NOTE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 145

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Diamètres à maturité pour l'érable à sucre et le bouleau jaune au Québec

François Guillemette, ing.f., M. Sc.

Résumé

Une modalité fréquemment mise de l'avant dans la recherche d'une meilleure rentabilité financière des coupes partielles en forêt de feuillus consiste à récolter plus de gros arbres de belle qualité dans les essences désirées. Cette pratique soulève cependant des inquiétudes à cause du risque de créer des peuplements appauvris. Pourtant, elle n'est pas nécessairement incompatible avec la sylviculture, si elle est bien appliquée aux arbres matures et dans le cadre d'une démarche complète de diagnostic et de prescription sylvicole par l'ingénieur forestier. Or, peu d'études scientifiques permettent de définir les diamètres auxquels les arbres feuillus du Québec parviennent à maturité selon les objectifs de production. L'objectif de la présente étude est donc de calculer, à l'échelle de l'arbre, des diamètres à maturité pathologique, technique et financière selon différentes conditions pour l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.). Nous avons étalonné des modèles de mortalité et d'accroissement en volume net et en valeur monétaire d'après des observations effectuées sur 5 à 20 ans dans des blocs d'études des coupes de jardinage. Ces modèles ont servi à définir les diamètres auxquels il n'y a plus de gain à laisser croître un groupe d'arbres, compte tenu des pertes par dégradation et par mortalité. Ces diamètres à maturité technique et financière varient de 41 à 47 cm pour le bois d'œuvre de l'érable à sucre et du bouleau jaune vigoureux et de belle qualité, selon l'essence et la situation géographique au Québec. Ils sont de 44 à 60 cm pour la maturité pathologique.

Mots-clés : coupe partielle, coupe de jardinage, diamètre maximal, forêt de feuillus, maturité

Abstract

*To maximize the financial profitability of partial cuttings, harvests in hardwood forests have often targeted large, high-quality trees of the desired species. This practice, although it raises concerns about stand depletion, is not necessarily incompatible with silviculture, provided it is applied to mature trees as part of a forest engineer's comprehensive process of silvicultural prescription and diagnosis. However, few scientific studies have defined the diameters at which hardwood trees reach maturity for various production objectives in Quebec (Canada). The objective of this study was therefore to calculate diameters for pathological, technical and financial maturity at the tree scale for sugar maple (*Acer saccharum *Marsh.) and yellow birch (*Betula alleghaniensis *Britt.) under various conditions. We calibrated growth and mortality models for net volume and monetary value using observations taken over 5 to 20 years in selection cutting study plots. These models served to define the diameters at which there was no further gain in leaving a group of trees to grow, considering the losses caused by degradation and mortality. Diameters at technical and financial maturity for lumber production range from 41 to 47 cm for vigorous and good-quality stems of sugar maple and yellow birch, depending on species and geographical location. Those at pathological maturity range from 44 to 60 cm.*

Keywords : hardwood forest, maturity, maximum diameter, partial cutting, selection cutting

Correspondance: francois.guillemette@mffp.gouv.qc.ca

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-7994
Télécopieur : 418 643-2165
Courriel : recherche.forestiere@mffp.gouv.qc.ca
Site Internet : www.mffp.gouv.qc.ca

Québec

1. Introduction

Une modalité fréquemment mise de l'avant dans la recherche d'une meilleure rentabilité financière des coupes partielles en forêt de feuillus consiste à récolter plus de gros arbres de belle qualité dans les essences désirées. Cette pratique soulève toutefois des inquiétudes, à cause du risque de créer des peuplements trop pauvres pour soutenir une récolte acceptable de bois d'œuvre de haute valeur au cours des prochaines rotations (20 à 40 ans). D'ailleurs, plusieurs études sur les coupes à diamètre limite ont démontré ce risque après des coupes répétées ayant pour seule modalité la récolte des arbres d'un diamètre supérieur à un seuil (Blum et Filip 1963; Kenefic *et al.* 2005; Nyland 2005).

Malgré cela, l'utilisation d'une modalité impliquant un diamètre à hauteur de poitrine (DHP : mesuré à une hauteur de 1,3 m) dit « à maturité », au-delà duquel tous les arbres peuvent être récoltés, n'est pas nécessairement incompatible avec la sylviculture. Par exemple, c'est une modalité généralement reconnue pour la coupe de jardinage (Guillemette *et al.* 2013a). Cependant, il faut l'utiliser de la bonne façon. D'abord, ce DHP doit permettre de distinguer les arbres matures des arbres immatures, conformément à l'objectif de production du peuplement, lequel doit être réaliste. Ensuite, la coupe partielle doit être effectuée de façon à atteindre une structure, une composition, une qualité et une régénération ciblées, lesquelles détermineront le rendement en cours de rotation et à long terme. De cette façon, une directive de coupe comprenant un DHP au-delà duquel tous les arbres peuvent être récoltés peut être plus qu'une coupe à diamètre limite, notamment si une partie importante du prélèvement comprend aussi des arbres plus petits, ce qui permet d'améliorer le peuplement.

De plus, lors du cheminement diagnostique de l'ingénieur forestier, cette connaissance des DHP à maturité est utile pour reconnaître les problèmes d'ordre sylvicole et y trouver des solutions potentielles (Gravel *et al.* 2013). À titre d'exemple, une surabondance d'arbres matures pourrait justifier une récolte visant à créer des conditions plus propices à la régénération, tandis qu'un manque d'arbres matures pourrait justifier d'éclaircir pour stimuler la croissance d'arbres immatures.

Or, peu d'études scientifiques ont tenté de définir des DHP à maturité pour les arbres feuillus du Québec en fonction des objectifs de production et de la rotation prévue. Celles-ci se résument à des opinions d'experts (p. ex. Majcen *et al.* 1990), à une étude basée sur l'accroissement en DHP en fonction d'un âge estimé (Vézina 2001), à une étude de distribution de fréquence des arbres par classe de priorité de récolte et de qualité selon le diamètre (Pothier *et al.* 2013) et à une étude de la valeur des sciages obtenus selon le diamètre et le classement des arbres (Havreljuk *et al.* 2014). Leak *et al.* (1987, 2014) ont aussi suggéré des DHP à maturité financière pour le nord-est des États-Unis, tandis que Hansen et Nyland (1987) ont calculé des DHP à maturité technique pour l'État de New York. Cependant, seule l'étude de Hansen et Nyland (1987) est basée sur des observations répétées sur les mêmes arbres, lesquelles permettent à la fois d'intégrer l'accroissement en DHP et le risque de pertes par mortalité. Toutefois, ces auteurs n'ont pas considéré les changements possibles de vigueur ou de qualité des arbres. C'est pourtant le type de données qu'il faut exploiter pour bien définir les DHP à maturité. De plus, il faut parvenir à moduler ceux-ci selon la rotation, car un arbre considéré comme immature pour encore 10 ans pourrait être considéré comme mature si l'on devait attendre encore 40 ans avant de le récolter. Les DHP à maturité doivent aussi pouvoir être modulés selon l'objectif de production. De cette façon, un arbre pourrait être considéré comme mature pour la production de bois de trituration, mais pas nécessairement mature pour la production de bois d'œuvre.

La présente analyse a pour but de calculer des DHP à maturité pathologique, technique et financière selon différentes conditions pour l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh., ERS) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt., BOJ) au Québec. La maturité correspond au DHP pour lequel l'accroissement périodique de l'arbre, pour une valeur donnée, devient nul, puis commence à décliner (adapté de Barrette *et al.* 1996 et de MRN 2013). Cette maturité est qualifiée de pathologique, technique ou financière selon que la valeur d'intérêt est le volume marchand net de l'arbre, le volume net de bois d'œuvre de haute valeur de l'arbre ou la valeur monétaire de l'arbre. Ces DHP à maturité sont calculés pour les arbres qui constituent le capital forestier en croissance, c'est-à-dire des arbres sains et détenant un potentiel pour la production de bois d'œuvre. Des DHP à maturité sont aussi calculés pour les arbres défectueux, mais détenant un potentiel de production bois d'œuvre, afin d'évaluer dans quelles classes de diamètre leur récolte est plus urgente pour réduire les risques de pertes de bois d'œuvre.

2. Matériel et méthodes

2.1 Données

Des blocs expérimentaux ont été établis de 1983 à 1999 pour l'étude des effets de la coupe de jardinage en peuplement de feuillus, ou mixtes à dominance de feuillus nobles, sur les terres du domaine de l'État québécois. Chaque bloc comprend une ou plusieurs placettes jardinées, de même qu'une ou plusieurs placettes témoins (sans intervention). Ces placettes sont permanentes : les arbres ont été numérotés et y sont mesurés sur une base quinquennale. Un total de 118, 16 et 12 placettes de 0,5, 0,09 et 0,25 ha chacune, respectivement, ont été établies dans des contextes expérimentaux. Une description détaillée des placettes de 0,5 ha et de leur répartition géographique est disponible dans Majcen *et al.* (2005) et dans Fortin *et al.* (2009a). Les placettes plus petites ont été établies suivant un protocole semblable. De plus, 330 placettes de 400 m^2 chacune ont été sélectionnées parmi celles établies de 1995 à 1999 pour suivre les effets de coupes de jardinage réalisées dans un contexte opérationnel. Une description détaillée de ces placettes et un aperçu de leur répartition géographique sont disponibles dans Guillemette *et al.* (2013b).

Les données utilisées à l'échelle de l'arbre à la première et à la dernière mesure de la période de croissance sont : 1) l'état de l'arbre (vivant ou mort), 2) son essence (ERS ou BOJ), son DHP et sa classe de vigueur (Majcen *et al.* 1990). Cette classe est basée sur l'évaluation de 2 aspects de l'arbre : son risque de mortalité, interprété selon la présence ou l'absence de défauts majeurs, et son potentiel de contenir au moins une bille de bois d'œuvre. Ainsi, les classes de vigueur 1 et 2 représentent les arbres sains et vigoureux, et les classes de vigueur 3 et 4 représentent les arbres non vigoureux. Ensuite, les classes 1 et 3 représentent les arbres détenant un potentiel de bois d'œuvre, et les classes 2 et 4 représentent ceux n'en détenant pas. Il n'était pas possible de faire l'analyse avec les classes de priorité de récolte (MSCR, Boulet 2007) couramment utilisées pour le martelage des arbres au Québec, car ce système est encore trop récent. À la dernière mesure prise, 93,5 % des arbres de vigueur 1 étaient de priorité C ou R, et 72,5 % de ceux de vigueur 3 étaient de priorité M ou S.

Plusieurs données ont été utilisées à l'échelle de la placette pour tenter d'expliquer des différences temporelles, régionales ou géographiques. Les périodes de croissance ont été observées sur des durées de 5 à 20 ans (11, 45, 31 et 13 % des observations ont été prises respectivement sur environ 5, 10, 15 et 20 ans). La situation géographique a été établie sur la base des regroupements de régions écologiques (Saucier *et al.* 2009) présentés précédemment pour une partie des données (Guillemette *et al.* 2013b), mais en isolant les secteurs de Sainte-Véronique (SV) et de Duchesnay (DU) à cause de l'abondance d'observations dans ceux-ci (33 et 12 % des observations, respectivement). Les autres emplacements à l'étude sont dans les régions écologiques des collines de la basse Gatineau (2a), des collines de l'Outaouais et du Témiscamingue (3a), des collines du lac Nominingue (3b), des hautes collines du bas Saint-Maurice (3c) et des coteaux des basses Appalaches (3d), ainsi que dans les sous-domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau jaune (4est et 4ouest). La profondeur du dépôt de surface prise sur le terrain, la classe de végétation potentielle (Saucier *et al.* 2009) et le type de traitement sylvicole appliqué au peuplement (témoin ou coupe partielle) ont aussi été utilisés. D'autres variables considérées au départ n'ont pas été retenues à cause de leur trop forte corrélation avec la situation géographique : la latitude, la longitude, l'altitude et les normales climatiques de température et de précipitations selon BioSIM (Régnière et Saint-Amant 2008).

Le calcul des diamètres à maturité pathologique, technique et financière requiert d'estimer les volumes marchands nets et la valeur monétaire des arbres, au début et à la fin de la période de croissance. Pour les arbres morts en cours de période, seul le volume au début de la période de croissance a été estimé. D'abord, nous avons estimé les volumes nets des arbres (m^3) par type de bille à partir du modèle basé sur la vigueur de Fortin *et al.* (2009b). Petro et Calvert (1976) présentent une description détaillée des types de billes. En somme, les billes de sciage conventionnel (de gros volume et de belle qualité) sont de type F1 et F2, les plus petites billes de sciage conventionnel et celles plus grosses (mais de qualité moindre) sont de type F3, les petites billes de sciage non conventionnel (ou billons) sont de type F4, puis les billes destinées à la pâte sont de type P. Le volume des billes de déroulage (BOJ seulement) est compris dans celui des billes de type F1. Le modèle de Fortin *et al.* (2009b) s'applique aux billes ayant un DHP $\geq$ 23,1 cm. Bien qu'il n'ait théoriquement pas de limite supérieure, ce modèle a été utilisé jusqu'à un

DHP initial de 65 cm, de manière à éviter de l'appliquer à des arbres dont le DHP pourrait dépasser environ 70 cm en cours de période de croissance. En effet, au-delà de ce seuil, le modèle de Fortin *et al.* (2009b) est imprécis. Ensuite, le volume net de toutes les billes de l'arbre a servi à calculer le diamètre à la maturité pathologique, puis le diamètre à la maturité financière totale de l'arbre, après avoir attribué une valeur monétaire aux différentes billes. Le volume net des billes de haute valeur (types F1 et F2) a servi au calcul du diamètre à la maturité technique en bois d'œuvre de haute valeur, puis au calcul du diamètre à maturité financière de celui-ci, après avoir attribué une valeur monétaire aux différentes billes.

Finalement, la valeur monétaire des billes ($ canadiens/m^3) a été fournie par le Bureau de mise en marché des bois (BMMB, Éliane Landry Tremblay, com. pers., novembre 2015). Pour les billes destinées au sciage, il s'agit de valeurs tendance en 2015 correspondant aux revenus bruts pour les scieurs, soit la valeur des planches (1re transformation) et des copeaux sur le marché, mais sans que soient soustraits les coûts d'approvisionnement et de transformation, lesquels peuvent varier considérablement selon la période et les caractéristiques de l'usine et de son territoire d'approvisionnement. Les données mensuelles des prix de janvier 2004 à octobre 2013 ont été utilisées pour établir la valeur des planches que peuvent contenir ces billes, tandis que les liens entre les billes et les planches qu'elles contiennent proviennent d'une étude effectuée en scierie (BMMB, données non publiées). Les données trimestrielles des prix du second trimestre de 1995 au troisième trimestre de 2013 ont servi à établir la valeur des copeaux. La valeur des billes de pâte provient d'une opinion d'expert sur les prix que pourraient obtenir les scieurs pour la vente ou l'échange de ces billes à d'autres usines de transformation. Les prix de l'ERS étaient de 227,25, 192,47, 149,66, 116,83 et 58,94 $/$m^3$ pour les billes des types F1, F2, F3, F4 et P, respectivement, tandis que pour le BOJ, ils étaient de 233,73, 191,59, 142,06, 125,06 et 58,94 $/$m^3$, respectivement. Les prix entre la première et la dernière période de mesure n'ont pas été ajustés pour l'inflation. Ce sont des prix en dollars constants de 2015.

2.2 Analyses

Un DHP à maturité est défini lorsque la valeur moyenne de la variable dépendante d'intérêt, soit l'accroissement en volume net ou en valeur monétaire de l'arbre, passe d'une valeur positive à une valeur négative en progressant selon le DHP. Ainsi, à ce DHP, il n'y a aucun gain ni aucune perte à maintenir de tels arbres sur pied, car leurs accroissements sont compensés par les pertes attribuables à la mortalité dans ce même groupe d'arbres. Par conséquent, la détermination de chacun des DHP à maturité nécessite de croiser 2 modèles : un modèle de pertes par mortalité et un modèle d'accroissement de la valeur étudiée pour les arbres vivants au début et à la fin de la période de croissance. Le modèle de pertes par mortalité est en fait un modèle de probabilité de mortalité qui est ensuite croisé avec les valeurs initiales des arbres à un DHP donné. Le modèle d'accroissement, quant à lui, concerne seulement la valeur associée aux arbres survivants au cours de la période de croissance. Ce croisement du modèle de mortalité et du modèle d'accroissement a été fait pour 16 diamètres à maturité déterminés selon l'essence (ERS et BOJ), le type de maturité (technique, pathologique, financière pour le bois d'œuvre et financière totale) et la classe de vigueur (1 et 3).

La mortalité pour un arbre peut être représentée par une variable binaire qui prend une valeur de 1 si l'arbre meurt au cours de la période de croissance ou de 0 dans le cas contraire. Cette probabilité de mortalité a été modélisée à l'aide de modèles linéaires généralisés (McCullagh et Nelder 1989), en utilisant une fonction de lien log-log complémentaire. De plus, nous avons pris en compte l'effet de la corrélation entre les arbres d'une même placette en spécifiant un effet aléatoire de placette sur l'ordonnée à l'origine du modèle avec la procédure Glimmix de SAS (SAS Institute Inc. 2008). Pour augmenter les chances de détecter des différences temporelles, régionales ou géographiques, nous avons étalonné un modèle par essence en incluant un maximum de données, soit tous les arbres ayant un DHP $\geq$ 23,1 cm à la première mesure (n = 8310 pour l'ERS et 2975 pour le BOJ). Pour plus de détails concernant la méthode statistique utilisée pour modéliser la probabilité de mortalité, le lecteur peut consulter Guillemette *et al.* (2008) ou Fortin *et al.* (2008b). Après l'étalonnage, nous avons appliqué aux valeurs initiales des arbres (m^3 ou $) une proportion donnée par la probabilité de mortalité de l'arbre sur la période de croissance, afin d'obtenir les modèles de pertes par mortalité spécifiques à chaque type de maturité (pathologique, technique ou financière pour une essence donnée). Cette probabilité de mortalité conditionnelle, qui tient compte des effets aléatoires, a été utilisée après l'application d'une méthode de correction du biais (Fortin 2013).

Pour obtenir les données d'accroissement de chacune des valeurs à l'étude (m^3 ou $), nous avons soustrait la valeur initiale de la valeur finale pour chacun des arbres vivants au début et à la fin de la période de croissance. Seuls les arbres initialement de vigueur 1 ou 3 ont été retenus. Les modèles ont donc été étalonnés sur la base de 4 579 ERS de vigueur 1 et 1 473 ERS de vigueur 3, de même que 1 817 BOJ de vigueur 1 et 445 BOJ de vigueur 3.

La modélisation de ces données d'accroissement pose toutefois un problème majeur : la distribution des erreurs ne respecte aucune distribution reconnue par les modèles statistiques disponibles (Figure 1). Aucune transformation des variables dépendantes n'a permis de corriger cette situation. La forte augmentation de la variation en fonction du DHP et la présence de valeurs négatives restreignent les possibilités de transformation, mais une autre grande contrainte provient de la nature des données. En effet, la présence d'une variable catégorique dans le modèle d'estimation du volume des billes, soit la classe de vigueur, crée des observations réparties le long de courbes, comme le montre la partie inférieure de la figure 1. Par exemple, les points inférieurs montrent des arbres qui étaient de vigueur 1 au début de la période de mesure, mais qui se sont dégradés en arbres de vigueur 4 au cours de la période de croissance. Puisque l'objectif de l'étude n'est pas de publier un modèle d'évolution de chacune des valeurs des arbres, mais plutôt de définir un DHP à maturité selon le DHP auquel chacune des valeurs moyennes croise le modèle de pertes par mortalité, nous avons choisi d'étalonner quand même des modèles, mais sans tester la signification statistique de leurs paramètres ni présenter des erreurs et intervalles de confiance pour ces derniers. En effet, le non-respect de certains postulats de l'analyse de covariance n'empêche pas d'étalonner des courbes moyennes, mais empêche de tester des hypothèses sur les paramètres de ces courbes.

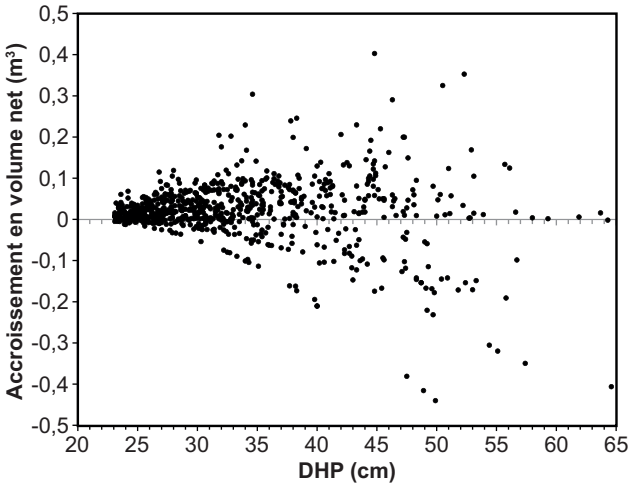

Figure 1. Exemple de données d'accroissement en volume net de bois d'œuvre de haute valeur en fonction du DHP pour les 771 ERS observés sur une période de 15 ans à Sainte-Véronique.

Pour choisir les variables indépendantes à inclure dans les modèles, celles-ci ont été ajoutées une à la fois. Le critère d'information d'Akaike (AIC) a ensuite servi à déterminer le meilleur modèle parmi ceux évalués. Les variables retenues sont celles permettant de diminuer la valeur d'AIC d'au moins 5 points (Burnham et Anderson 2002). La situation géographique, la profondeur du dépôt de surface, la classe de végétation potentielle et le type de traitement du peuplement ont été inclus en effet simple seulement, après avoir vérifié graphiquement les formes des distributions du DHP initial et de la durée de la période de croissance. Les distributions de fréquence pour le DHP avaient une forme apparentée à celle d'une équation quadratique. L'effet de la durée d'observation de l'arbre a été inclus dans le modèle, car les distributions de fréquence affichaient clairement une interaction avec le DHP. Enfin, la spécification d'un effet aléatoire de placette sur l'ordonnée à l'origine du modèle avec la procédure MIXED de SAS (SAS Institute Inc. 2008) a permis de prendre en compte l'effet de la corrélation entre les arbres d'une même placette. Notons que cette dernière étape est légèrement différente de la méthode présentée précédemment dans le rapport d'un comité de travail (Saucier *et al.* 2014). Ainsi, de petites différences peuvent exister dans les résultats rapportés.

3. Résultats

Puisque l'objectif principal de cette note est de calculer des DHP à maturité et non pas de fournir des modèles de prédiction de la mortalité ou de l'accroissement en volume ou en valeur, seuls des résultats sommaires de ces modèles sont présentés dans ce document. Un chiffrier contenant les paramètres des modèles est disponible sur demande auprès de l'auteur.

3.1 Mortalité

Les probabilités de mortalité de l'ERS et du BOJ varient significativement selon la classe de vigueur des arbres ($P < 0{,}0001$), la situation géographique ($P < 0{,}0001$), le traitement ($P = 0{,}04$) et, pour l'ERS, le DHP ($P < 0{,}0001$). De façon générale, la probabilité de mortalité des ERS de vigueur 1 est plus faible

dans les sous-domaines 4est et 4ouest, à Sainte-Véronique et dans les régions écologiques 3d et 3c, mais plus élevée dans les régions écologiques 3a, 3b et 2a ainsi qu'à Duchesnay (Figure 2a). Les ERS de vigueur 3 ont une probabilité de mortalité environ 3 fois plus forte que ceux de vigueur 1, et ceux avec un DHP de 52 cm ont une probabilité de mortalité environ 2 fois plus grande que ceux dont le DHP est de 23 cm (données non présentées). Chez les BOJ de vigueur 1, le risque de mortalité est moindre à Sainte-Véronique et dans le sous-domaine 4ouest que dans les régions écologiques 3c et 3d (Figure 2b). Les BOJ de vigueur 3 ont une probabilité de mortalité environ 6,5 fois plus forte que ceux de vigueur 1 (données non présentées). Pour l'ERS comme pour le BOJ, la probabilité de mortalité est environ 20 à 30 % plus élevée dans un peuplement non traité (témoin) qu'après une coupe partielle (données non présentées). De plus, pour les 2 essences, l'effet du temps est assez linéaire dans l'intervalle étudié. Par exemple, la probabilité de mortalité double environ entre 10 et 20 ans (données non présentées).

3.2 Accroissements

D'après les valeurs d'AIC calculées, les modèles les plus plausibles parmi les 16 évalués dans le cadre de cette étude contenaient tous un effet quadratique du DHP, avec ou sans interaction avec le temps écoulé depuis le début de la période d'observation. La situation géographique, la profondeur du dépôt de surface, la classe de végétation potentielle et le traitement du peuplement n'ont été retenus dans aucun modèle. À une exception près, les variables retenues dans les modèles d'accroissement en valeur monétaire étaient exactement les mêmes que dans les modèles correspondants d'accroissement volumétrique.

La figure 3 présente 2 exemples de modèles d'accroissement pour le volume net de bois d'œuvre de haute valeur du BOJ (types F1 et F2) selon la classe de vigueur 1 ou 3. Le modèle de la classe de vigueur 1 est le plus complexe des 16 modèles à l'étude (Figure 3a). Il comprend un effet quadratique du DHP en interaction avec celui du temps, comme le montre, par exemple, la courbe plus prononcée pour une période d'observation de 20 ans plutôt que de 10 ans. À l'opposé, le modèle pour la classe de vigueur 3 est le plus simple des 16 modèles à l'étude. Il comporte seulement un effet quadratique du DHP et n'inclut aucun effet du temps sur la période à l'étude (Figure 3b). Les modèles d'accroissement pour l'ERS ont des formes semblables à celles de ces 2 modèles (figures non présentées).

3.3 DHP à maturité

Le tableau 1 présente les DHP à maturité de l'ERS et du BOJ selon le type de maturité, la classe de vigueur et la situation géographique, pour des peuplements aménagés par coupe partielle sur une rotation de 20 ans. Chaque DHP à maturité correspond au point de croisement de la courbe de pertes par mortalité et de la courbe correspondante d'accroissement, comme l'illustre l'exemple de la figure 4. Les différences entre les situations géographiques résultent de l'application de différentes pertes par mortalité (section 3.1).

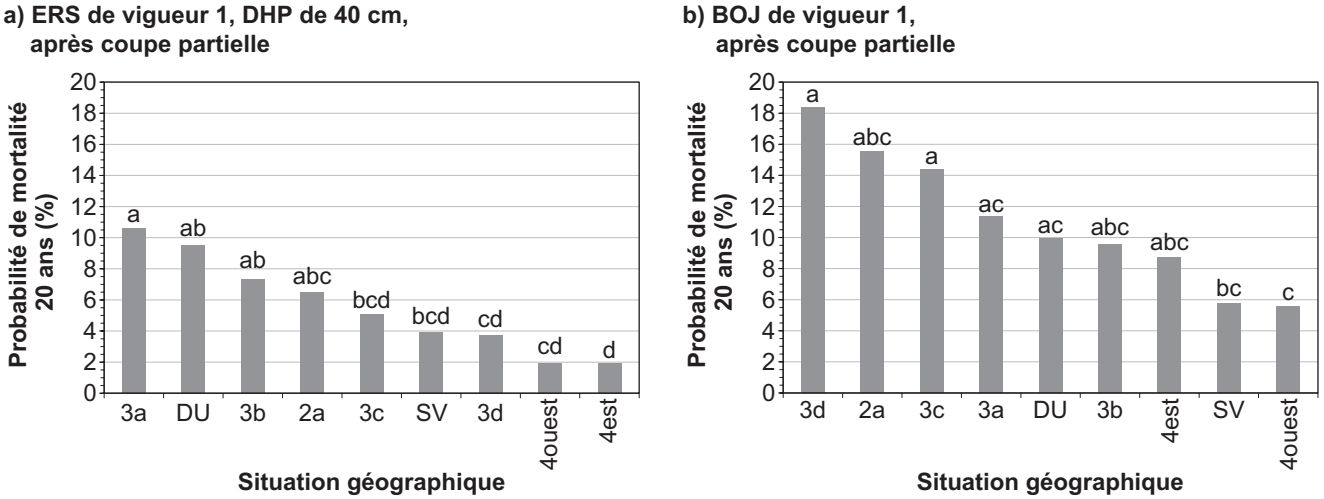

Figure 2. Probabilités de mortalité des tiges de vigueur 1 pour l'érable à sucre (ERS, a) et le bouleau jaune (BOJ, b) sur une période de 20 ans après une coupe partielle et selon la situation géographique. Les lettres différentes dans chaque graphique indiquent des différences significatives (α = 5 %).

Tableau 1. DHP (cm) à maturité technique, pathologique et financière pour l'ERS et le BOJ des classes de vigueur 1 ou 3 sur une rotation de 20 ans après coupe partielle, selon la situation géographique (telle que décrite à la section 2.1).

Situation géographique	ERS				BOJ			
	DHP à maturité technique — bois d'œuvre (types F1 et F2) (cm)		DHP à maturité pathologique (cm)		DHP à maturité technique — bois d'œuvre (types F1 et F2) (cm)		DHP à maturité pathologique (cm)	
	Vigueur 1	Vigueur 3	Vigueur 1	Vigueur 3	Vigueur 1	Vigueur 3	Vigueur 1	Vigueur 3
2a	43	45	51	39	45	37	47	23*
3a	41	41	47	23*	45	39	51	23*
3b	42	44	51	36	43	41	51	23*
3c	43	47	53	43	45	39	47	23*
3d	43	49	56	47	43	37	44	23*
4est	44	53	60	55	46	41	53	23*
4ouest	44	52	60	55	47	44	55	43
DU	41	43	47	23*	45	41	51	23*
SV	44	48	55	47	47	44	55	42
	DHP à maturité financière — bois d'œuvre (types F1 et F2) (cm)		DHP à maturité financière — volume net total (cm)		DHP à maturité financière — bois d'œuvre (types F1 et F2) (cm)		DHP à maturité financière — volume net total (cm)	
	Vigueur 1	Vigueur 3	Vigueur 1	Vigueur 3	Vigueur 1	Vigueur 3	Vigueur 1	Vigueur 3
2a	43	45	45	39	45	37	45	23*
3a	43	41	43	23*	45	39	47	23*
3b	43	45	45	37	47	41	47	35
3c	45	47	47	41	45	39	45	23*
3d	45	49	47	45	45	37	43	23*
4est	45	53	50	51	47	41	49	37
4ouest	45	53	50	51	47	45	51	43
DU	43	43	43	31	47	41	47	23*
SV	45	49	47	45	47	43	51	43

* Dans ce tableau, les DHP fixés à 23 cm sont en fait des cas où il n'y a pas de DHP pour lequel il y aurait avantage à laisser croître les arbres, une fois soustraites les pertes par mortalité.

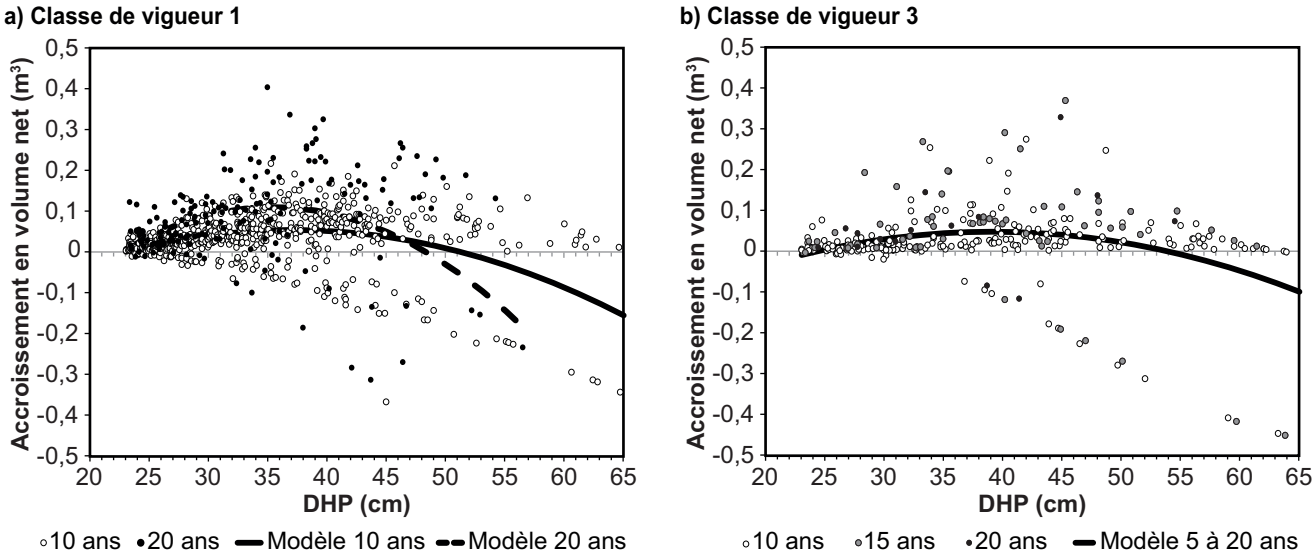

Figure 3. Exemples de données et de modèles d'accroissement des arbres survivants chez le BOJ : accroissement en volume net de bois d'œuvre de haute valeur (F1 et F2) de vigueur 1 (a) ou 3 (b) en fonction du DHP et selon la durée de la période d'observation.

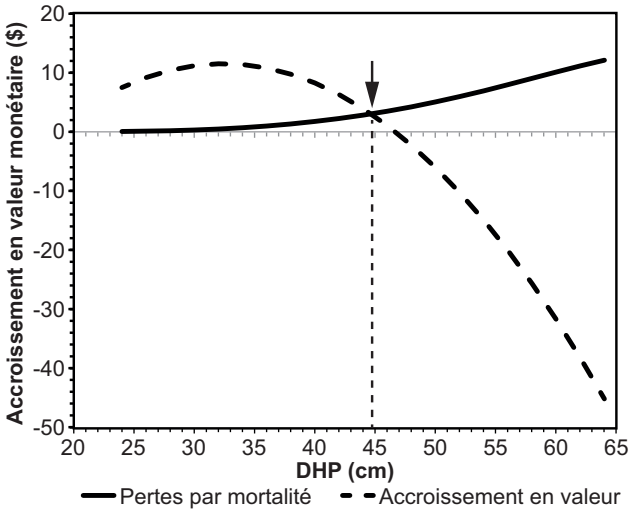

Figure 4. Exemple du comportement des modèles de pertes par mortalité et d'accroissement en valeur monétaire du bois d'œuvre de haute valeur en fonction du DHP, pour l'ERS de vigueur 1 à Sainte-Véronique, sur une rotation de 20 ans. Le DHP à maturité (flèche verticale) correspond à la valeur en X au point de croisement des 2 courbes.

Les DHP à maturité technique des arbres de vigueur 1 varient de 41 à 44 cm pour l'ERS et de 43 à 47 cm pour le BOJ (Tableau 1). Pour les arbres de vigueur 3, les courbes ont un sommet moins élevé que celles des arbres de vigueur 1 (p. ex. figure 3). Cela entraîne de plus grandes étendues de variation des DHP à maturité (de 41 à 53 cm pour la maturité technique de l'ERS de vigueur 3, et de 37 à 44 cm pour celle du BOJ de vigueur 3). Les arbres de vigueur 1 atteignent la maturité pathologique à des DHP plus grands que pour les divers types de maturité technique, soit de 47 à 60 cm pour l'ERS et de 44 à 55 cm pour le BOJ (Tableau 1). Toutefois, les arbres de vigueur 3 atteignent la maturité pathologique à des DHP plus petits que pour les divers types de maturité technique dans la plupart des situations géographiques. Ainsi, le DHP à maturité pathologique varie de 23 à 47 cm pour l'ERS (sauf dans les régions 4ouest et 4est : 55 cm) et de 23 à 43 cm pour le BOJ. À noter que les DHP fixés à 23 cm dans le tableau 1 sont en fait des cas où il n'y a pas de DHP pour lequel il y a un gain à laisser croître les arbres, une fois que les pertes par mortalité sont soustraites.

Quant aux DHP associés aux différents types de maturité financière, quelques grandes tendances se démarquent. D'abord, pour les 2 essences, les DHP à maturité financière sont assez semblables aux DHP à maturité technique des mêmes classes de vigueur, ou sinon, sauf exception, de 1 ou 2 cm plus grands (Tableau 1). Ensuite, les DHP à maturité financière sont inférieurs de 2 à 10 cm aux DHP à maturité pathologique correspondants pour les arbres de vigueur 1, et ce, pour les 2 essences. Finalement, les DHP à maturité financière calculés pour le volume net total de l'arbre et ceux pour le volume de bois d'œuvre de haute valeur sont assez proches les uns des autres.

La plupart du temps, le calcul des DHP à maturité pour une rotation de 10 ans au lieu de 20 n'a pas apporté de différence notable. Les principales différences d'intérêt concernent les DHP à maturité

technique et financière sur le bois d'œuvre pour le BOJ. Avec une rotation de 10 ans, les valeurs de DHP seraient majorées de 2 cm pour les arbres de vigueur 1 et de 5 cm pour les arbres de vigueur 3, par rapport à une rotation de 20 ans.

4. Discussion

Les modèles de mortalité présentés dans cette étude se distinguent de celui de Fortin *et al.* (2008b). En effet, nous avons ajusté 2 modèles (un pour chacune des essences), plutôt qu'un seul applicable à plusieurs essences. Cela a permis un ajustement plus fin. De plus, les modèles ont été ajustés sur une période de 5 à 20 ans, au lieu d'une période moyenne de 5 ans, et d'autres données ont été ajoutées, y compris celles des placettes établies de 1995 à 1999 dans un contexte opérationnel de coupe de jardinage (voir Guillemette *et al.* 2013b). Une autre particularité des modèles présentés ici est la présence d'une variable associée à la situation géographique (Figure 2). De façon générale, les probabilités de mortalité sont plus élevées vers l'ouest de la province (régions écologiques 2a, 3a et 3b) et dans les endroits plus près du domaine bioclimatique de l'érablière à tilleul (DU) que sur des sites plus frais (SV et les régions écologiques 4est et 4ouest). Les variables explicatives les plus importantes dans le modèle de Fortin *et al.* (2008b), comme la classe de vigueur de l'arbre, sont aussi présentes dans les modèles proposés. Toutefois, certains effets plus faibles sur la probabilité de mortalité ne sont pas apparents, comme ceux du traitement de coupe, de la surface terrière résiduelle et, dans le cas du BOJ, du DHP. De même, Guillemette *et al.* (2008) n'avaient observé aucun effet du DHP sur la probabilité de mortalité du BOJ. Le fait que les plus gros BOJ aient une plus grande probabilité de mourir serait attribuable au fait qu'ils sont plus fréquemment défectueux. Cet effet est donc capté par la variable « vigueur » au lieu de la variable « DHP ». Par ailleurs, l'effet de la surface terrière n'a pas été testé, et ce, pour 2 raisons. Premièrement, la présence de placettes de tailles très différentes (de 0,04 à 0,5 ha) avait un effet sur la variation entre les placettes. Deuxièmement, la variable « traitement » aurait pu servir de substitut, puisque la surface terrière moyenne des placettes dans un même traitement était assez semblable dans tous les jeux de données (traités : 18 à 19 m^2/ha, témoins : 26 à 28 m^2/ha).

Les 16 modèles d'accroissement en valeur (m^3 ou $) comprennent principalement le DHP, en effet simple ou quadratique, ainsi que le temps d'observation (de 5 à 20 ans). L'absence d'un effet de la situation géographique est en partie attribuable au fait que l'accroissement en DHP ne varie pas nécessairement entre les différentes régions du Québec (Fortin *et al.* 2008a), ainsi qu'à l'absence d'un effet semblable dans le modèle d'estimation du volume net de l'arbre par type de bille. Étonnamment, l'effet du traitement n'a pas été retenu, car normalement les arbres s'accroissent plus rapidement en DHP lorsque la surface terrière résiduelle est plus faible (voir Fortin *et al.* 2008a). Les données indiquent que les changements de classe de vigueur ont engendré une grande variabilité des valeurs prédites pour les volumes nets par type de bille. Cette variabilité pourrait avoir été trop importante pour permettre au modèle de détecter un effet attribuable au traitement, par l'entremise d'une différence d'accroissement diamétral. Finalement, 14 des 16 modèles d'accroissement comprennent un effet du temps. Dans le cas des modèles d'accroissement en volume et en valeur du bois d'œuvre (types F1 et F2) pour le BOJ de vigueur 3, l'absence de l'effet du temps est plutôt inattendue, puisque l'accroissement est directement lié au temps. Ce peut être le résultat du hasard pour un groupe d'arbres beaucoup moins nombreux que les autres, notamment pour des observations faites de 15 à 20 ans (84 arbres). Dans le cas de ces 2 derniers modèles, l'extrapolation des résultats sur une période différente de celle de l'étude serait donc très hasardeuse.

La plupart des DHP à maturité pathologique de la présente étude varient de 47 à 56 cm pour les arbres de vigueur 1 (Tableau 1), ce qui se compare aux valeurs habituellement proposées au Québec. Majcen *et al.* (1990) ont proposé d'utiliser un DHP maximal d'environ 50 à 60 cm pour le jardinage des érablières au Québec. Cette proposition était basée sur la diminution qu'ils avaient observée sur le terrain de la fréquence des plus gros arbres de belle qualité. Vézina (2001) avait calculé des DHP à maturité financière de 50 à 57 cm pour l'ERS et de 55 à 59 cm pour le BOJ selon la classe de qualité (ABCD). Cependant, sa méthode ne considérait pas le risque de perte par mortalité ni celui de changement de qualité de l'arbre. Ces différences méthodologiques expliquent les valeurs plus faibles obtenues dans la présente étude. Pothier *et al.* (2013) ont suggéré de fixer le DHP maximal à environ 65 cm pour l'ERS et à environ 75 cm pour le BOJ au Québec. Leur méthode était fondée sur l'hypothèse que la distribution de fréquence des DHP selon la priorité de récolte de l'arbre (MS ou CR) et sa qualité (ABC ou D) dans l'inventaire temporaire (2003–2011) représentait bien

la dynamique d'évolution des arbres. Ils ont défini les DHP maximaux lorsque la fréquence des arbres défectueux et de qualité sciage (MS et ABC) était égale à celle des arbres défectueux et de qualité pâte (MS et D). Comparativement à la méthode de la présente étude, celle de Pothier *et al.* (2013) semble sous-estimer les pertes par mortalité et les pertes de volume net de bois dans les arbres qui se dégradent, car leurs DHP maximaux sont beaucoup plus grands que les DHP à maturité de la présente étude.

Les DHP à maturité technique ou financière pour le bois d'œuvre calculés pour les arbres de vigueur 1 sont beaucoup plus près de ceux suggérés par Leak *et al.* (1987) pour le nord-est des États-Unis. En effet, nos résultats indiquent des diamètres de 41 à 47 cm selon l'essence et la situation géographique (Tableau 1), tandis que Leak *et al.* (1987) proposent des diamètres de 41 à 51 cm pour les 2 mêmes essences, avec une variation selon la qualité du tronc de l'arbre. Leur méthode consistait à déterminer le diamètre à partir duquel l'arbre pourrait atteindre la plus haute classe de qualité. Les résultats de la présente étude sont aussi semblables à ceux de Hansen et Nyland (1987) dans l'État de New York, qui ont fixé les DHP maximaux à 40, 50 ou 60 cm, selon les structures de peuplements. En effet, les auteurs concluent que la production de gros arbres ayant un potentiel de sciage n'était pas améliorée par la conservation des arbres de DHP > 50 cm. Ils ont tiré cette conclusion même si leur étude ne considérait pas le risque de changement de classe de vigueur ou de qualité des arbres avec le temps. Or, cela est susceptible de diminuer davantage les DHP à maturité calculés. Havreljuk *et al.* (2014), quant à eux, ont observé la valeur au mètre cube des sciages de l'ERS et du BOJ pour 2 sites au Québec. Leurs résultats indiquent que les arbres de plus grande valeur au mètre cube sont ceux dont le DHP varie d'environ 33 à 48 cm. Ce constat n'est pas étranger au fait que c'est à partir d'un DHP d'environ 33 cm qu'il est possible d'observer des billes de sciage de haute valeur (types F1 et F2).

Les résultats sont plus variables pour les DHP à maturité des arbres défectueux, mais détenant un potentiel de production bois d'œuvre (vigueur 3), que pour ceux des arbres de vigueur 1. Certaines valeurs sont plus élevées que la valeur correspondante pour un arbre de vigueur 1, alors que d'autres sont nettement plus faibles (Tableau 1). Cette situation découle du fait que les modèles d'accroissement des arbres de vigueur 3 avaient une forme quadratique moins prononcée que ceux des arbres de vigueur 1. Ainsi, les courbes conservaient une valeur positive jusqu'à un DHP un peu plus grand, mais le sommet de la courbe était moins élevé que pour les modèles des arbres de vigueur 1 (Figure 3, exemple avec les modèles à 20 ans). Cette situation est attribuable au fait que ces arbres avaient initialement un volume net plus faible; par conséquent, ils risquaient moins d'en perdre après un déclassement vers la classe de vigueur 4. De plus, certains de ces arbres pouvaient corriger un défaut (blessure ou bris de houppier) et ainsi être surclassés vers la classe de vigueur 1. Lorsque les pertes par mortalité des arbres de vigueur 3 étaient soustraites de l'accroissement des arbres survivants, les valeurs finales étaient soit toutes négatives (DHP à maturité de 23 cm dans le tableau 1), soit légèrement positives sur une grande étendue de valeurs de DHP. Ainsi, une petite différence entre 2 modèles pouvait générer une différence appréciable dans le DHP à maturité. Par conséquent, si les erreurs d'estimation des DHP à maturité avaient pu être considérées, elles seraient relativement grandes pour les arbres de vigueur 3 et auraient possiblement pour effet de couvrir toute l'étendue des DHP étudiés. En effet, le seuil d'accroissement nul serait probablement toujours inclus dans l'intervalle de confiance du modèle. La situation n'est pas la même pour les arbres de vigueur 1, car les courbes d'accroissement à 20 ans ont un sommet plus élevé et des pentes plus abruptes vers le DHP où elles passent de valeurs positives à négatives (p. ex. figure 3a). Ainsi, même si la méthode d'analyse ne permet pas de calculer une erreur autour des DHP à maturité présentés au tableau 1, on peut penser que cette erreur serait de seulement quelques centimètres pour les arbres de vigueur 1, compte tenu de la forme de chacune des courbes. Considérant cette situation, on doit davantage considérer les DHP présentés au tableau 1 comme des ordres de grandeur que comme des valeurs très précises, surtout pour les arbres de vigueur 3.

Les DHP calculés ont été peu influencés par le choix de calculer les diamètres à maturité technique et financière pour le bois d'œuvre avec seulement les billes de sciage de haute qualité (types F1 et F2, sans les billes de type F3 [palette] ni les billes de déroulage). En effet, d'autres modèles (non présentés) ont été ajustés avec les arbres de vigueur 1 en incluant les billes de sciage F3. Ces modèles indiquaient des DHP à maturité technique et financière d'au plus 2 cm inférieurs aux DHP à maturités technique et financière de bois d'œuvre calculés à partir des billes de type F1 et F2 seulement. De plus, pour le BOJ de vigueur 1, nous avons ajusté un modèle de DHP à

maturité financière du bois d'œuvre afin de vérifier l'effet potentiel de ne pas tenir compte de la valeur des billes de déroulage dans le volume des billes de type F1 chez cette espèce. L'hypothèse posée était que 50 % du volume des billes de type F1 était composé de billes de déroulage, et que la valeur financière de ce volume surpassait celui des autres billes de type F1 par 25 % pour les billes provenant d'arbres dont le DHP était < 45 cm, et de 50 % pour les billes provenant d'arbres dont le DHP était ≥ 45 cm. En fin de compte, ce modèle a prédit des DHP à maturité financière pour le bois d'œuvre semblables ou légèrement inférieurs à ceux calculés sans cette hypothèse.

Ces deux analyses ont aussi démontré que la méthode de calcul n'est pas très sensible au prix des bois. En effet, si les bois ont une plus grande valeur monétaire, alors ils en bénéficient à la fois lors de la mesure initiale et de la mesure finale. Or, l'information critique dans la détermination d'un DHP à maturité est l'écart entre la valeur initiale et la valeur finale (m^3 ou $). Les deux variables les plus déterminantes pour expliquer de grands écarts entre les deux mesures semblent plutôt être la probabilité de mortalité et le déclassement des arbres survivants.

Par ailleurs, l'application du modèle de Fortin *et al.* (2009b) pour prédire le volume net de l'arbre par type de billes permet surtout de distinguer les DHP à maturité technique des DHP à maturité pathologique. Des travaux récents (Havreljuk *et al.* 2015) ont permis de réviser les modèles de Fortin *et al.* (2009b), mais les ajustements apportés pour l'ERS et le BOJ concernent surtout les arbres d'un DHP > 70 cm, ce qui ne modifierait pas les résultats de la présente étude. Notre méthode n'a pas examiné la perte de volume de haute valeur ni la perte de valeur monétaire pour des billes d'ERS grandement affectées par le cœur noir ou coloration minérale. Pour une bille de qualité et de volume net équivalents, la présence d'un cœur noir est susceptible de causer une perte de rendement en sciage, principalement au cœur de la bille. En effet, ce volume coloré n'est pas soustrait du volume net de la bille, même s'il ne permet pas de produire des planches convenables (Petro et Calvert 1976). Cette situation est plus fréquente dans l'ouest de la province (Havreljuk *et al.* 2013), et plus particulièrement dans et autour du sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest. Cela pourrait justifier le choix de DHP à maturité technique ou financière un peu inférieurs aux valeurs présentées au tableau 1.

Les DHP à maturité ont été calculés à partir d'observations faites sur des arbres croissant en conditions non contrôlées par l'aménagement au début de l'étude. Ainsi, on peut penser que des arbres croissant sous aménagement intensif pourraient atteindre un même DHP à un âge plus jeune et, ainsi, atteindre la maturité à un DHP plus grand. Les arbres observés ont à peu près tous été laissés après au moins une coupe sélective des plus beaux arbres. Certains pouvaient être de belle qualité à cette époque, mais d'un diamètre trop petit, tandis que les plus gros peuvent avoir été laissés sur pied à cause de leur faible qualité. Il sera donc pertinent de réviser les DHP à maturité de la présente étude lorsque de nouvelles données seront disponibles. Entre autres, des observations faites avec les classes de priorité de récolte (MSCR) pourraient servir à préciser le modèle de mortalité selon cette classification, ainsi qu'avec les classes de qualité ABCD, de façon à mieux estimer les volumes nets.

Finalement, précisons que les calculs ont été effectués à l'échelle de l'arbre seulement. Ainsi, des analyses plus globales à l'échelle du peuplement et du territoire sous aménagement pourraient conduire à des résultats différents, notamment si elles prennent en considération les coûts de récolte et de transformation, de même que les autres critères d'aménagement, comme la rétention de gros arbres à des fins écologiques ou l'établissement de la régénération naturelle.

5. Implications pour l'aménagement

La classification actuelle des arbres sur pied pour l'aménagement de la forêt de feuillus au Québec se fait principalement en fonction des classes de priorité de récolte (M, S, C et R, Boulet 2007) plutôt que celles de vigueur. Cependant, puisque 93,5 % des arbres de vigueur 1 sont de priorité C ou R, lesquelles constituent le capital forestier en croissance, il est raisonnable d'appliquer directement les DHP à maturité des arbres de vigueur 1 aux arbres de priorité C et R. Le lien n'est pas aussi étroit entre les arbres de vigueur 3 et ceux de priorité M ou S (classes pour lesquelles 72,5 % des arbres sont de vigueur 3). Dans ce cas, si l'on retirait des arbres de vigueur 3 ceux affligés de blessures saines ou d'un bris modéré du houppier (c'est-à-dire les arbres les plus susceptibles de passer de la classe de vigueur 3 à la classe 1 en cours de rotation), on pourrait penser que les DHP à maturité des arbres de priorité M ou S seraient atteints plus rapidement que pour les arbres de vigueur 3. De plus, si l'on tient compte du fait que

l'accroissement des arbres de vigueur 3, lorsqu'il est positif, demeure très faible (Figure 3b et résultats non présentés), on peut supposer que l'accroissement des arbres de priorité M ou S sera très faible ou négatif, peu importe leur DHP, surtout là où les taux de mortalité sont les plus élevés. Par conséquent, ceux-ci pourraient être considérés comme matures, quel que soit leur DHP.

La première utilisation des DHP à maturité est d'aider à définir le potentiel de production selon les objectifs d'aménagement. Supposons, par exemple, que l'objectif est de produire un maximum de bois d'œuvre de haute valeur sur une rotation de 20 ans. Selon les résultats du tableau 1 pour des arbres de vigueur 1, il faudrait chercher à produire des arbres dont le DHP varie de 41 à 47 cm, puis les récolter. Cet objectif de production permettrait ensuite de déduire une structure diamétrale cible pour un aménagement par coupes partielles avec une rotation relativement constante, comme ce qu'on obtient après une coupe de jardinage. Pour une rotation plus courte que 20 ans, les DHP à maturité (maturités technique et financière pour le bois d'œuvre) étaient sensiblement les mêmes pour l'ERS et ils augmentaient de 2 cm pour le BOJ de vigueur 1. En poussant plus loin ce raisonnement, on évalue que les DHP à maturité pour une rotation de 30 ans seraient sensiblement les mêmes qu'à 20 ans pour l'ERS, et qu'ils diminueraient d'environ 2 cm pour le BOJ.

La seconde utilisation des DHP à maturité est d'aider au diagnostic et à la prescription sylvicole. Un peuplement comprenant beaucoup d'arbres matures ou défectueux pourrait contenir un nombre insuffisant d'arbres en croissance pour le maintien de la productivité à long terme. Cela justifierait des actions concrètes pour permettre l'installation ou le développement de la régénération (Leak *et al.* 2014). Les méthodes pour recenser les arbres défectueux (p. ex. classes M et S selon Boulet 2007) sont bien documentées. Le tableau 1 permet d'établir quels arbres sont matures parmi ceux qui ne sont pas défectueux. De plus, la possibilité de définir une cible de structure diamétrale à partir d'un DHP à maturité connu aide à diagnostiquer la présence possible de problèmes de structure, comme un surplus ou un déficit d'arbres dans certaines classes de DHP.

6. Conclusion

Les diamètres à maturité calculés à l'échelle de l'arbre servent d'abord et avant tout à aider les ingénieurs forestiers à mieux définir les peuplements qu'ils veulent et qu'ils peuvent produire, selon les objectifs du plan d'aménagement. Ainsi, au moment d'établir un diagnostic sylvicole, les ERS et BOJ vigoureux et de belle qualité peuvent être considérés comme techniquement et financièrement matures pour la production de bois d'œuvre lorsqu'ils atteignent un diamètre de 41 à 47 cm, selon l'essence et la situation géographique. Ces nouvelles connaissances s'intègrent à la démarche diagnostique conduisant à la prescription sylvicole, mais elles ne doivent pas devenir une modalité aveugle ciblant un diamètre maximal unique pour toutes les prescriptions sylvicoles. Les diamètres à maturité doivent être employés en tenant compte des nombreux modèles utilisés et de leurs erreurs associées, et considérés comme des ordres de grandeur plutôt que comme des cibles très précises.

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier les nombreuses personnes responsables de la cueillette des données sur le terrain, autant à la Direction de la recherche forestière (DRF) que dans les directions régionales et les unités de gestion du Ministère. En particulier, je tiens à souligner les contributions de MM. Jocelyn Hamel, Pierre Laurent, Laurier Groleau et Pierrot Boulay, techniciens forestiers, pour la cueillette des données et les vérifications et la gestion des bases de données. De plus, mes remerciements particuliers s'adressent à MM. Zoran Majcen, ing.f., *Ph. D.*, Steve Bédard, ing.f., M. Sc., et Sébastien Meunier, ing.f., M. Sc., pour la gestion des projets ainsi qu'à Mme Marie-Claude Lambert, stat., M. Sc., pour ses conseils statistiques. Je remercie aussi les réviseurs anonymes, M. Steve Bédard et à M. Marcel Prévost, éditeur associé, pour leurs commentaires constructifs, Mme Denise Tousignant pour la révision linguistique et l'édition du manuscrit, ainsi que Mmes Nathalie Langlois et Maripierre Jalbert pour la mise en page et le graphisme. Ce travail a été financé dans le cadre des projets internes n^{os} 1420558-142332023, 1420558-142332026 et 1420558-142332053 de la DRF.

Références

Barrette, Y., G. Gauthier et A. Paquette, 1996. *Aménagement de la forêt pour fins de production ligneuse.* Dans : *Manuel de foresterie*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Éditions MultiMondes. Québec, QC. p. 647–672.

Blum, B.M. et S.M. Filip, 1963. *A demonstration of four intensities of management in northern hardwoods.* U.S.D.A., Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Upper Darby, PA (États-Unis). Research Paper NE-4. 16 p. [www.nrs.fs.fed.us/pubs/5992]

Boulet, B., 2007. *Défauts externes et indices de la carie des arbres : Guide d'interprétation.* 2e édition. Les Publications du Québec. Québec, QC. 317 p.

Burnham, K.B. et D.R. Anderson, 2002. *Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach.* 2e édition. Springer-Verlag. New York, NY (États-Unis). 488 p.

Fortin, M., 2013. *Population-averaged predictions with generalized linear mixed-effects models in forestry: An estimator based on Gauss-Hermite quadrature.* Can. J. For. Res. 43(2): 129–138.

Fortin, M., S. Bédard, J. DeBlois et S. Meunier, 2008a. *Accounting for error correlations in diameter increment modelling: a case study applied to northern hardwood stands in Quebec, Canada.* Can. J. For. Res. 38: 2274–2286.

Fortin, M., S. Bédard, J. DeBlois et S. Meunier, 2008b. *Predicting individual tree mortality in northern hardwood stands under uneven-aged management in southern Québec, Canada.* Ann. For. Sci. 65(2): 205.

Fortin, M., S. Bédard et J. DeBlois, 2009a. *SaMARE : un modèle par tiges individuelles destiné à la prévision de la croissance des érablières de structure inéquienne du Québec méridional.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 155. 44 p. [https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire155.pdf]

Fortin, M., F. Guillemette et S. Bédard, 2009b. *Predicting volumes by log grades in standing sugar maple and yellow birch trees in southern Quebec, Canada.* Can. J. For. Res. 39: 1928–1938.

Gravel, J., S. Meunier et É. Provost, 2013. *Chapitre 4 – Le diagnostic et la prescription sylvicoles.* Dans : Ministère des Ressources naturelles (éd.). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 — Les concepts et l'application de la sylviculture.* Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. Les Publications du Québec. Québec, QC. p. 42–55.

Guillemette, F., S. Bédard et M. Fortin, 2008. *Evaluation of a tree classification system in relation to mortality risk in Québec northern hardwoods.* For. Chron. 84(6): 886–899.

Guillemette, F., S. Bédard, D. Pin et D. Dumais, 2013a. *Chapitre 23 – Les coupes de jardinage avec gestion par arbres.* Dans : Ministère des Ressources naturelles (éd.). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 — Les concepts et l'application de la sylviculture.* Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.P. Saucier. Les Publications du Québec. Québec, QC. p. 566–603.

Guillemette, F., M.-C. Lambert, M.-M. Gauthier et S. Bédard, 2013b. *Effets réels décennaux des coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999 dans un contexte opérationnel.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 168. 34 p. [www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Guillemette-Francois/Memoire168.pdf]

Hansen, G. et R.D. Nyland, 1987. *Effects of diameter distribution on the growth of simulated uneven-aged sugar maple stands.* Can. J. For. Res. 17(1): 1–8.

Havreljuk, F., A. Achim et D. Pothier, 2013. *Regional variation in the proportion of red heartwood in sugar maple and yellow birch.* Can. J. For. Res. 43(3): 278–287.

Havreljuk, F., A. Achim, D. Auty, S. Bédard et D. Pothier, 2014. *Integrating standing value estimations into tree marking guidelines to meet wood supply objectives.* Can. J. For. Res. 44(7): 750–759.

Havreljuk, F., S. Bédard, F. Guillemette et J. DeBlois, 2015. *Predicting log grade volumes in northern hardwood stands of southern Quebec.* Dans : *Proceedings, 5th International Scientific Conference on Hardwood Processing 2015 (ISCHP 2015)*. Québec (Québec), 15–17 septembre 2015. p. 107–114.

Kenefic, L.S., P.E. Sendak et J.C. Brissette, 2005. *Comparison of fixed diameter-limit and selection cutting in northern conifers.* North. J. Appl. For. 22(2): 77–84.

Leak, W.B., D.S. Solomon et P.S. DeBald, 1987. *Silvicultural guide for northern hardwood types in the northeast (revised).* U.S.D.A., Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Broomall, PA (États-Unis). Research Paper NE-603. 36 p. [www.treesearch.fs.fed.us/pubs/4421]

Leak, W.B., M. Yamasaki et R. Holleran, 2014. *Silvicultural guide for northern hardwoods in the northeast.* U.S.D.A., Forest Service, Northern Research Station. Newtown Square, PA (États-Unis). General Technical Report NRS-132. 46 p. [www.treesearch.fs.fed.us/pubs/45874]

Majcen, Z., Y. Richard, M. Ménard et Y. Grenier, 1990. *Choix des tiges à marquer pour le jardinage d'érablières inéquiennes — Guide technique.* Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction de la recherche et du développement, Service de la recherche appliquée. Mémoire n° 96. 96 p. [https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire96.pdf]

Majcen, Z., S. Bédard et S. Meunier, 2005. *Accroissement et mortalité quinze ans après la coupe de jardinage dans quatorze érablières du Québec méridional.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 148. 39 p. [www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Bedard-Steve/Memoire148.pdf]

McCullagh, P. et J.A. Nelder, 1989. *Generalized linear models, second edition.* Chapman & Hall/CRC. Monographs on statistics and applied probability n° 37. New York, NY (États-Unis). 511 p.

[MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013. *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 – Les concepts et l'application de la sylviculture.* Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. Les Publications du Québec. Québec, QC. 744 p.

Nyland, R.D., 2005. *Diameter-limit cutting and silviculture: A comparison of long-term yields and values for uneven-aged sugar maple stands.* North. J. Appl. For. 22(2): 111–116.

Petro, F.J. et W.W. Calvert, 1976. *La classification des billes de bois franc destinées au sciage.* Ministère des Pêches et de l'Environnement du Canada, Service canadien des forêts. Rapport technique de foresterie n° 6F. 69 p.

Pothier, D., M. Fortin, D. Auty, S. Delisle-Boulianne, L.-V. Gagné et A. Achim, 2013. *Improving tree selection for partial cutting through joint probability modelling of tree vigor and quality.* Can. J. For. Res. 43(3): 288–298.

Régnière, J. et R. Saint-Amant, 2008. *BioSIM 9 — Manuel de l'utilisateur.* Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides. Québec, QC. Rapport d'information LAU-X-134R. 82 p. [http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=28769]

SAS Institute Inc. 2008. *SAS/STAT® 9.2 User's guide.* SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis). [https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/63033/HTML/default/viewer.htm#titlepage.htm]

Saucier, J.-P., A. Robitaille et P. Grondin, 2009. *Cadre bioclimatique du Québec.* Dans : *Chapitre 4 : Écologie forestière.* Dans : *Manuel de foresterie, 2e édition.* Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Éditions MultiMondes. Québec, QC. p. 186–205.

Saucier, J.-P., F. Guillemette, P. Gauthier, J. Gravel, F. Labbé, S. Meunier et N. Vachon, 2014. *Rapport du Comité sur l'impact des modalités opérationnelles des traitements en forêt feuillue (CIMOTFF).* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport technique. 98 p. et annexes. [https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/rapport-CIMOTFF.pdf]

Vézina, S., 2001. *Méthode exploratoire pour définir un diamètre économique optimal.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles. 35 p.

La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle développe de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

Forêts, Faune et Parcs
Québec

ISSN 0834-4833
ISBN : 978-2-550-77034-3
ISBN (pdf) : 978-2-550-77035-0
G.F.D.C.: 653--015 (714)
L.C.: SC 553
Dépôt légal 2016
Bibliothèque nationale du Québec
© 2016 Gouvernement du Québec