

Croissance et propriétés mécaniques du bois après éclaircie commerciale dans une plantation d'épinette blanche (*Picea glauca*) âgée de 32 ans

Laurent Gagné, Luc Lavoie et Jean-Marie Binot

Résumé : L'éclaircie commerciale est un traitement privilégié pour l'aménagement intensif, car ce traitement permet d'augmenter la croissance des tiges résiduelles. Toutefois, l'éclaircie commerciale aurait pour effet de diminuer les propriétés mécaniques du bois, bien que certains affirment que l'effet serait temporaire. L'objectif de cette étude est de vérifier, à l'échelle de la tige, (i) l'influence de différentes intensités d'éclaircie sur l'accroissement en volume en fonction des différentes classes sociales et (ii) l'effet de l'éclaircie commerciale sur les propriétés mécaniques du bois de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) et (iii) de déterminer si ces effets sur les propriétés mécaniques varient selon les classes sociales. Les mesures ont été effectuées à partir d'échantillons récoltés dans une plantation d'épinette blanche de 32 ans ayant été éclaircie en 1988 à l'âge de 20 ans. Nous avons utilisé l'analyse de tige pour mesurer les accroissements, alors que les propriétés mécaniques ont été mesurées sur des petites pièces de bois (10 mm × 10 mm × 150 mm) sans défauts prélevés au diamètre à hauteur de poitrine. L'éclaircie a un effet positif significatif sur l'accroissement en volume par tige chez les dominants et codominants et n'aurait pas pour conséquences de diminuer la masse volumique, le module d'élasticité ni le module de rupture, toutes intensités d'éclaircie et toutes classes sociales confondues. Au contraire, après éclaircie (1989–2000), le module d'élasticité augmente de 50 % chez les dominants et de 70 % chez les codominants. L'éclaircie commerciale est un outil sylvicole servant à accroître la productivité des plantations d'épinette blanche sans affecter négativement les propriétés mécaniques du bois. Considérant nos résultats, nous recommandons d'effectuer une première éclaircie avec une intensité de prélèvement autour de 35 % de la surface terrière initiale.

Abstract: Commercial thinning represents one of the treatments used in intensive management to increase the growth of the residual stems. Therefore, commercial thinning would decrease the wood mechanical properties, but the negative effects are temporary according to some authors. To our knowledge, no studies have focused on the effects of commercial thinning on wood mechanical properties according to tree social classes. The objective of this study is to verify, at the stem level, (i) the effect of different commercial thinning intensities on the stem volume increment according to social classes (dominant, codominant, intermediate, and oppressed) and (ii) the effect of commercial thinning on wood mechanical properties of white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss), and (iii) to determine if these effects on wood mechanical properties varied between social classes. The measurements were made from samples collected in a 32-year-old white spruce plantation that was thinned in 1989. We used stem analysis to measure volume increments, while the mechanical properties were measured on small pieces of wood (10 mm × 10 mm × 150 mm) without defects at dbh. Thinning has a significant positive effect on the stem volume increment for the dominant and codominant trees and no negative effect on the wood density, the modulus of elasticity and modulus of rupture for all thinning intensities and all social classes combined. After thinning (1989–2000), the modulus of elasticity increased by 50% in the dominant and by 70% in the codominant trees. This study allows us to consider the commercial thinning as a silvicultural tool to increase the productivity of white spruce plantations without affecting negatively the wood mechanical properties. Considering our results, we recommend that the intensity of the first commercial thinning should remove 35% of the basal area.

[Journal translation]

Introduction

Devant la demande croissante de bois, de vastes territoires ont été reboisés à l'échelle planétaire. Malgré cela, la produc-

tivité des plantations, dans leur état actuel, ne peut suffire à la demande mondiale de bois d'œuvre (Park et Wilson 2007). Actuellement, la solution la plus probable pour suffire à cette forte demande demeure l'aménagement intensif des

Reçu le 11 août 2011. Acceptée le 15 novembre 2011. Publié au www.nrcresearchpress.com/cjfr, le 18 janvier 2012.

L. Gagné. Université de Moncton, Faculté de foresterie, Campus d'Edmundston (UMCE), 165, boul. Hébert, Edmundston, NB E3V 2S8, Canada; Université du Québec à Rimouski, Chaire de recherche sur la forêt habitée, département de biologie et géographie, 300, allée des Ursulines, Rimouski, QC G5L 3A1, Canada.

L. Lavoie* et J.-M. Binot. Université de Moncton, Faculté de foresterie, Campus d'Edmundston (UMCE), 165, boul. Hébert, Edmundston, NB E3V 2S8, Canada.

Corresponding author: Laurent Gagné (courriel : natlau@globetrotter.net).

*Présente adresse : Conférence régionale des élues du Bas-St-Laurent, 186, rue Lavoie, Rimouski, QC G5L 5Z1, Canada.

plantations (Park et Wilson 2007). À cet égard, l'éclaircie commerciale représente un des traitements sylvicoles les plus prometteurs, particulièrement en période de rupture de stock (Cameron 2002; Park et Wilson 2007). L'éclaircie commerciale est depuis longtemps considérée comme un outil sylvicole important pour modifier la croissance des arbres en forêt naturelle, ainsi qu'en plantation (Cameron 2002) et pour stabiliser le potentiel de récolte dans les peuplements mûrs (Jamnick et al. 1994). La coupe des arbres malades ou malformés permet de redistribuer le potentiel du site sur les tiges résiduelles plus vigoureuses, et cela se traduit habituellement par une augmentation de l'accroissement du volume à l'échelle de la tige, particulièrement sur les sites les plus productifs (Josza et Middleton 1994; Zeide 2001; Pelletier et Pitt 2008). L'éclaircie aurait peu d'effet sur la croissance en volume pour les tiges dominantes puisque, selon Lussier (1997), cette classe sociale accapare déjà la plus grande part des ressources disponibles, avant même que l'éclaircie ne soit pratiquée. Selon Trucios Remolino (1999), les arbres répondent à l'éclaircie en fonction de leur position sociale dans le peuplement, et les permutations de classes sociales sont inexistantes ou très rares, peu importe l'intensité de l'éclaircie. Malgré leur faible réponse aux éclaircies, les dominants maintiennent le meilleur taux d'accroissement en volume suivi des codominants et des autres classes sociales. Cela nous amène donc à poser l'hypothèse que la classe sociale des dominants et des codominants seront celles qui obtiendront les meilleurs gains en croissance après l'éclaircie, au détriment des classes sociales inférieures.

En général, il y a plusieurs avantages à réaliser des éclaircies commerciales : par exemple, l'augmentation de l'accroissement des arbres du peuplement résiduel (Sheedy et Bertrand 1997; Zeide 2001), l'amélioration de l'état de santé du peuplement (Ministère des ressources naturelles du Québec 2003), l'établissement de la régénération (von Althen et Stiell 1990) ou encore des revenus périodiques (Jamnick et al. 1994). Cette intervention peut aussi avoir des effets négatifs notamment sur l'augmentation de la nodosité, la surface de bois d'aubier ou encore sur les propriétés mécaniques du bois (Bowyer et al. 2007; Zubizarreta Gerendiain et al. 2007). En effet, chez plusieurs espèces de conifères, une augmentation de l'accroissement en volume par tige suite à une éclaircie est souvent associée à une diminution des propriétés mécaniques du bois, telles que la masse volumique, l'élasticité et la résistance à la rupture, et ce, en forêt naturelle comme en plantation (Zhang 1995; Josza et Middleton 1994; Bowyer et al. 2007). Kellison et Pearson (1985) et plus récemment Moore et al. (2009) ont démontré qu'une faible baisse de la masse volumique du bois peut avoir un effet négatif sur l'élasticité et la résistance du bois chez diverses espèces de conifères, ce qui va à l'encontre des besoins de l'industrie du sciage. Cette baisse de la masse volumique s'explique par le fait que l'éclaircie augmente la quantité de lumière disponible, ce qui favorise la production et (ou) le maintien de plus de branches vivantes. Une augmentation du nombre de branches vivantes résulte ensuite en une nodosité plus importante et une augmentation de la proportion de bois juvénile dans la tige (Zhang et Koubaa 2009). En outre, si la cime est ample et qu'elle occupe une portion importante sur la tige, cela contribue généralement à augmenter la proportion de bois d'aubier (Yang et Hazenberg 1992) et la propor-

tion de bois initial, produisant ainsi un bois de faible masse volumique (Koubaa et al. 2000). Il est généralement reconnu qu'une faible masse volumique du bois induite par une éclaircie mène à une plus faible élasticité et une plus faible résistance du bois à la rupture (Kellison et Pearson 1985). Toutefois, certaines études affirment que les effets négatifs sont temporaires et s'atténuent quelques années après l'éclaircie de la plantation (Tasissa et Burkhart 1998; Jaakkola et al. 2006). À notre connaissance, aucune étude n'existe quant à l'effet de l'éclaircie commerciale sur les propriétés mécaniques en fonction des classes sociales pour l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss). Le choix d'utiliser les classes sociales comme méthode d'échantillonnage est déterminant, puisque cette méthode permettra au sylviculteur de mieux cibler les arbres élites lors de l'éclaircie et lors de l'élagage dans l'éventualité que l'objectif est de produire du bois sans nœud. Notre hypothèse est que la croissance accrue induite par l'éclaircie commerciale de différentes intensités n'aurait pas d'effet négatif significatif sur les propriétés mécaniques à l'étude et ce, peu importe la classe sociale.

En raison de ses effets bénéfiques sur la croissance, l'éclaircie commerciale est un traitement qui est appelé à une utilisation plus fréquente au cours des prochaines années au Canada. En Europe, l'éclaircie commerciale est utilisée depuis plusieurs années, et les effets sont relativement bien connus. Pour nos régions, il est important de connaître les effets réels de ce traitement sur la croissance et les propriétés mécaniques du bois en fonction des classes sociales, et particulièrement dans un contexte d'aménagement intensif.

L'objectif de cette étude est de vérifier, à l'échelle de la tige, (i) l'influence de différentes intensités d'éclaircie sur l'accroissement en volume en fonction des différentes classes sociales et (ii) l'effet de l'éclaircie commerciale sur les propriétés mécaniques du bois de l'épinette blanche et (iii) de déterminer si ces effets sur les propriétés mécaniques varient selon les classes sociales.

Matériel et méthodes

Localisation et description générale du site expérimental

La présente étude a été réalisée sur un site expérimental localisé dans une plantation d'épinette blanche établie en 1968 sur le territoire privé de la compagnie J.D. Irving ltée à Black Brook, à environ 80 km au nord-est d'Edmundston, Nouveau-Brunswick, Canada (47°17'N et 67°35'O: altitude, 305 m). La plantation est issue d'une coupe totale d'érablière. L'ensemble du site expérimental a fait l'objet d'une préparation de terrain à l'aide de l'écraseur Létourneau et d'un contrôle de la végétation compétitrice au moyen d'un phytocide lorsque la plantation était à l'état de semis. L'indice de qualité de station, pour l'épinette blanche, est de 21 m à 50 ans (IQS, I).

En 2000, la plantation d'épinette blanche contenait une proportion inférieure à 10 % en abondance d'essences d'origine naturelle, telles que le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) P. Mill.) et le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx). Différentes intensités d'éclaircie ont été appliquées au cours de l'automne 1988, soit : 0 % (témoin), 20 % (légère) et 35 % (forte) de la surface terrière totale. Le procédé d'exploitation utilisé a été celui de l'abattage manuel. L'uniformité des éclaircies et le choix des tiges résiduelles étaient

adéquats selon les critères de l'industriel forestier. Toutefois, suite aux inventaires, l'intensité de prélèvement était plus faible que prévue dans l'éclaircie légère pour atteindre 16 % de la surface terrière et plus élevée dans l'éclaircie forte pour atteindre 41 %. Au terme de l'étude en 2000, la moyenne des accroissements en volume total pour la période de 1989 à 2000, était de 12,91 m³·ha⁻¹·an⁻¹ pour le témoin, de 14 m³·ha⁻¹·an⁻¹ pour l'éclaircie légère et de 11,81 m³·ha⁻¹·an⁻¹ pour l'éclaircie forte (Gagné 2003). Le tableau 1 décrit les peuplements avant et après éclaircie.

Le dispositif expérimental correspond à un plan en blocs aléatoires et comporte quatre blocs de 90 m × 120 m, orientés dans le sens est-ouest, couvrant chacun une superficie de 1,08 ha. Chaque bloc est divisé en 12 parcelles carrées de 30 m × 30 m disposées en trois rangées. Pour un même bloc, toutes les parcelles sont contiguës, alors que les blocs sont distants de 15 m, l'un de l'autre, sauf le bloc n° 4. Ce dernier est situé à environ 300 m des trois premiers blocs, dans la même plantation (fig. 1).

Choix des arbres pour l'analyse de tiges et étude des propriétés mécaniques

Pour l'étude des propriétés mécaniques de l'épinette blanche, 96 arbres ont été récoltés dans le dispositif expérimental. Deux parcelles de 30 m × 30 m ont été sélectionnées aléatoirement pour chaque classe d'intensité d'éclaircie (3), pour un total de six parcelles par bloc. Un arbre a été sélectionné aléatoirement dans chacune des quatre classes sociales (dominant, codominant, intermédiaire, opprimé) pour un total de 4 arbres par parcelle. Une rondelle de bois a été coupée à 0,15 m, 1,30 m, 2,0 m et ensuite à 30 %, 50 %, 70 % et 90 % de la hauteur totale de la tige pour le calcul des accroissements en volume par tige (Gagné 2003). Chaque rondelle a été séchée à l'air et ensuite poncée pour la lecture des largeurs de cernes annuels sur quatre rayons avec le logiciel WinDendro® (version 6,5 C, Régent instruments inc.). Les accroissements en volume par tige ont été calculés avec la macrofonction XLSTEM® 1,0 (Régent instruments inc.) à partir de la moyenne des largeurs de cernes sur les quatre rayons. Le gain en volume par tige a pu être déterminé pour l'ensemble des années écoulées avant et après éclaircie.

Procédures pour déterminer les propriétés mécaniques

Un billon de 15 cm de longueur a été pris au diamètre hauteur de poitrine sur chaque tige abattue. Le billon a servi à prélever les échantillons pour les tests de la masse volumique du bois, de flexion. Chaque billon a été conservé durant les manipulations dans un congélateur à une température comprise entre -3 et -5 °C avant et après façonnage. Nous avons extrait une planchette de bois, dans le sens longitudinal du billon, d'une dimension de 10 mm d'épaisseur × 15 cm de haut × une largeur équivalente au diamètre du billon, en passant par la moelle. Un total de 920 bâtonnets (échantillons) ont été extraits des planchettes. Pour la classe sociale des opprimés, le nombre d'échantillons était insuffisant pour la période de 1969 à 1978. L'âge cambial et l'année de formation de chaque cerne ont été déterminés pour ensuite calculer la médiane de l'âge cambial, de l'année de formation des cernes et le nombre moyen de cernes·cm⁻¹ pour chaque bâtonnet.

Masse volumique du bois, module d'élasticité (MOE) et module de rupture (MOR)

Le calcul de la masse volumique du bois (masse anhydre sur volume à l'état vert) s'est effectué en deux étapes. Premièrement, le volume à l'état vert (saturation des membranes) a été déterminé par deux mesures radiales et tangentielles (0,01 mm), prises à l'aide d'un compas électronique, ainsi que par une mesure longitudinale avec une précision de 0,001 mm. Dans un deuxième temps, le calcul de la masse volumique du bois a été effectué à partir de la masse anhydre de chaque échantillon.

Après un séjour de 4 semaines en chambre de conditionnement, à une teneur en humidité d'équilibre d'environ 12 %, le calcul du MOE et du MOR de chaque échantillon s'est fait selon la méthode de flexion statique (« static bending »). La procédure a été adaptée de la méthode standardisée (American Standard Testing Materials, D 143-94; ASTM 1998a) utilisée pour des échantillons sans défauts, mais ayant une dimension de 25 mm d'épaisseur × 25 mm de hauteur × 410 mm de longueur. Dans notre cas, la dimension des échantillons était de 10 mm d'épaisseur × 10 mm de hauteur × 150 mm de longueur. Tous les tests, pour déterminer les MOE et MOR, ont été effectués à l'aide du logiciel TESTWORKS® sur une station MTS (material testing software) 4201 renew upgrade package avec une cellule de charge de 1 kN (kilonewton). La tête d'appui servant de charge centrale, avait un rayon de 14,3 mm respectant un ratio de 1,5 fois l'épaisseur de l'échantillon. La distance entre les supports était de 110 mm, et la vitesse de déplacement de la tête d'appui était de 2,6 mm·min⁻¹. La charge était appliquée sur la face tangentielle (intérieur de l'échantillon) de chaque bâtonnet.

Après séchage, la masse anhydre de chaque échantillon a été estimée à l'aide d'une balance électronique (précision, 0,01 g). Une formule de correction (ASTM 1998b, D 2915-94) a été utilisée afin d'ajuster les valeurs nominales obtenues à un taux d'humidité uniforme de 12 %. La formule perd considérablement de son efficacité si la teneur en humidité, après conditionnement, dépasse 17 % (ASTM 1998b, D 2915-94). Dans notre cas, la teneur en humidité, après conditionnement, oscillait entre 15 % et 16 %, ce qui rendait la formule applicable.

Analyses statistiques

L'ensemble des analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SAS version 9,2.1. Pour toutes les analyses, un seuil de signification de 0,05 a été utilisé.

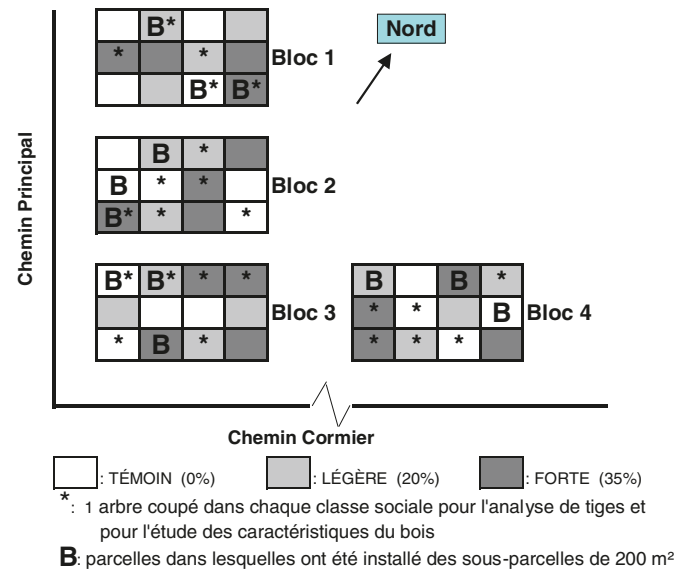
Pour l'analyse des accroissements en volume par tige en fonction du temps (1970-2000), nous avons effectué des ANOVA mixtes partiellement emboîtées à quatre facteurs (intensité d'éclaircie, classe sociale, bloc, parcelle). Les analyses statistiques ont été réalisées par intensité d'éclaircie pour les quatre périodes avant éclaircie de 1970 à 1974 (av1), de 1975 à 1979 (av2), de 1980 à 1984 (av3) et de 1985 à 1988 (av4); et les deux périodes après éclaircie de 1989 à 1994 (ap1) et de 1995 à 2000 (ap2). La normalité des résidus a été vérifiée à l'aide des tests de Shapiro-Wilk et de Kolmogorov-Smirnov. Lorsque l'ANOVA détectait des différences significatives, des tests a posteriori de Scheffé ont été effectués pour déterminer précisément où se situaient les différences.

Concernant les propriétés mécaniques, les analyses statis-

Tableau 1. Description détaillée des peuplements avant (1988) et après éclaircie (1989 et 2000) (d'après Gagné 2003).

Année	Types d'éclaircie	Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)	Espacement moyen (m)	Volume total résiduel (m ³ ·ha ⁻¹)	Nombre de tiges·ha ⁻¹	Hauteur moyenne (m)	
						Codominants	Dominants
1988 avant éclaircie	Aucune	28,20	1,92	112	2900	8,90	10
1989 après éclaircie	Éclaircie forte (35 %)	16,60	2,93	73	1375	8,90	10
1989 après éclaircie	Éclaircie légère (20 %)	23,60	2,45	103	1925	8,90	10,43
2000	Éclaircie forte (35 %)	34 ^a	2,92	203	1375	12,83	14,84
2000	Éclaircie légère (20 %)	37 ^a	2,45	257	1888	12,82	15,48
2000	Témoïn (0 %)	43 ^a	2,11	254	2587	12,56	14,37

^aLa surface terrière marchande (diamètre à hauteur de poitrine > 10 cm) en 2000 était très proche de la surface terrière totale, puisque la quasi-totalité des tiges avaient 10 cm et plus à hauteur de poitrine.

Fig. 1. Schéma du dispositif expérimental localisé dans une plantation d'épinette blanche établie en 1968 et éclaircie en 1989, à Black Brook, dans le nord-ouest du Nouveau Brunswick.

tiques ont été réalisées pour chacune des trois périodes comprises entre 1968 et 2000 : avant éclaircie de 1968 à 1978 (av1), de 1979 à 1988 (av2) et après éclaircie de 1989 à 2000 (ap1). Cette approche détermine le patron de variation des propriétés mécaniques du bois (masse volumique, MOE, MOR), de la moelle vers l'écorce et pour pouvoir vérifier l'effet de l'éclaircie commerciale sur ces mêmes propriétés. Ainsi, des ANOVA mixtes partiellement emboîtées à quatre facteurs (intensité d'éclaircie, classe sociale, bloc, parcelle) ont été utilisées pour déterminer s'il existait des différences significatives entre les éclaircies et les classes sociales pour chacune des trois périodes. Des tests a posteriori de Scheffé ont été effectués pour déterminer précisément où se situaient les différences. Les tests de Shapiro-Wilk et de Kolmogorov-Smirnov ont été utilisés pour vérifier la normalité des résidus.

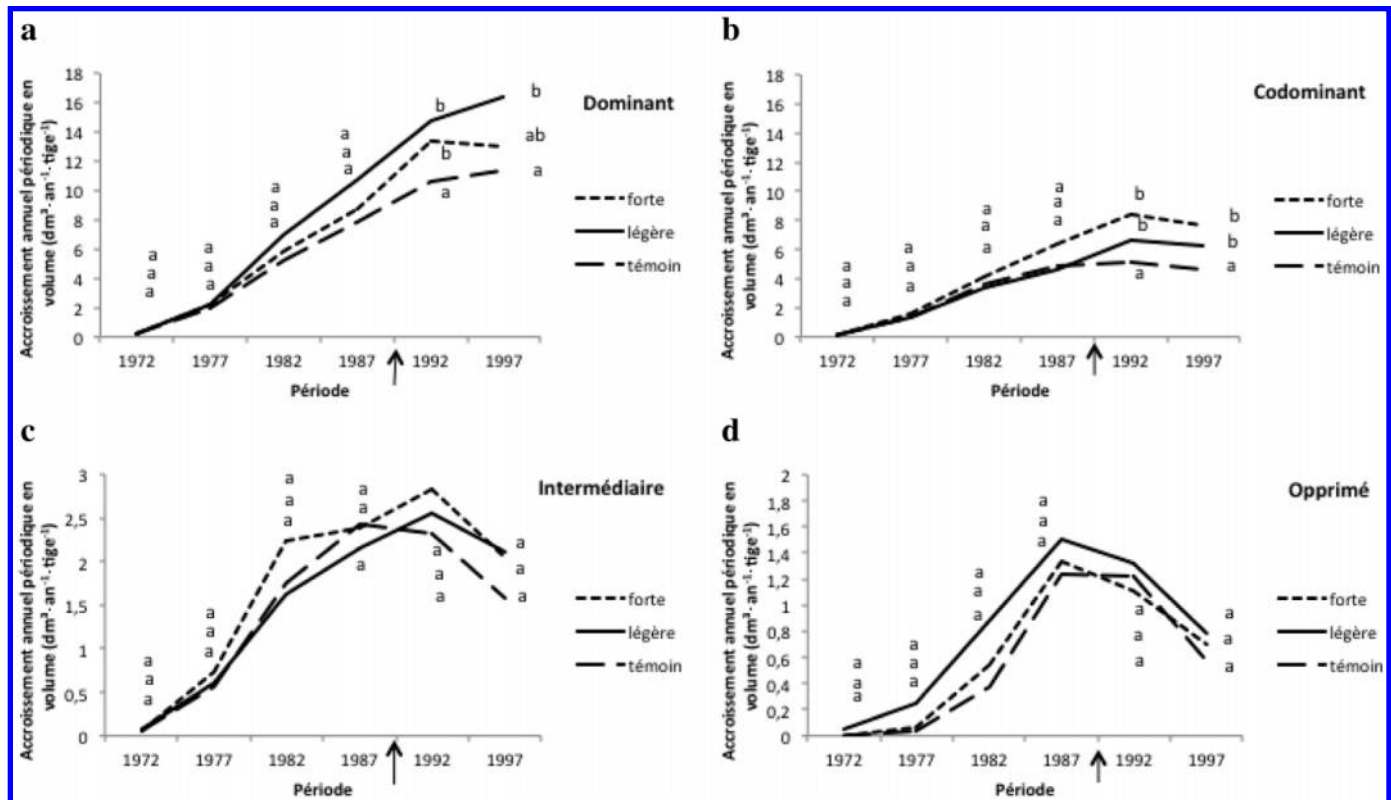
Finalement, des régressions multiples de type pas-à-pas (« stepwise ») ont été construites pour déterminer l'effet, sur le MOR, des différentes variables. Le MOR a été choisi comme variable dépendante, étant donné qu'il représente une des variables les plus importantes à considérer pour l'industrie du bois d'œuvre (Kollman et Côté 1968). La variable MOE a été omise parce qu'elle est fortement corrélée au MOR (Kollman et Côté 1968). Finalement, des tests de normalité de Kolmogorov-Smirnov ont été effectués sur les résidus de chaque régression multiple pour s'assurer de respecter les conditions d'application de ce type d'analyse.

Résultats

Accroissement annuel périodique en volume par tige, par classe sociale et par intensité d'éclaircie

Avant l'application des éclaircies, l'accroissement annuel périodique en volume par tige ne présente pas de différence entre les types de peuplements (fig. 2). L'effet de l'éclaircie est perceptible et significatif dès son application, et l'ac-

Fig. 2. Accroissement annuel périodique en volume par tige et par intensité d'éclaircie (témoin, éclaircie légère, éclaircie forte) pour les classes sociales des dominants (a), des codominants (b), des intermédiaires (c) et des opprimés (d) en fonction des périodes avant éclaircie, av1(1972), av2 (1977), av3 (1982), av4 (1987) et après éclaircie, ap1 (1992) et ap2 (1997). Des lettres différentes indiquent des différences significatives d'accroissement annuel périodique en volume entre les éclaircies, pour une même classe sociale ($p < 0,05$). La flèche indique le moment de l'éclaircie.



croissement annuel périodique en volume par tige est toujours plus élevé chez les dominants et codominants par rapport aux autres classes sociales (tableau 2; fig. 2). Chez les dominants, il y a une différence significative d'accroissement entre l'éclaircie légère et les témoins pour les périodes ap1 (1989–1994) et ap2 (1995–2000). Cet accroissement s'accroît même avec le temps entre la période ap1 et ap2 et passe de 15 dm^3 à 16 dm^3 (tableau 2; fig. 2a). Pour la période ap1, les éclaircies forte et légère ont procuré un accroissement significativement plus élevé, chez les dominants par rapport au témoin. Cette différence d'accroissement devient non significative à la période ap2 entre l'éclaircie forte et le témoin. Chez les dominants, l'accroissement en volume montre une légère baisse passant de $13,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ à un peu moins de $13 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ durant les deux périodes post-éclaircie et de 10 et $11 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ pour les dominants des peuplements témoins. Les codominants de l'éclaircie forte et de l'éclaircie légère procurent les meilleurs accroissements avec $4,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ pour le peuplement témoin, de $6,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ pour l'éclaircie légère et près de $8 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ pour l'éclaircie forte durant la période ap2. Dans les deux intensités d'éclaircie, l'effet du traitement semble s'atténuer au cours de la période ap2, bien que l'accroissement y demeure significativement supérieur par rapport au témoin. Pour les périodes ap1 et ap2 (post-éclaircie), les tiges intermédiaires et les opprimées ont toujours un accroissement annuel inférieur ou égal à $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ (fig. 2c et 2d).

Évolution temporelle de la masse volumique, du MOE et du MOR avant et après éclaircie

Avant l'éclaircie, les résultats montrent des différences significatives de masse volumique entre certaines classes sociales, notamment les opprimés et les dominants (tableau 2). Après l'application du traitement, il apparaît que l'éclaircie commerciale n'a pas eu pour effet de diminuer significativement les différentes propriétés à l'étude (masse volumique, MOE et MOR) (fig. 3, 4 et 5) sauf pour les codominants entre le témoin et l'éclaircie forte pour le MOE et le MOR (fig. 4 et 5). À l'échelle de la classe sociale, l'analyse détecte des différences significatives notamment entre les dominants et les autres classes sociales pour la masse volumique, le MOE et le MOR (tableau 2).

Pour la période av1 (1969–1978), la masse volumique est équivalente d'une classe sociale à l'autre et d'une éclaircie à l'autre, sauf chez les opprimés qui présentent des valeurs supérieures aux dominants et codominants (tableau 2; fig. 3a, 3b et 3d). Pour la période av2 (1979–1988), les opprimés présentent une masse volumique significativement supérieure à celles observées pour les autres classes sociales, à l'exception des intermédiaires (tableau 2; fig. 3c et 3d). Nos résultats démontrent qu'avant l'éclaircie la masse volumique diminue, et ce, pour tous les types de peuplement et toutes les classes sociales confondues (fig. 3). Toutefois, l'éclaircie commerciale pour la période ap1 (1989–2000) n'aurait pas eu pour conséquence de diminuer la masse volumique du

Tableau 2. Résultats des ANOVA à quatre facteurs pour l'accroissement en volume par tige pour la masse volumique, le module d'élasticité (MOE) et le module de rupture (MOR) avant et après traitement (niveau de signification $p < 0,05$).

Variable (période) ^a	Effet ^b	ddl de num	ddl de dens	F	p	Test a posteriori de Scheffé ^c
Accroissement en volume (av1)	CS	3	21	16,05	<0,0001	1 ≠ 3, 2 ≠ 3 ^d
	E*CS	6	21	3,26	0,0199	0-1 ≠ 0-3, 0-1 ≠ 35-3, 0-2 ≠ 0-3, 0-3 ≠ 20-1, 0-3 ≠ 20-2, 0-3 ≠ 35-1, 0-3 ≠ 35-2, 20-3 ≠ 35-1, 35-1 ≠ 35-3
Accroissement en volume (av2)	B	3	15	3,30	0,0494	2 ≠ 4 ^e
	B*E	6	32	2,55	0,0393	1-1 ≠ 0-20, 1-2 ≠ 0-0, 1-2 ≠ 0-20, 1-3 ≠ 0-0, 1-3 ≠ 20-20, 1-3 ≠ 20-35, 1-4 ≠ 20-0, 1-4 ≠ 20-20, 1-4 ≠ 35-0, 2-4 ≠ 0-0, 2-4 ≠ 20-0, 2-4 ≠ 35-0, 3-4 ≠ 0-0, 4-4 ≠ 0-35
Accroissement en volume (av3)	CS	3	32	112,32	<0,0001	1 ≠ 3, 1 ≠ 4, 2 ≠ 3, 2 ≠ 4, 3 ≠ 4
Accroissement en volume (av4)	CS	3	33	25,10	<0,0001	1 ≠ 3, 1 ≠ 4, 2 ≠ 3, 2 ≠ 4, 3 ≠ 4
Accroissement en volume (ap1)	CS	3	33	7,33	0,0007	1 ≠ 3, 1 ≠ 4, 2 ≠ 3, 2 ≠ 4
Accroissement en volume (ap1)	E	2	33	5,75	0,0072	0 ≠ 20, 0 ≠ 35 ^f
	CS	3	33	503,34	<0,0001	1 ≠ 2, 1 ≠ 3, 1 ≠ 4, 2 ≠ 3, 2 ≠ 4, 3 ≠ 4
	E*CS	6	33	2,69	0,0306	Tous différents sauf : 0-3 = 20-3, 0-3 = 35-3, 0-4 = 20-4, 0-4 = 35-4, 20-1 = 35-1, 20-2 = 35-2, 20-3 = 35-3, 20-4 = 35-4
Accroissement en volume (ap2)	E	2	33	6,86	0,0032	0 ≠ 20, 0 ≠ 35
	CS	3	33	500,73	<0,0001	1 ≠ 2, 1 ≠ 3, 1 ≠ 4, 2 ≠ 3, 2 ≠ 4, 3 ≠ 4
Masse volumique (av1)	CS	3	13	5,54	0,0113	1 ≠ 3
Masse volumique (av2)	CS	3	33	13,47	<0,0001	1 ≠ 3, 1 ≠ 4, 2 ≠ 4, 3 ≠ 4
Masse volumique (ap1)	CS	3	32	5,52	0,0036	1 ≠ 3, 1 ≠ 4, 2 ≠ 4
MOE (av2)	E	2	33	3,38	0,0460	0 ≠ 35
MOE (ap1)	CS	3	32	4,85	0,0068	1 ≠ 2, 1 ≠ 3, 1 ≠ 4
MOR (ap1)	CS	3	32	4,51	0,0095	1 ≠ 2, 1 ≠ 3, 1 ≠ 4

^aPour la variable « Accroissement en volume » avant éclaircie : av1, 1970–1974; av2, 1975–1979; av3, 1980–1984; av4, 1985–1988; et après éclaircie : ap1, 1989–1994; ap2, 1995–2000. Pour les variables « Masse volumique, MOE et MOR » avant éclaircie : av1, 1969–1978; av2, 1979–1988; et après éclaircie : ap1, 1989–2000.

^bCS, classes sociales; E*CS, interaction éclaircie*classe sociale; B, bloc; B*E, interaction bloc*éclaircie; E, éclaircie.

^cSeulement où il y a des différences significatives, sauf pour l'interaction E*CS pour la période « ap1 » pour la variable « Accroissement en volume ». Dans ce dernier cas, seules les interactions n'ayant pas de différences significatives sont indiquées.

^d1, dominant; 2, codominant; 3, intermédiaire; 4, opprimé.

^e1, bloc 1; 2, bloc 2; 3, bloc 3; 4, bloc 4.

^f0, témoin; 20, éclaircie légère; 35, éclaircie forte.

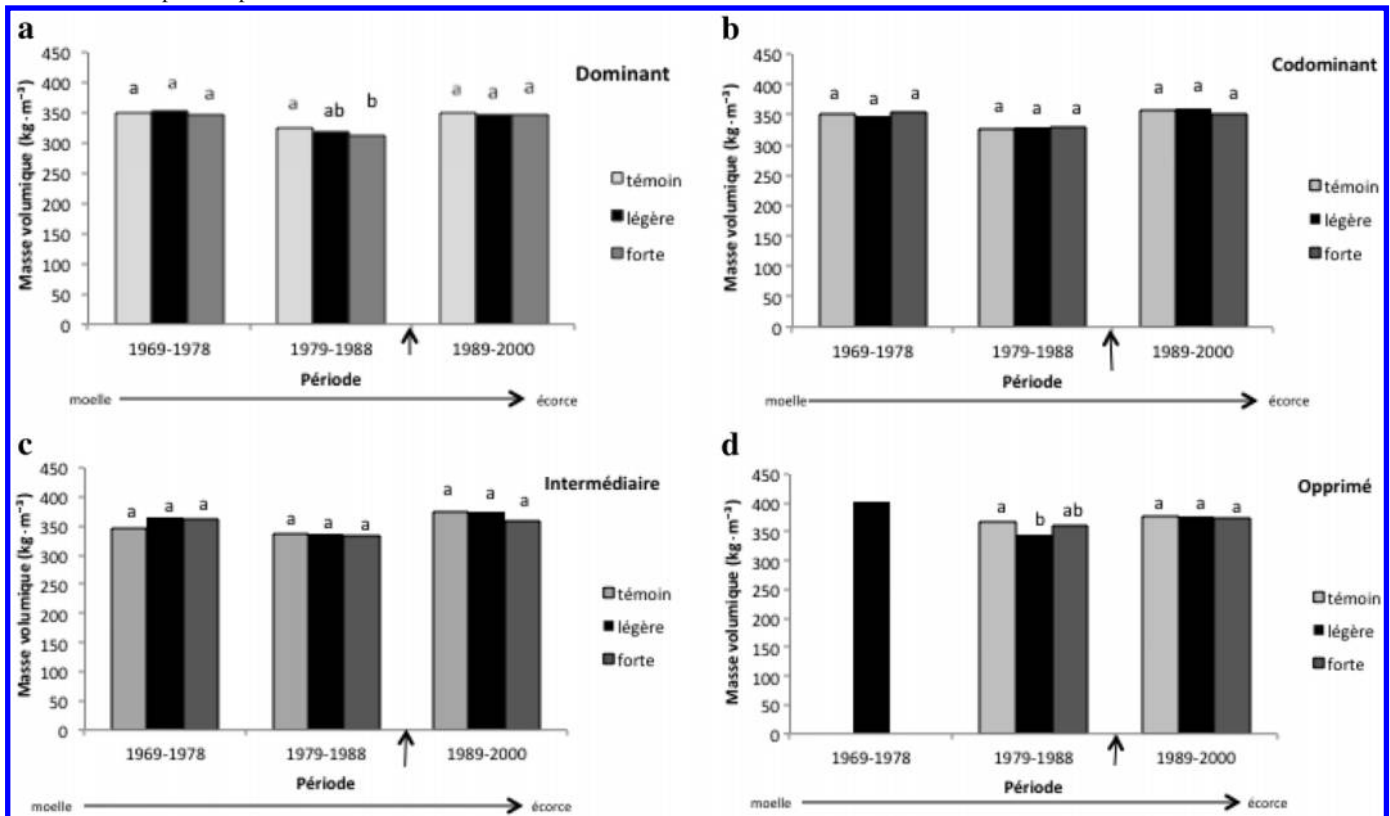
bois, puisque celle-ci a augmenté au cours de cette même période pour revenir au niveau de la masse volumique observée près de la moelle (période av1). Chez les dominants, cette masse volumique passe d'une moyenne de 319 kg·m⁻³ pour la période av2 à 348 kg·m⁻³ pour la période ap1. Après éclaircie, la masse volumique du bois diffère significativement, uniquement entre les deux classes sociales inférieures et les dominants, pour toutes les intensités d'éclaircie à l'étude, alors que les opprimés et les intermédiaires montrent une masse volumique plus élevée (tableau 2). Finalement, pour une intensité d'éclaircie donnée, la masse volumique tend à diminuer des opprimés vers les dominants. Dans tous les cas, il y a une différence significative entre les opprimés et les dominants (tableau 2).

Le MOE tend à augmenter rapidement avec l'âge. Le MOE passe de 4500 MPa à 5500 MPa de la période av1 à av2 pour l'ensemble des classes sociales et des intensités d'éclaircies (fig. 4). La valeur moyenne suit la même progression après éclaircie (période ap1). Globalement, l'éclaircie

commerciale n'a pas pour effet de diminuer significativement le MOE, bien qu'une légère tendance à la baisse soit observée pour les éclaircies légère et forte, comparativement au témoin, pour la période ap1. Cette diminution du MOE était déjà perceptible pour les périodes av1 et av2 (fig. 4), ce qui indique que la baisse n'est pas liée à l'éclaircie elle-même mais vraisemblablement à d'autres facteurs. Pour la période ap1, on retrouve des différences significatives entre les classes sociales pour le peuplement témoin et l'éclaircie légère (tableau 2). En revanche, aucune différence significative n'est décelée entre les classes sociales pour l'éclaircie forte, à la même période (tableau 2).

Le MOR suit la même tendance que celle observée pour le MOE. En effet, pour l'ensemble des classes sociales, le MOR présenté par les périodes av1, av2 et ap1 augmente de la moelle vers l'écorce (fig. 5). En outre, le MOR ne diffère significativement qu'entre les dominants et les classes sociales inférieures et plus particulièrement les opprimés. Selon nos résultats, il ressort globalement que l'éclaircie commer-

Fig. 3. Valeur de la masse volumique au niveau du diamètre à hauteur de la poitrine pour les périodes avant éclaircie, av1 (1968–1978) et av2 (1979–1988), et après éclaircie, ap1 (1989–2000), pour les classes sociales des dominants (a), des codominants (b), des intermédiaires (c) et des opprimés (d), selon les différentes intensités d'éclaircie. La flèche horizontale indique le gradient de progression de la masse volumique de la moelle vers l'écorce. Des lettres différentes indiquent des différences significatives de masse volumique entre les intensités d'éclaircie pour chaque classe sociale ($p < 0,05$). La flèche verticale indique le moment de l'éclaircie. Les données sont insuffisantes pour le témoin et l'éclaircie forte pour la période de 1969 à 1978.



cial n'a pas pour effet de diminuer significativement le MOR, et ce, quelles que soient les classes sociales (tableau 2).

Relation entre le MOR, la masse volumique, l'âge cambial et le taux de croissance

Les résultats des « régressions multiples » indiquent que la masse volumique est la variable qui explique le plus la variation du MOR tant avant l'éclaircie qu'après l'éclaircie, et ce, pour toutes les classes sociales et pour toutes les intensités d'éclaircie (tableau 3). Avant éclaircie, la variation de la masse volumique explique, dans des proportions variant de 50,7 % à 62,4 %, la variation de MOR (tableau 3), tandis qu'après l'éclaircie, les proportions varient de 50,5 % à 96,2 % (tableau 3). Dans un seul cas (tiges intermédiaires dans le témoin, période ap1), le taux de croissance a été la variable qui explique le plus la variation du MOR (tableau 3).

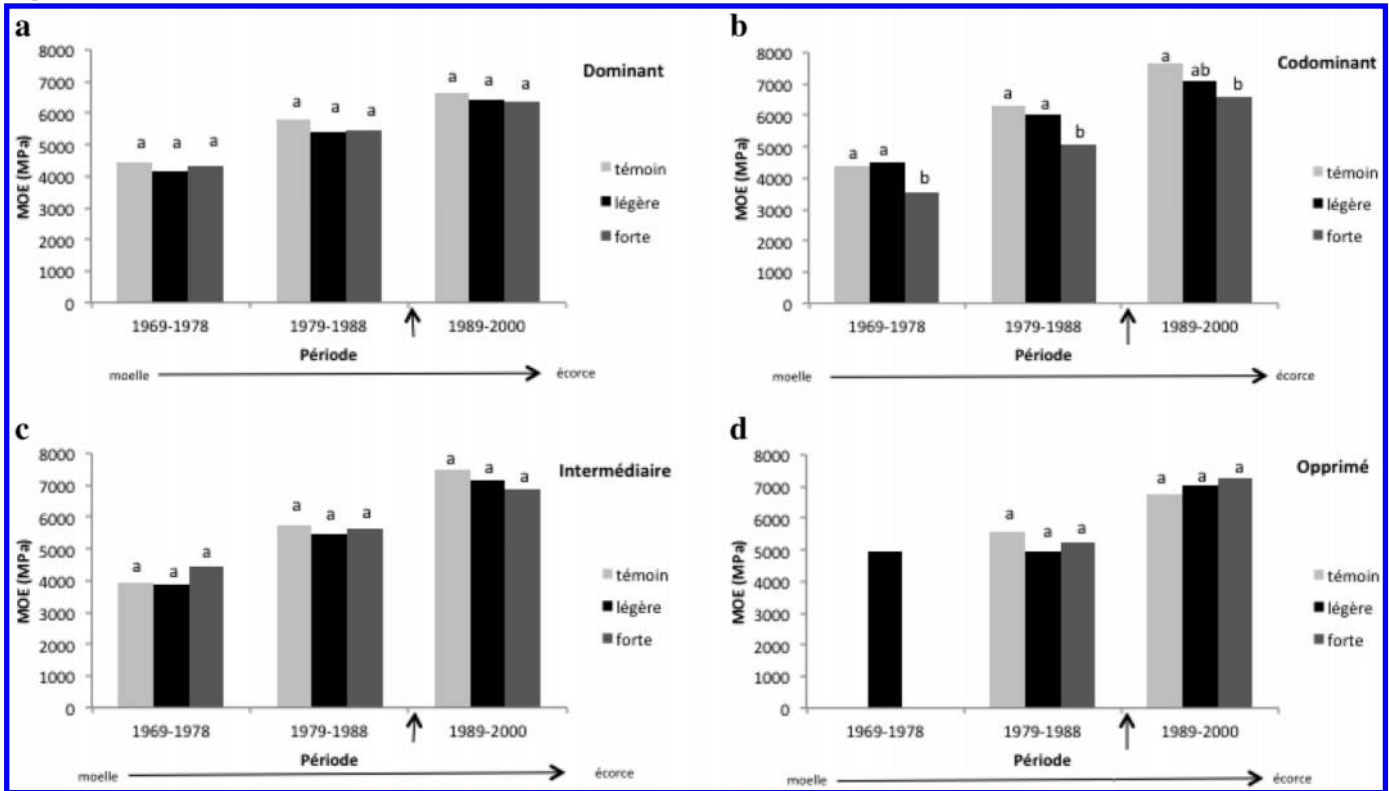
Discussion

L'effet d'une croissance accrue sur les propriétés mécaniques du bois est encore largement débattu aujourd'hui (Mansfield et al. 2007). Pour l'épinette blanche, il y a un manque de connaissance quant à l'effet réel de l'éclaircie commerciale sur les accroissements en volume et les répercussions sur les propriétés mécaniques. L'épinette blanche est une espèce candidate de haut niveau parmi les essences

susceptibles d'être choisies pour les zones d'intensification de production ligneuse. À cet égard, l'acquisition de connaissances sur les effets de l'éclaircie commerciale est plus que pertinente.

Notre étude montre que l'éclaircie commerciale d'intensité légère et forte a pour effet d'augmenter significativement les accroissements en volume par tige chez les dominants et les codominants. L'effet de l'éclaircie se prolonge au-delà de 5 ans pour les dominants, sauf dans l'éclaircie légère, et semble s'atténuer après une période de 5 ans environ pour les codominants. Lorsqu'une éclaircie est appliquée, le changement de compétition entre les tiges contribue à moduler la distribution de la biomasse sur un plus petit nombre de tiges (Weiner et Thomas 1986; Pelletier et Pitt 2008). Dans les éclaircies forte et légère, la répartition de la biomasse est un peu plus équitable d'une classe sociale à l'autre (Assmann 1970; Trucios Remolino 1999), mais demeure toutefois beaucoup plus importante chez les dominants et codominants. Lorsque le couvert forestier se referme, cela provoque un ralentissement de croissance qu'on peut observer particulièrement pour la période ap2 dans l'éclaircie légère. La fermeture du couvert conduit à la diminution graduelle des ressources disponibles (lumière, eau, minéraux...), si bien que ce stress est particulièrement important chez les individus de grande taille, quoique ceux-ci conservent leur plus grande capacité d'exploitation des ressources peu importe le type d'éclaircie

Fig. 4. Valeur du module d'élasticité (MOE) au niveau du diamètre à hauteur de la poitrine pour les périodes avant éclaircie, av1 (1968–1978) et av2 (1979–1988), et après éclaircie, ap1 (1989–2000), pour les classes sociales des dominants (a), des codominants (b), des intermédiaires (c) et des opprimés (d), selon les différentes intensités d'éclaircie. La flèche horizontale indique le gradient de progression du MOE de la moelle vers l'écorce. Des lettres différentes indiquent des différences significatives de MOE entre les intensités d'éclaircie pour chaque classe sociale ($p < 0,05$). La flèche verticale indique le moment de l'éclaircie. Les données sont insuffisantes pour le témoin et l'éclaircie forte pour la période de 1969 à 1978.



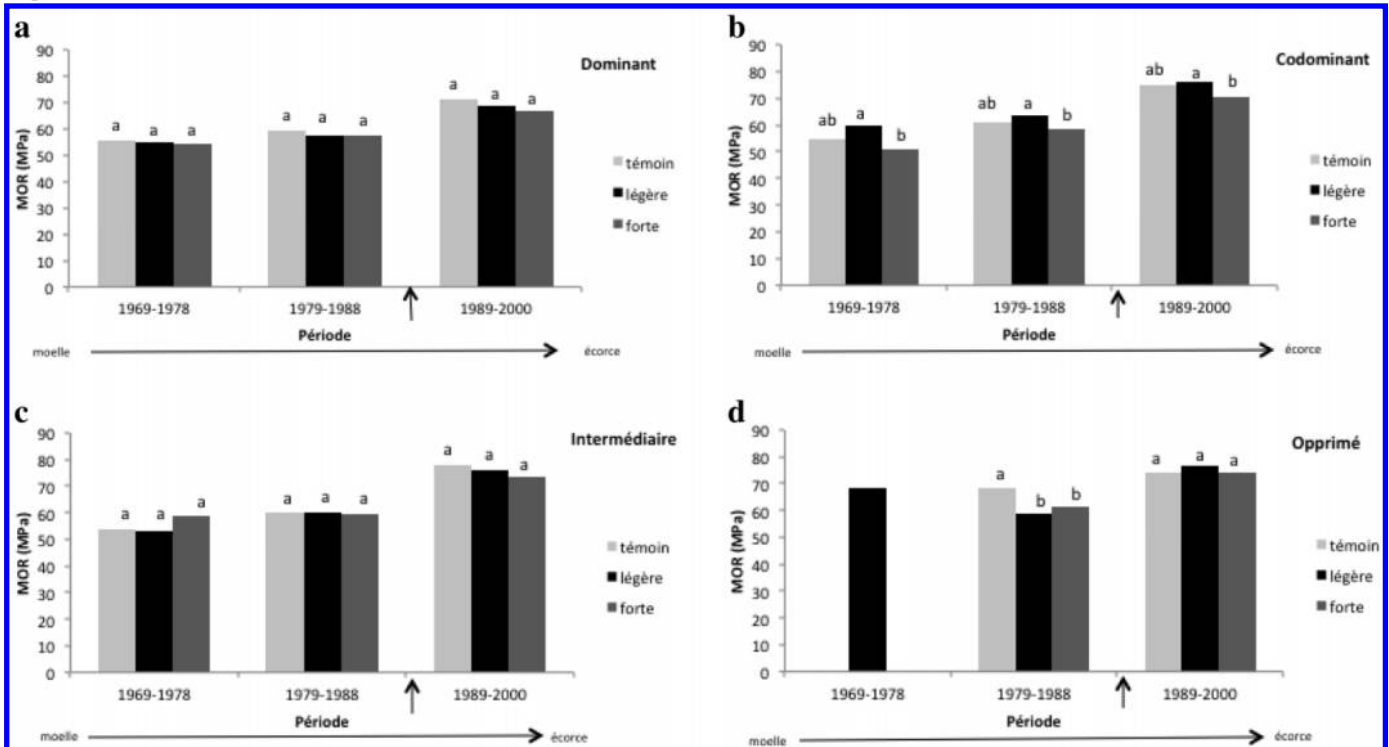
(Zeide 2001; Cameron 2002; Skovsgaard 2009). À plus ou moins longue échéance, ce sont les arbres les plus vigoureux ayant une cime plus ample et un métabolisme plus élevé qui auront tendance à tirer davantage profit des ressources nutritives dans le sol (Tasissa et Burkhart 1998; Misson 1999). Ceci veut dire que les dominants et les codominants représentent les meilleures tiges d'avenir à conserver au moment d'effectuer l'éclaircie commerciale, parce que ce sont elles qui conserveront les meilleurs accroissements et produiront le plus de volume. Puisque la classe des dominants et des codominants sont les tiges avec la meilleure croissance, il est essentiel de connaître si l'éclaircie commerciale joue un rôle dans la proportion de bois juvénile et de valider l'effet de l'éclaircie sur les propriétés mécaniques déterminant la qualité du bois par rapport aux autres classes sociales.

D'après nos résultats, la transition du bois juvénile vers le bois mature, au niveau du diamètre à hauteur de poitrine, s'est effectuée probablement au cours de la période av2 (âge cambial 15 à 24 ans), tant et si bien que les échantillons correspondant à la dernière période étaient entièrement constitués de bois mature. Pour l'épinette blanche, la transition entre le bois juvénile et mature débuterait vers l'âge de 15 ans (Corriveau et al. 1990; Zhou et Smith 1991) ou entre l'âge de 8 à 20 ans, selon les conditions de croissance (Yang et Benson 1997) ou selon la position de l'échantillon sur la tige (Zhou et Smith 1991; Schneider et al. 2008). D'après Josza et Middleton (1994), la production de bois mature se

ferait depuis la base de la cime vivante jusqu'à la souche et la proportion de bois juvénile dans la tige serait liée à la persistance du houppier et à la quantité d'hormone de croissance (auxines). La zone où la masse volumique est minimale serait indicatrice du début de la zone de transition menant au bois mature (Wang et Micko 1984; Corriveau et al. 1990). D'après nos résultats, l'éclaircie commerciale ne prolongerait pas la production de bois juvénile au niveau du diamètre à hauteur de poitrine. Pour l'épinette blanche, la masse volumique ne serait pas influencée négativement par une sylviculture intensive par rapport à des peuplements non traités, et ce peu importe l'intensité d'éclaircie et la classe sociale.

Pour toutes les classes sociales, nos résultats indiquent que la masse volumique est élevée près de la moelle, diminue à mesure qu'on s'en éloigne pour ensuite remonter lentement et atteindre près de l'écorce approximativement les mêmes valeurs que celles retrouvées près de la moelle. Chez le genre *Picea*, une masse volumique élevée dans le bois juvénile est typique (Corriveau et al. 1990; Jaakkola et al. 2006) et ne signifie pas nécessairement un bois de bonne qualité notamment pour l'épinette blanche. En revanche, une masse volumique élevée dans le bois mature est généralement indicatrice de bois de qualité. Entre la période av1 et av2, la masse volumique moyenne du bois, pour les classes sociales des dominants et codominants, diminue d'un peu plus de 9 %, alors qu'à la période ap1, la masse volumique revient à sa valeur d'origine, toutes éclaircies confondues (y compris

Fig. 5. Valeur du module de rupture (MOR) au niveau du diamètre à hauteur de la poitrine pour les périodes avant éclaircie, av1 (1968–1978) et av2 (1979–1988), et après éclaircie, ap1 (1989–2000), pour les classes sociales des dominants (a), des codominants (b), des intermédiaires (c) et des opprimés (d), selon les différentes intensités d'éclaircie. La flèche horizontale indique le gradient de progression du MOR de la moelle vers l'écorce. Des lettres différentes indiquent des différences significatives de MOR entre les intensités d'éclaircie pour chaque classe sociale ($p < 0,05$). La flèche verticale indique le moment de l'éclaircie. Les données sont insuffisantes pour le témoin et l'éclaircie forte pour la période de 1969 à 1978.



les témoins). Ceci signifie que malgré une augmentation des accroissements en volume par tige, l'éclaircie commerciale n'a pas eu pour effet de diminuer significativement la masse volumique du bois au niveau du diamètre à hauteur de poitrine. Jaakkola et al. (2006) obtiennent les mêmes résultats pour l'épinette de Norvège. Avec un espacement respectif de 2,45 m × 2,45 m pour l'éclaircie légère et 2,92 m × 2,92 m pour l'éclaircie forte, la masse volumique du bois d'épinette blanche rejoint la moyenne observée en milieu naturel par Jessome (1977), et dépasse légèrement les masses volumiques obtenues en plantation par Yang et Benson (1997) en Ontario pour des espacements similaires. Pour la présente étude, il est probable que l'absence de différence significative dans la masse volumique du bois, entre les éclaircies, soit attribuable à la génétique (Corriveau et al. 1991), aux conditions météorologiques (Corriveau et al. 1990), à l'espacement entre les arbres (Moore et al. 2009) ou au moment où l'éclaircie a été effectuée dans la vie de l'arbre. Ceci peut être expliqué aussi par la présence de fibres (trachéides) plus longues près de l'écorce à paroi plus épaisse (Josza et Middleton 1994). Cela implique que, peu importe l'intensité de l'éclaircie commerciale, celle-ci n'aurait pas ou peu d'effet négatif sur la masse volumique du bois.

Pour le MOE et le MOR, on observe la même tendance. Nos résultats montrent une augmentation prononcée du MOE après l'éclaircie, ce qui indique que celle-ci n'a généralement pas d'effet négatif significatif sur cette propriété. Le MOE est probablement contrôlé par voie génétique ou par des facteurs environnementaux comme peut l'être la masse

volumique. Avec une moyenne variant entre 6600 et 7700 MPa, toutes éclaircies confondues (témoin, légère et forte), toutes les classes sociales présentent les caractéristiques pour des sciages de 3^e qualité (Zhang et Koubaa 2009). Cependant, la progression du MOE nous porte à croire que le début de la production de bois de qualité supérieure sera atteint probablement vers l'âge de 40 à 45 ans. Quant au MOR, l'éclaircie commerciale d'intensité légère ou forte ne semble pas avoir d'effets négatifs significatifs, bien qu'il y ait une faible tendance à la baisse de la valeur moyenne chez les dominants. Après éclaircie, l'augmentation du MOR est encore plus accentuée pour les autres classes sociales. Contrairement au MOE, le MOR montre, pour toutes les intensités d'éclaircie, des valeurs qui dépassent largement les meilleurs standards de bois classé par machine (MSR) (Conseil canadien du bois 1995) avec une valeur moyenne de près de 71 MPa pour les dominants et les codominants dans les deux intensités d'éclaircies.

Tout comme le MOE, le MOR est largement reconnu parmi les paramètres les plus importants à considérer pour déterminer la qualité du bois (Bowyer et al. 2007). Pour vérifier quelles variables influencent le MOR, nous avons procédé à une régression multiple pas-à-pas. Parmi les variables que nous avons prises en considération (âge cambial, taux de croissance, masse volumique), la masse volumique s'avère être, avant éclaircie et peu importe l'éclaircie ou la classe sociale, la variable expliquant entre 50,7 % et 62,4 % des variations du MOR. Après éclaircie, la masse volumique représente, le plus souvent, la variable la plus importante

Tableau 3. Variables expliquant les variations du module de rupture chez l'épinette blanche avant éclaircie (1968–1988), pour chacune des classes sociales et après éclaircie (1989–2000), par intensité d'éclaircie et pour chacune des classes sociales (les variables explicatives ont été identifiées à l'aide de la régression multiple pas-à-pas; les r^2 partiels indiquent la proportion de la variation du MOR expliquée par chaque variable explicative).

Éclaircie	Classe sociale	Variable	r^2 partiel	R^2 total	F	$p > F$	Effet
Avant éclaircie (1968–1988)							
Aucune	Dominant	Masse volumique	0,513	0,513	24,642	0,000	+
		Taux de croissance	0,09	0,605	4,907	0,038	–
	Codominant	Masse volumique	0,624	0,624	35,294	0,000	+
		Taux de croissance	0,066	0,690	4,479	0,046	–
	Intermédiaire	Masse volumique	0,624	0,624	35,294	0,000	+
		Taux de croissance	0,066	0,690	4,479	0,046	–
Opprimé	Masse volumique	0,507	0,507	21,629	0,000	+	
	Masse volumique	0,529	0,529	24,693	0,000	+	
Après éclaircie (1989–2000)							
Témoin	Dominant	Masse volumique	0,820	0,820	27,396	0,002	+
	Codominant	Masse volumique	0,883	0,883	77,049	0,000	+
	Intermédiaire	Taux de croissance	0,781	0,781	17,787	0,008	–
	Opprimé	Masse volumique	0,850	0,850	34,067	0,001	+
Légère	Dominant	Masse volumique	0,744	0,744	17,418	0,006	+
	Codominant	Masse volumique	0,725	0,725	15,781	0,007	+
	Intermédiaire	Masse volumique	0,573	0,573	37,903	0,002	+
	Âge cambial	0,312	0,885	13,487	0,014	+	
Forte	Opprimé	Masse volumique	0,573	0,573	14,790	0,012	–
	Dominant	Masse volumique	0,505	0,505	6,120	0,048	–
	Codominant	Masse volumique	0,927	0,927	76,104	0,000	+
	Intermédiaire	Masse volumique	0,962	0,962	152,322	0,000	+
	Opprimé	Masse volumique	0,833	0,833	100,200	0,000	+
		Âge cambial	0,125	0,958	15,023	0,012	+

pour expliquer les variations du MOR. À elle seule, cette variable explique entre 50,5 % et 96,2 % des variations du MOR. L'âge cambial contribue dans quelques cas aux variations du MOR. Ces résultats contredisent en partie ceux de Klinger et al. (1995) pour l'épinette de Norvège. Ces derniers affirment que la masse volumique est une valeur intrinsèque importante, mais qu'elle n'explique pas, à elle seule, la variation radiale du MOR, si on ne tient pas compte de la largeur des cernes et de la surface des nœuds (Klinger et al. 1995) ou de l'angle des microfibrilles.

Selon Zhou et Smith (1991), la méthode utilisée, à l'aide de petits échantillons sans défauts, ne représente pas la réalité, puisque ceux-ci n'auraient pas la même réaction, sous contrainte, qu'une pièce de bois incluant des nœuds ou d'autres défauts, tels que la carie et la déviation de fils. D'après Wolcott et al. (1986), il arrive que le MOE et le MOR puissent augmenter, après séchage, sur de petites pièces de bois sans défaut, alors que sur des pièces de dimension réelle, le MOE et le MOR diminuent, pour des conditions de croissance similaires. Toutefois, l'utilisation de pièces sans défaut a pour avantage de très bien illustrer les caractéristiques physiques que pourrait avoir du bois sans nœuds produit à partir de tiges élaguées.

Conclusion

Dans cette étude, l'accroissement annuel périodique en volume à l'échelle de la tige est excellent, ce qui fait que cette plantation d'épinette blanche aménagée est parmi les plus productives de tout l'est canadien. Toutefois, nous croy-

ons que le site d'étude n'est pas nécessairement exceptionnel en soi et représente la très grande majorité des sites riches de l'est de l'Amérique où seront réalisées la plupart des éclaircies commerciales dans un contexte de sylviculture intensive. Ce sont les arbres dominants qui ont les plus forts accroissements en volume, et c'est dans la modalité d'éclaircie forte que l'on retrouve les codominants les plus gros. Considérant cette excellente croissance, nous recommandons d'effectuer une première éclaircie avec une intensité de prélèvement autour de 35 % de la surface terrière initiale, incluant les sentiers de débardage. S'il s'agit d'une éclaircie légère, elle devrait être suivie d'une deuxième intervention quelques années après la première pour optimiser l'accroissement des codominants, puisque cette classe sociale contribue significativement à la productivité du peuplement, particulièrement sur les sites riches et bien pourvus en eau. Selon toute vraisemblance, la première éclaircie constitue l'étape la plus importante pour préserver tout le potentiel de croissance de la plantation. D'autres études devront être mises de l'avant pour déterminer les intensités et les fréquences de prélèvement lors des éclaircies subséquentes et leur rentabilité.

Malgré une croissance dépassant largement la moyenne, la masse volumique du bois, le MOE et le MOR de l'épinette blanche ne semblent pas avoir été significativement affectés par l'éclaircie commerciale au niveau du diamètre à hauteur de poitrine, ni tout au long de la vie de l'arbre, quelle que soit la classe sociale. Ces résultats confirment l'hypothèse de départ, tant et si bien que, pour l'industrie du sciage, notre étude offre d'excellentes perspectives d'avenir pour l'éclaircie commerciale et encore plus si l'objectif est de produire du

bois sans nœuds par l'application de l'élagage. Les résultats de la présente étude démontrent clairement le potentiel que peut avoir l'éclaircie commerciale en termes d'accroissement sans pour autant diminuer la qualité du bois de l'épinette blanche. À ce jour, cette essence demeure une des plus intéressantes au plan sylvicole et une des plus importantes pour l'économie régionale et nationale.

Remerciements

Des remerciements à MM. Tony Zhang et Gilles Chareut de FPIInnovations à Sainte-Foy pour l'accès à un laboratoire de recherche et à MM. Robert Doucet et Jean-Yves Ouellet de l'école secondaire A.M. Sormany d'Edmundston au Nouveau-Brunswick, pour l'aide en laboratoire. Merci à Jean-Marie Binot pour avoir mis à ma disposition les données pour les années 1989–1994–1998. Merci à Cynthia Doiron, pour l'aide à la cueillette de données sur le terrain. Cette recherche n'aurait pas été possible sans l'autorisation de la compagnie J.D. Irving Ltée, obtenue grâce à Gaëtan Pelletier et Martin Fillion. Je tiens à remercier l'Université de Moncton pour un soutien financier via la Bourse d'études supérieures de la Faculté de foresterie de l'Université de Moncton (Patrimoine Canada). Finalement, un merci spécial à M. Alain Caron pour la révision des analyses statistiques ainsi qu'à MM. Robert Schneider et Simon Bilodeau-Gauthier pour la révision du manuscrit.

Bibliographie

- Assmann, E. 1970. The principles of forest yield study. Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Traduit par S.H. Gardiner. University of Munich. Pergamon Press Ltd., P.W. Davis, Éditeur de la version traduite.
- ASTM. 1998a. Annual book of ASTM standards. Vol. 04.10 wood, designation: D 143–94. p. 23–26.
- ASTM. 1998b. Annual book of ASTM standards. Vol. 04.10 wood, designation: D 2915–94.
- Bowyer, J.L., Shmulsky, R., et Haygreen, J.G. 2007. Forest product and wood science. An introduction. 5^e éd. Blackwell Publishing Ltd., Oxford. p. 558.
- Cameron, A.D. 2002. Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. *Forestry*, **75**(1) : 25–35. doi:10.1093/forestry/75.1.25.
- Conseil canadien du bois. 1995. Le livre des portées. Éd. 1995. Tableaux des portées pour le bois de charpente et le bois lamellé-collé canadiens. Conseil canadien du bois, Gloucester, Ont.
- Corriveau, A., Beaulieu, J., Mothe, F., Poliquin, J., et Doucet, J. 1990. Densité et largeur des cernes des populations d'épinettes blanches de la région forestière des Grands lacs et du St-Laurent. *Can. J. For. Res.* **20**(2) : 121–129. doi:10.1139/x90-018.
- Corriveau, A., Beaulieu, J., et Daoust, G. 1991. Heritability and genetic correlations of wood characters of Upper Ottawa Valley white spruce populations grown in Quebec. *For. Chron.* **67**(6) : 698–705.
- Gagné, L. 2003. Croissance et propriétés du bois après éclaircie commerciale dans une plantation d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) de 32 ans du Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick. Thèse de maîtrise inédite. Faculté de foresterie, Université de Moncton, Campus d'Edmundston.
- Jaakkola, T., Mäkinen, H., et Saranpää, P. 2006. Wood density of Norway spruce: Responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation. *For. Ecol. Manage.* **237**(1–3) : 513–521. doi:10.1016/j.foreco.2006.09.083.
- Jamnack, M., Needham, T., et Bateman, M. 1994. Commercial thinning to provide harvest stability to forests with an unbalanced age class distribution. *For. Chron.* **70**(3) : 299–303.
- Jessome, A.P. 1977. Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada (publication SP-514F). Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Qué.
- Josza, L.A., et Middleton, G.R. 1994. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois : nature et conséquences pratiques (publication spéciale sp-34f). Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Qué.
- Kellison, R.C., et Pearson, R.H. 1985. More plantation wood means quality problems. *For. Ind.* **112**(9) : 24–26.
- Kliger, I.R., Perstorper, M., Johansson, G., et Pellicane, P.J. 1995. Quality of timber products from Norway spruce. Part 3. Influence of spatial position and growth characteristics on bending stiffness and strength. *Wood Sci. Technol.* **29** : 397–410.
- Kollman, F.F.P., et Côté, W.A., Jr. 1968. Principles of wood science and technology. Solid wood. Springer-Verlag, Berlin.
- Koubaa, A., Zhang, S.Y., Isabel, N., Beaulieu, J., et Bousquet, J. 2000. Juvenile-mature correlation in black spruce wood density and growth. *Wood Fiber Sci.* **32**(1) : 61–71.
- Lussier, J.-M. 1997. Reconstitution de la dynamique récente de pessières noires vierges et de seconde venue. Thèse de doctorat inédite. Université du Québec à Montréal, Département Sciences de l'Environnement.
- Mansfield, S.D., Parish, R., Goudie, J.W., Kang, K.-Y., et Ott, P. 2007. The effects of crown ratio on the transition from juvenile to mature wood production in lodgepole pine in western Canada. *Can. J. For. Res.* **37**(8) : 1450–1459. doi:10.1139/X06-299.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 2003. Comité consultatif scientifique du manuel d'aménagement forestier. Éclaircie commerciale pour le groupe de production prioritaire SEPM. Ouvrage collectif.
- Misson, L. 1999. Influence respective du climat et de l'intensité d'éclaircie sur l'accroissement radial de *Picea abies* (L.) Karst. Dissertation inédite, Université catholique de Louvain, Belgique.
- Moore, J., Achim, A., Lyon, A., Mochan, S., et Gardiner, B. 2009. Effects of early re-spacing on the physical and mechanical properties of Sitka spruce structural timber. *For. Ecol. Manage.* **258**(7) : 1174–1180. doi:10.1016/j.foreco.2009.06.009.
- Park, A., et Wilson, E.R. 2007. Beautiful plantations: can intensive silviculture help Canada to fulfill ecological and timber production objectives? *For. Chron.* **83**(6) : 825–839.
- Pelletier, G., et Pitt, D.G. 2008. Silvicultural responses of two spruce plantations to midrotation commercial thinning in New Brunswick. *Can. J. For. Res.* **38**(4) : 851–867. doi:10.1139/X07-173.
- Schneider, R., Zhang, S.Y., Swift, D.E., Bégin, J., et Lussier, J.-M. 2008. Predicting selected wood properties of jack pine following commercial thinning. *Can. J. For. Res.* **38**(7) : 2030–2043. doi:10.1139/X08-038.
- Sheedy, G., et Bertrand, V. 1997. Résultats de 10 ans concernant les éclaircies en ligne réalisées dans les plantations de la forêt de Drummondville (Note de recherche forestière n° 77.). Ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de la recherche forestière.
- Skovsgaard, J.P. 2009. Analysing effects of thinning on stand volume growth in relation to site conditions: A case study for even-aged Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). *Forestry*, **82**(1) : 87–104. doi:10.1093/forestry/cpn047.
- Tasissa, G., et Burkhart, H.E. 1998. Modeling thinning effects on ring specific gravity of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *For. Sci.* **44**(2) : 212–223.
- Trucios Remolino, T. 1999. Croissance de l'épicéa (*Picea abies* (L.) Karsten) en structure équienne en fonction de l'intensité de

- l'éclaircie. Dissertation pour l'obtention du grade de Docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique. Université catholique de Louvain, Faculté des sciences agronomiques. Département des sciences du milieu et de l'aménagement du territoire.
- von Althen, F.W., et Stiel, W.M. 1990. A red pine case history: Development of the rockland plantation from 1914 to 1986. *For. Chron.* **66**(Décembre) : 606–610.
- Wang, E.I.C., et Micko, M.M. 1984. Wood quality of white spruce from north central Alberta. *Can. J. For. Res.* **14**(2) : 181–185. doi:10.1139/x84-035.
- Weiner, T., et Thomas, S.C. 1986. Size variability and competition in plant monoculture. *Oikos*, **47**(2) : 211–222. doi:10.2307/3566048.
- Wolcott, M.P., Shottafer, J., Philip, J., et Shepard, R.K. 1986. Preparation and testing of microbending specimens. *For. Prod. J.* **36**(11/12) : 69–71.
- Yang, K.C., et Benson, C.A. 1997. Influence of spacing on juvenile and mature woods of *Picea glauca*. Dans *Timber management toward wood quality and end-product value. Sous la direction de S.Y. Zhang, R. Gosselin et G. Chauret. Proceedings of the CTIA/IUFRO International wood Quality Workshop*, 18 au 22 août 1997, Québec City, Canada. Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Qué. p. IX-9.
- Yang, K.C., et Hazenberg, G. 1992. Impacts of spacings on sapwood and heartwood thickness in *Picea mariana* (Mill.) B.S.P., et *Picea glauca* (Moench.) Voss. *Wood Fiber Sci.* **24**(3): 330–336.
- Zeide, B. 2001. Thinning and growth. *J. For.* **99** : 20–25.
- Zhang, S.Y. 1995. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Sci. Technol.* **29**(6) : 451–465. doi:10.1007/BF00194204.
- Zhang, S.Y., et Koubaa, A. 2009. Les résineux de l'est du Canada. Écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. FPInnovations. Publication spéciale SP-526F.
- Zhou, H., et Smith, I. 1991. Factors influencing bending properties of white spruce lumber. *Wood Fiber Sci.* **23**(4) : 483–500.
- Zubizarreta Gerendiain, A., Peltola, H., Pulkkinen, P., Jaatinen, R., Pappinen, A., et Kellomäki, S. 2007. Differences in growth and wood property traits in cloned Norway spruce (*Picea abies*). *Can. J. For. Res.* **37**(12) : 2600–2611. doi:10.1139/X07-113.