée paramétrée et la différence moyenne (%).

Origine	ID	N	Volume reconstruit (en m ³)	Volume tarif Epicéa (en m ³)	Différence (en %)
Saint-Vith	1	54	81,418	76,468	6,08
Vielsam	2	37	69,419	68,147	6,32
Jalhay	3	49	100,836	102,650	-1,79
Theux	4	35	64,119	61,982	3,33
Elsenborn	5	5	17,357	14,833	14,54
Libin	6	34	115,979	120,023	-3,49
Butgenbach	7	34	118,123	119,051	-0,79
Saint-Hubert	8	30	78,499	77,343	1,47
Total		278	645,750	640,50	0,8

L'analyse des volumes totaux par lot (Tableau 11), nous montre que par lot, le volume annoncé par le tarif est proche du volume reconstruit. De plus, à part pour Jalhay, Libin et Butgenbach où les volumes estimés par le tarif Epicéa sont faiblement supérieurs, les volumes disponibles pour le scieur sont supérieurs à ceux estimés par le tarif Epicéa ou du moins relativement proches.

Afin de vérifier que les volumes bois fort annoncés par le DNF et estimés par l'application sur le terrain du tarif de cubage de l'Epicéa correspondent aux volumes effectivement exploitables par les scieurs pour les lots mis en vente, il a été procédé à la comparaison des volumes annoncés à l'aide d'un test de Student d'égalité des moyennes. Il en résulte que les volumes moyens respectifs de 2328,43 dm³ pour le volume scierie et de 2292,75 dm³ pour le volume estimé par le tarif ne sont pas significativement différents (valeur du test de 0,342, 553 degré de liberté, $P=0,733$). Un test de Student apparié a ensuite été effectué sur l'ensemble des épicéas de l'échantillon scierie, il en résulte que le volume par arbres n'est toujours pas significativement différent (valeur du test de 1,527; 277 degré de liberté; $P=0,128$) avec une moyenne des différences de 19 dm³.

Pour vérifier que les volumes annoncés et les volumes réels n'étaient pas différents à l'échelle du lot, Le test de Student apparié a ensuite réalisé pour chacun des huit lots (Tableau 12).

Tableau 12 : Dans le but de comparer les volumes calculés par le tarif de l'Epicéa et par la formule de tronc de cône, un test de Student d'égalité des moyennes par paire a été réalisé par lot et les résultats sont repris ci-dessous. Avec par lot identifiable par son ID, le degré de liberté du test, la valeur du test, la p valeur et le degré de significativité, la moyennes des différences entre les observations, le volume moyen scierie calculé par la formule tronc de cône (en m³) et le volume moyen estimé par le tarif (en m³).

ID	df	t	P valeur	Moy. diff.	Vmoy. scierie	Vmoy. tarif
1	53	5,199	$3,284 \times 10^{-6} ***$	0,092	1,508	1,416
2	36	1,448	$1,563 \times 10^{-1}$	0,034	1,876	1,842
3	48	-1,561	$1,251 \times 10^{-1}$	-0,037	2,058	2,095
4	34	2,158	$3,806 \times 10^{-2} *$	0,061	1,832	1,771
5	4	6,374	$3,107 \times 10^{-2} *$	0,504	3,471	2,967
6	33	-2,755	$9,472 \times 10^{-2} *$	-0,119	3,411	3,530
7	33	-0,598	$5,542 \times 10^{-1}$	-0,027	3,474	3,502
8	29	1,196	$2,412 \times 10^{-1}$	0,038	2,616	2,578

L'analyse des tests de Student appariés pour chaque lot (Tableau 12), nous permet de constater que pour les lots de Vielsam, Jalhay, Butgenbach et Saint Hubert (ID 2, 3, 7 et 8), le volume moyen n'est pas significativement différent selon la méthode de calcul des volumes. Pour les lots de Theux, Elsenborn et Libin (ID 4, 5, 6) la différence entre les volumes scierie et les volumes estimés par le tarif Epicéa est significative. Cependant, pour le lot d'Elsenborn (ID 5) vu le faible nombre d'arbres, celui-ci n'a pas été pris en compte dans la suite. Cette différence significative est de l'ordre de 61 dm³ sur 1832 dm³ annoncés par le volume scierie pour Theux. Suite au calcul de la différence moyenne, cela correspond à une sous-estimation du volume moyen par le tarif Epicéa de l'ordre de 3,3%. Pour Libin, la différence significative est de l'ordre de 119 dm³ sur les 3411 dm³ du volume scierie, ce qui correspond à l'inverse à une surestimation du volume moyen par le tarif de l'ordre de 3,5%. Pour le lot issu de Saint Vith (ID 1), les différences entre les volumes estimés par le tarif Epicéa et les volumes scieries sont très hautement significatives. Le tarif Epicéa fournit un volume moyen inférieur d'environ 6% (Tableau 11) à celui calculé à partir des données scieries pour le lot.

Un test de Student apparié a été réalisé par classe de circonférence pour analyser s'il y a des différences significatives entre les estimations de volume à l'intérieur de chaque classe de circonférence (Tableau 13).

Tableau 13 : Dans le but de comparer les volumes calculés par le tarif de l'Epicéa et par la formule de tronc de cône, un test de Student d'égalité des moyennes par paire a été réalisé par lot et les résultats sont repris ci-dessous. Avec par lot identifiable par son ID, le degré de liberté du test, la valeur du test, la p valeur et le degré de significativité, la moyennes des différences entre les observations, le volume moyen scierie calculé par la formule tronc de cône (en m³) et le volume moyen estimé par le tarif (en m³).

Classe	df	t	P valeur	Moy. diff.	Vmoy. scierie	Vmoy. tarif
(70,90]	6	-2,307	$6,051 \times 10^{-1}$	-0,029	0,686	0,715
(90,110]	39	0,426	$6,727 \times 10^{-1}$	0,005	1,105	1,099
(110,130]	73	2,010	$4,0816 \times 10^{-2}$ *	-0,026	1,592	1,566
(130,150]	55	-1,594	$1,168 \times 10^{-1}$	-0,043	2,205	2,242
(150,170]	49	2,214	$3,152 \times 10^{-2}$ *	0,079	3,049	2,970
(170,190]	39	1,782	$8,249 \times 10^{-2}$	0,081	3,878	3,796
(190,210]	11	-1,330	$2,132 \times 10^{-1}$	-0,137	4,352	4,489

L'analyse des volumes par classe de circonférence nous apprend que seulement deux classes ont des différences significatives entre le volume annoncé par le tarif Epicéa et le volume scierie. En effet, les classes (110,130] et (150,170] sont légèrement sous-estimées par le tarif par rapport au volume scierie.

Afin de d'étudier les prédictions de volume du tarif de l'Epicéa ainsi que les volumes scierie reconstruits à partir de l'échantillon scierie, il a été procédé à l'analyse de la dispersion de l'ensemble des résidus en fonction des volumes moyens (moyenne entre volume reconstruit et volume tarif) grâce à un diagramme de Bland (Figure 18). De plus, la présence d'un biais éventuel a été étudiée suite à la régression linéaire des résidus en fonction du volume estimé et de la circonférence. Il résulte de ces deux régressions que pour la première, aucun de ces deux paramètres ne sont significatifs et le R² est de 0,0006. Et pour la seconde régression des résidus en fonction de la circonférence (C150), encore aucun des deux paramètres ne sont significatifs et le R² est de 0,0009.

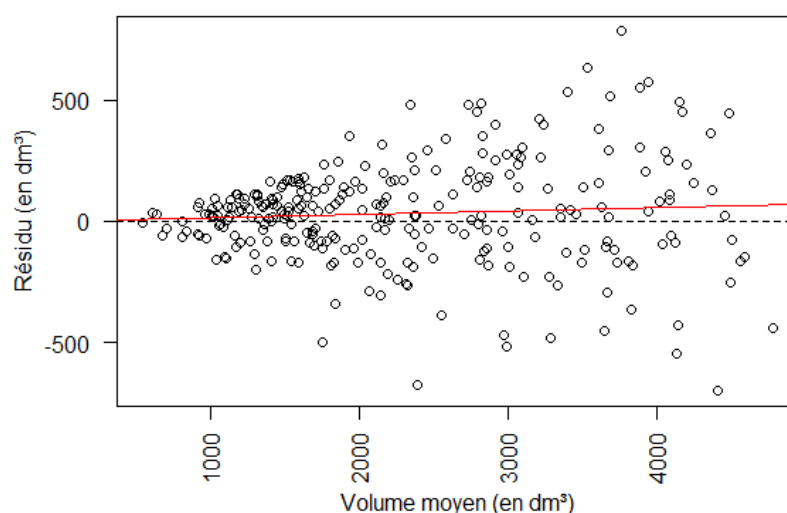


Figure 18 : Diagramme de Bland et Altman réalisé sur les résidus (en dm³) en fonction du volume moyen (en dm³) pour les épicéas de l'échantillon scierie et la droite de régression (en rouge) des résidus en fonction du volume moyen.

L'analyse du diagramme de Bland Altman nous informe d'un biais présent, à savoir les volumes sont sous-estimés par le tarif avec l'accroissement des volumes moyens. Biais qui est sans doute issu de l'utilisation du tarif Epicéa. En effet, les précédentes analyses ont démontré que le tarif Epicéa présentait un biais conditionnel.

Les dispersions des résidus pondérés par le volume moyen en fonction de la circonférence pour chacun des 8 lots ont été réalisées (Figure 19, Figure 20), dans le but d'étudier les estimations de volumes à l'échelle du lot.

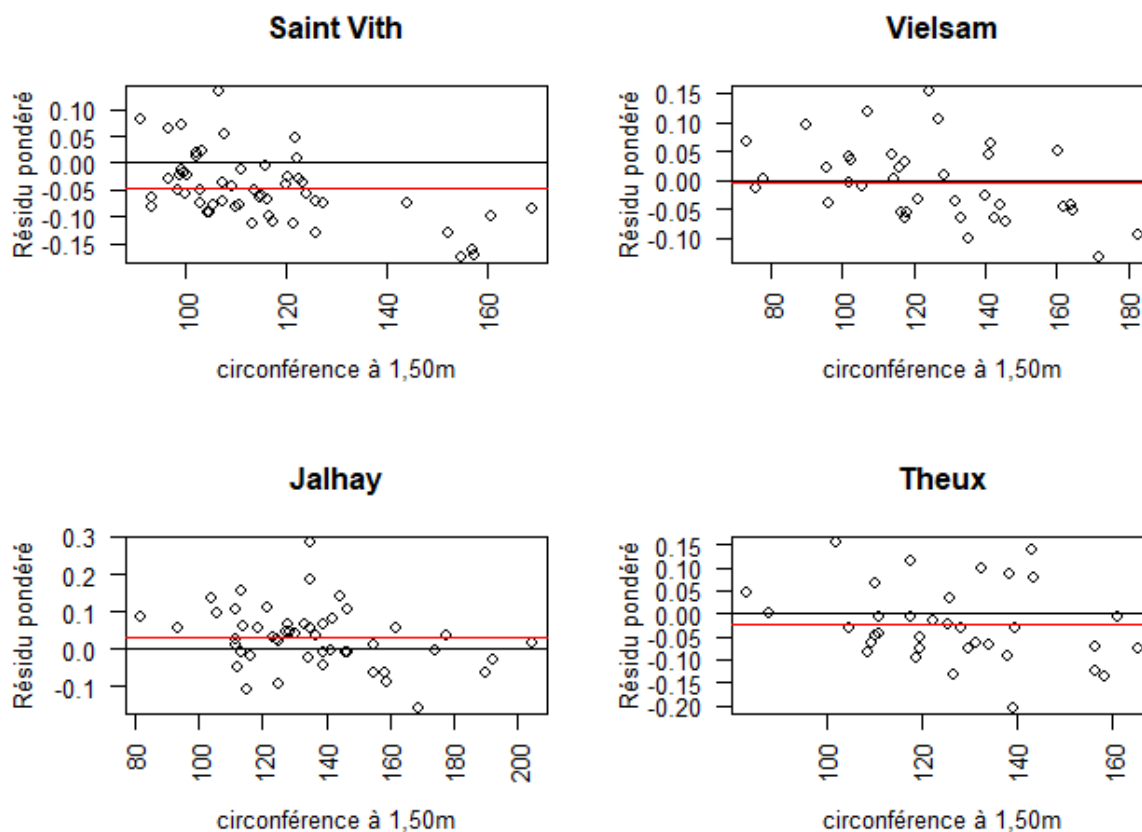


Figure 19: Dispersion des résidus pondérés par le volume moyen en fonction de la circonférence à 1,50 m pour les lots issus de Saint-Vith, de Vielsam, de Jalhay et de Theux. Avec en rouge la droite égale à la valeur moyenne des résidus pondérés.

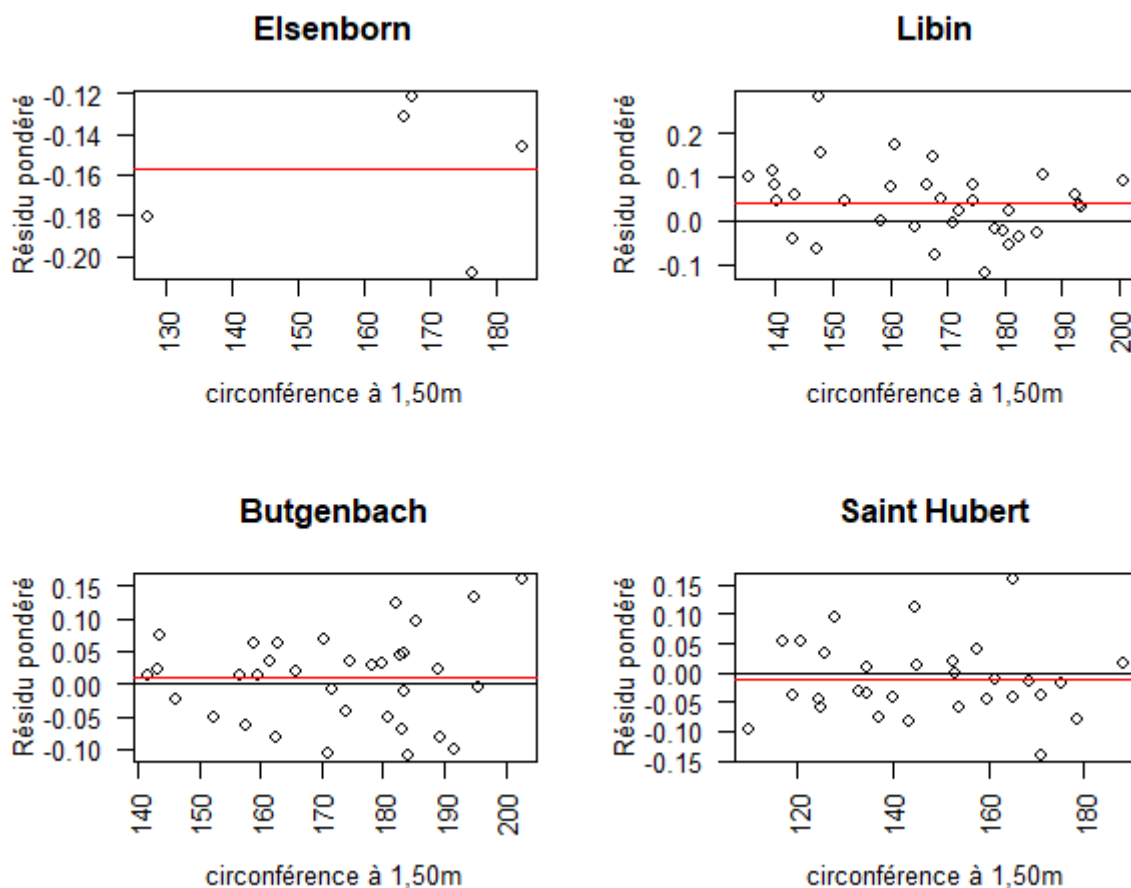


Figure 20: Dispersion des résidus pondérés par le volume moyen en fonction de la circonférence à 1,50 m pour les lots issus d'Elsenborn, de Libin, de Butgenbach et de Saint-Hubert. Avec en rouge la droite égale à la valeur moyenne des résidus pondérés.

L'analyse des résidus pondérés par le volume moyen (Figure 19, Figure 20) par lot ne permet pas de mettre en avant une tendance au sein de la dispersion qui serait due à la démarche pour calculer le volume à partir de l'échantillon scierie ou à l'estimation par le tarif Epicéa. En effet, la dispersion des résidus pondérés en fonction de la circonférence est assez proche de l'abscisse et aucune propension commune à l'ensemble des lots ne ressort.

Pour le lot de Saint-Vith, pour lequel les différences entre les volumes estimés par le tarif et les volumes reconstruits sont très hautement significatives, on observe que pour les résidus pondérés d'arbres de grandes dimensions ($C_{150} > 120$ cm), les volumes estimés par le tarif sont inférieurs aux volumes scierie. Ce qui appuie les résultats du test de Student apparié. Ce qui peut expliquer ce résultat est le manque de données sur des arbres de grosseurs importantes pour ces deux lots. En effet, particulièrement pour Saint-Vith, on observe un moindre nombre d'individus dans les classes de circonférences importantes, ce qui peut influencer le résultat.

La comparaison entre les volumes estimés par le tarif Epicéa et les volumes reconstruits pour les arbres de l'échantillon scierie montre qu'il n'y a pas de différence significative pour les volumes totaux sur l'ensemble de l'échantillon ou par lot. De plus les volumes unitaires comparés par test de Student sur l'ensemble des arbres ne sont pas non plus significatifs. Seuls les volumes unitaires d'un lot présentent une différence très hautement significative qui n'a pu être expliquée par la démarche de reconstruction des épicéas. L'analyse des différences de volumes par classe de circonférence a montré que les volumes n'étaient pas foncièrement différents à l'exception de deux classes de circonférence.

En ce qui concerne la démarche de reconstruction des volumes, l'analyse des résidus n'a pas permis de mettre en avant une tendance ou erreur systématique présente. Cependant la démarche repose sur des hypothèses qui dans le cas de non-respect peuvent biaiser les résultats. Les activités réalisées suite à l'abattage, comme une purge systématique de la base de la grume suite à des défauts impactent fortement les volumes reconstruits. Afin de valider cette dernière, il serait nécessaire de l'appliquer sur un échantillon plus grand d'arbres et issus de plusieurs scieries pour ne pas avoir de biais lié à la sélection des lots par l'exploitant.

4. Conclusion

Afin de vérifier que les volumes annoncés par le tarif Epicéa a une entrée paramétrée et les volumes disponibles pour les exploitants ne sont pas différents, il a été procédé à la comparaison des volumes estimés par le tarif Epicéa et les volumes réels mesurés sur le terrain. Il est apparu que les différences étaient significatives pour certaines classes et quelles étaient fortement dépendantes de la mesure de la hauteur dominante.

Il également été procédé à la comparaison entre le volume bois fort d'arbres reconstitués d'après des mesures scierie et les volumes estimés par le tarif. Il semble que les volumes ne sont pas significativement différents, mais que le tarif semble légèrement sous-estimer les volumes par rapport aux volumes réels. Cependant si on considère le point de vue de l'exploitant, le volume sur écorce total disponible par lot n'est pas différent de celui annoncé par le DNF, mais il s'agit du volume sur écorce et pour des arbres entiers ce qui est un volume supérieur et différent du volume sous écorce et par bille qui arrivera à l'unité d'exploitation.

Pour conclure, les estimations des volumes sur écorces par le tarif à une entrée paramétrée ne sont pas différentes des volumes disponibles pour les exploitants. Les différences entre le volume disponible et celui exploité semblent provenir du volume écorce et des pertes dues aux différentes découpes et casses. Pour appuyer cette hypothèse il serait nécessaire de suivre un lot depuis le martelage jusqu'à l'arrivée des arbres en scierie et d'assurer la traçabilité complète des arbres. Ce qui permettrait de calculer les volumes individuels à chaque étape.

Conclusion générale

L'analyse des prédictions du tarif de cubage de l'Epicéa publié en 1985 par Dagnelie, Rondeux et Palm, et en vigueur en Région Wallonne, a été réalisée afin d'éclaircir une situation de désaccord entre le DNF et certains scieurs. Celui-ci porte sur la précision des estimations de volume bois fort sur écorce. En effet selon les scieurs, les volumes bois fort annoncés lors des ventes publiques organisées par le DNF seraient sur estimés. Pour vérifier cette affirmation, quatre approches ont été développées pour étudier les différentes sources potentielles d'erreur ou d'imprécision.

Lors de la première partie de l'étude, la ressource actuelle en Epicéa a été comparée à celle de 1973, époque de la récolte des données destinées à la construction du tarif. Les résultats obtenus à partir des données historiques et actuelles montrent, que la ressource a effectivement changé en réponse à une sylviculture plus dynamique, notamment la relation allométrique hauteur-circonférence. Les arbres de la ressource actuelle atteignent une hauteur supérieure à celle de la ressource historique pour de grandes circonférences. Néanmoins ce changement de relation allométrique n'interdit pas l'utilisation du tarif Epicéa.

Ensuite, la qualité de l'ajustement a été étudiée et de nouvelles équations de cubage ont été proposées. Les résultats montrent que l'ajout d'une variable paramétrée supplémentaire au modèle générique de Dagnelie et al. (1985) ne se justifiait pas aux vues de la faible augmentation de précision engendrée. Il a également été démontré que le modèle de Dagnelie et al. (1985), de par sa forme générale, applicable à plusieurs essences, tout en étant valide, n'était pas le mieux adapté à l'Epicéa. En effet, un faible biais conditionnel a été démontré et un nouveau modèle plus précis a été ajusté.

La troisième partie de l'étude a été consacrée à l'impact de l'erreur de mesure, sur la circonférence et la hauteur dominante, sur l'estimation du volume par le tarif. Ces résultats montrent qu'une attention particulière doit être apportée à la mesure de la hauteur dominante, étant donné son impact sur l'estimation du volume. Par ailleurs, ces erreurs de mesure peuvent être évitables par simple comparaison avec la hauteur dominante fournie par un modèle numérique de hauteur dominante disponible pour toute la Région wallonne.

Lors de la dernière partie de l'étude, le volume estimé par le DNF et le volume scierie ont été comparés. Les résultats montrent que ces deux volumes n'étaient pas significativement différents pour l'ensemble des classes de grosseurs. Cependant le biais annoncé dans la seconde partie de l'étude concernant les bois de grande dimension a été confirmé.

Enfin, étant donné les problèmes d'ajustement du tarif à une entrée (la circonférence) paramétrée (par la hauteur dominante) en vigueur pour l'Epicéa pour les arbres de faibles ($C150 < 30$ cm) et de grandes dimensions ($C150 > 160$ cm) qui sont respectivement sur et sous-estimés par le tarif, une équation (Eq 1) rappelée ci-dessous apporte une réponse concrète à la question posée. Cette équation ne présente pas de biais, sa précision est légèrement meilleure et sa formulation est plus simple.

$$VC22 = -2,76 \times Hdom + 2,33 \times 10^{-4} \times C130^2 + 4,10 \times 10^{-3} \times C130 \times Hdom + 2,36 \times 10^{-3} \times C130^2 \times Hdom$$

Le volume bois fort (VC22) est estimé en dm^3 à partir de la circonférence en cm et de la hauteur en m. Le domaine de validité de ce nouveau tarif à une entrée paramétrée pour la circonférence à 1,30 m (en cm) est compris entre 23 cm et 276 cm, et pour la hauteur dominante (en m) il est compris entre 4,60 m et 40 m.

L'approche en quatre étapes développées dans le cadre de ce travail de fin d'étude pourrait être utilisée pour d'autres essences exploitées en Wallonie, et notamment le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.]), qui est au centre d'une problématique similaire.

Bibliographie

- Alderweireld, M. et al., 2015. *Inventaire Forestier Wallon - Résultats 1994 - 2012 SPW.*, Jambes, 236 p.
- Bacon, C.G. & Zedaker, S., 1987. Third-year growth response of loblolly pine to eight levels of competition control. *Southern Journal of Applied Forestry*, 11, pp.91–95.
- Bontemps JD et al., 2012. L'estimation de la biomasse et de la productivité forestières à l'épreuve des changements environnementaux. *Innovations Agronomiques*, 18, pp.39–52
- Bouchon, J., 1988. *Dendrométrie*, E.N.G.R.E.F., Nancy.
- Bouchon, J., 1974. *Les tarifs de cubage*, E.N.G.R.E.F., Nancy.
- Cailliez, F., 1980. *Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers*, FAO-Forêts, Rome
- Claessens, H. et al., 2001. Plante-t-on l'épicéa n'importe où ? L'apport d'une analyse objective de la pessière wallonne. *Forêt Wallonne*, 49–50, pp.45–51.
- Cole, E. & Newton, M., 1987. Fifth-year responses of Douglas-fir to crowding and nonconiferous competition. *Revue canadienne de recherche forestière*, 17, pp.181–186.
- Dagnelie, P., Rondeux, J. & Palm, R., 1985. *Cubage des arbres et des peuplements forestiers - Tables et équations*. Les Presses agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Dagnelie, P., Rondeux, J. & Palm, R., 2013. *Cubage des arbres et des peuplements forestiers - Tables et équations*. 2nd ed, Les Presses agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Dedry, L. et al., 2015. ForEstimator : un nouvel outil cartographique pour mieux connaître la forêt wallonne. *Forêt-Nature*, 135, pp.40–46.
- Delvaux, J., 1981. Différenciation sociale. *Journal Forestier Suisse*, 132, pp.733–749.
- Draper, N. & Smith, H., 1966. *Applied Regression Analysis*, Wiley Interscience Publication, New York.
- Freund, Y., 2016. Concordance entre deux méthodes de mesure d'une même variable : diagramme de Bland et Altman. *Annales Francaise*, 6, pp.143–146.
- Hébert, J., Herman, M. & Jourez, B., 2002. *Sylviculture et qualité du bois de l'épicéa en Région wallonne*, Forêt wallonne.
- Jobidon, R., 2000. Density-dependent effects of northern hardwood competition on selected environmental resources and young white spruce (*Picea glauca*) plantation growth, mineral nutrition, and stand structural development – a 5-year study. *Forest Ecology and Management*, 130, pp.77–97.
- Keller, R. & Thiercelin, F., 1984. L'élagage des plantations d'épicéa commun et de douglas. *Revue forestière française*, 4, pp.289–302.
- Larcher, W., 1995. *Physiological plant ecology*, SpringerVerla, Berlin.

- Mayer, D.G. & Butler, D., 1993. Statistical validation. *Ecological Modelling*, 68(1–2), pp.21–32.
- Molto, Q. et al., 2014. Predicting tree heights for biomass estimates in tropical forests – a test from French Guiana. *Biogeosciences*, 11, pp.3121–3130.
- Palm, R., 1973. *Etablissement de tarifs de cubage pour l'épicéa commun (Picea abies KARST.)*. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux, Belgique.
- Palm, R., 1981. Calcul et choix des équations de cubage d'arbres. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux*, 16, pp.351–370.
- Palm, R., 1983. Précision des valeurs estimée a l'aide de tarifs de. *Annales des sciences forestières*, 40, pp.299–308
- Palm, R., 1994. Critère de validation des équations de régression. In *Journée scientifique Statistique et Informatique appliquées*. pp. 14–22.
- Palm, R., 1981. Tables de production de l'épicéa : étude de la répartition des nombres d'arbres et du volume par catégories de circonférences. *Bulletin de la Société Royale Forestière de Belgique*, 88, pp.67–73.
- Palm, R. & Rondeux, J., 1976. A propos de deux problèmes rencontrés dans la construction de tarifs de cubage : le choix des équations de régression et l'échantillonnage des arbres. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux*, 11, pp.243–257.
- Perin, J., Hébert, J. & Lejeune, P., 2016. *Nouvelles normes sylvicoles pour les peuplements purs équiennes d'épicéa et de douglas*.
- Picard, N. et al., 2012. Using Bayesian model averaging to predict tree aboveground biomass. *Forest Science*, 58, pp.15–23.
- Rondeux, J., 1993. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*, Les Presses agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Rondeux, J., 1999. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*, 2nd ed, Les Presses agronomique de Gembloux, Gembloux.
- Rondeux, J. & Lecomte, H., 1996. *Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie - Guide méthodologique*, SPW, Jambes.
- Rondeux, J., Lecomte, H. & Hébert, J., 2010. L'inventaire forestier permanent de la Région wallonne : bilan de 15 ans d'un outil aux multiples fonctions* (Partie 1 - Fondements méthodologiques et nature des données récoltées). *Silva Belgica*, 117, pp.12–16.
- Rondeux, J. & Pauwels, D., 1998. Le Forestor Vertex: une nouvelle génération de dendromètres. *Revue Forestière Française*, 50, pp.59–64.
- Rondeux, J. & Thill, A., 1989. L'estimation de la productivité des peuplements d'Epicéa commun en Ardenne. *Silva Belgica*, 96, pp.7–15.
- Saint-André, L. et al., 2005. Age-related equations for above-and below-ground biomass of a Eucalyptus hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management*, 205, pp.199–214.

- Theil, H., 1971. *Principles of Econometrics*, New York, 736 p.
- Thibaut, A., Claessens, H. & Rondeux, J., 1998. Construction de tarifs de cubage d'arbres pour l'aulne glutineux (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2, pp.203–213.
- Thill, A. & Palm, R., 1975. Etude dendrométrique de l'épicéa commun (*Picea Abies* Karst.). *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux*, 10, pp.321–365.
- Van Der Perre, R. et al., 2015. La carte bioclimatique de Wallonie : un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières. *Forêt-Nature*, 135, pp.47–58.
- Wagner, R., 2000. Competition and critical-period thresholds for vegetation management decisions in young conifer stands¹. *The forestry chronicle*, 76, pp.961–968.
- Zianis, D. et al., 2005. Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. *Silva Fennica*, 4.