

# Comparaison du volume et de la valeur des bois résineux issus d'éclaircies par le bas et par dégagement d'arbres-élites dans l'Est du Canada

Laurent Gagné, Luc Sirois et Luc Lavoie

**Résumé :** Le choix des tiges à récolter lors des interventions d'éclaircies commerciales peut avoir des répercussions sur la quantité et le type de produits forestiers qu'on peut en tirer, de même que sur la structure des peuplements résiduels. L'objectif de cette étude était de comparer l'éclaircie par le bas (ÉCb) et deux intensités d'éclaircie par dégagement de 50 (AÉ50) ou 100 (AÉ100) arbres-élites à l'hectare. En 2008, quatre peuplements de 30 ans ont été sélectionnés dans des peuplements résineux naturels et plantations d'épinette blanche au Québec pour comparer les effets des modalités d'éclaircie sur la structure diamétrale, le volume·ha<sup>-1</sup>, le diamètre à hauteur de poitrine (dqm) quadratique moyen des arbres marchands (dqm), le volume moyen par tige ainsi que la répartition par type de produits (dimensions) du sciage et co-produits (copeaux et sciures) de première transformation, la valeur de la matière ligneuse récoltée par m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>. Globalement, il n'y a pas de différences significatives dans les attributs dendrométriques entre les modalités d'éclaircie, sauf la surface terrière et le volume prélevés dans les plantations. La transformation par simulation des bois issus de ces éclaircies permet de produire une proportion analogue de pièces de 1 po × 3 po, 1 po × 4 po et 2 po × 3 po, mais ÉCb produit significativement moins de 2 × 4 et plus de co-produits par rapport à AÉ50 ou AÉ100. Ces résultats suggèrent que l'éclaircie par dégagement d'arbres-élites n'entraîne pas la dégradation par écrémage du peuplement résiduel et pourrait s'avérer, dans certaines circonstances, une option intéressante au double plan économique et écologique. D'autres études sont nécessaires pour valider cette hypothèse.

**Mots-clés :** conversion structurale, éclaircie commerciale, arbres-élites, panier de produits, valeur au m<sup>3</sup>, co-produits.

**Abstract:** The amounts and types of forest products derived from commercial thinning as well as residual stand structure can be influenced by the choice of trees to be harvested. This study compares low thinning (ÉCb) and two thinning intensities through releasing either 50 (AÉ50) or 100 (AÉ100) elite trees per hectare. In 2008, four 30 year old stands were selected from naturally occurring coniferous stands and white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) plantations in Quebec to compare the effects of the thinning treatments on diametral structure, volume·ha<sup>-1</sup>, quadratic mean diameter (dqm) of merchantable trees, mean volume per trees, as well as product type distribution (sizes) from sawing and byproducts (chips and sawdust) following a first transformation, and value of harvested wood per m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>. Differences in dendrometric characteristics between thinning treatments are not significant overall, except for basal area and volume harvested from plantations. Simulated wood transformation from thinning treatments yielded similar proportions of 1 in. × 3 in., 1 in. × 4 in., and 2 in. × 3 in. lumber but compared to AÉ50 or AÉ100 thinning treatments, ÉCb yielded significantly less 2 in. × 4 in. lumber and more byproducts. These results suggest that high grading by releasing elite trees does not lead to degraded residual stands and could, in some cases, offer an interesting choice from an economic and ecological standpoint. Further studies are needed to validate this hypothesis.

**Key words:** structural modification, commercial thinning, elite trees, product assortment, value per m<sup>3</sup>, byproducts.

## Introduction

Dans des peuplements prématurés où la production de billes marchandes débute, l'aménagiste a souvent recours à l'éclaircie commerciale afin d'augmenter l'accroissement des tiges résiduelles et d'assainir le peuplement. Plusieurs modalités d'application de l'éclaircie commerciale peuvent être envisagées, chacune répondant à des objectifs distincts (Smith et al. 1997). Certaines modalités ont pour objectif spécifique la production de matière ligneuse (Smith et al. 1997) alors que d'autres ont pour objectifs simultanés la production de matière ligneuse et la restauration d'attributs de

vieilles forêts (Larson et al. 2012). Les principales différences entre ces modalités concernent les critères de sélection des tiges à prélever (Nyland 1996; Smith et al. 1997; Helms 1998). La modalité d'éclaircie commerciale la plus commune et la plus anciennement utilisée dans les peuplements résineux ou mélangés de l'est de l'Amérique du Nord (Smith et al. 1997) et ailleurs dans le monde (Cameron 2002) est l'éclaircie dite « par le bas » (ÉCb). Celle-ci s'inscrit dans un régime d'aménagement équienné et vise prioritairement le prélèvement des tiges de petit diamètre et de mauvaise qualité. Elle est destinée à la production de la matière ligneuse dans le régime de futaie régulière et la coupe totale est

Reçu le 14 octobre 2015. Accepté le 21 juillet 2016.

**L. Gagné\* et L. Sirois.** Université du Québec à Rimouski, Département de biologie et géographie, Chaire de recherche sur la forêt habitée, 300 allée des Ursulines, Rimouski, QC G5L 3A1, Canada.

**L. Lavoie.** Collectif régional de développement du Bas-Saint-Laurent, 186 rue Lavoie, Rimouski, QC G5L 5Z1, Canada.

**Auteur correspondant :** Laurent Gagné (courriel : [lgagne@crdbsl.org](mailto:lgagne@crdbsl.org)).

\*Adresse actuelle : Collectif régional de développement du Bas-St-Laurent, 186 rue Lavoie, Rimouski, QC G5L 5Z1, Canada.

Les droits d'auteur demeurent la propriété des auteurs ou de leur établissement. Il est possible d'obtenir (gratuitement dans la plupart des cas) l'autorisation de réutiliser du contenu en passant par [RightsLink](#).

généralement l'étape finale du scénario sylvicole (Smith et al. 1997; Buckman et al. 2006).

Toutefois, lorsque la conversion structurale est visée pour transformer la structure équiennne d'un peuplement vers une structure inéquienne-irrégulière, l'éclaircie par dégagement d'arbres-élites (parfois appelés arbres cibles) pourrait s'avérer une approche mieux adaptée (Schütz 1997; Davies et al. 2008; Sanchez 2012). Ce type d'éclaircie, surtout appliqué en Europe, dégage de leurs compétiteurs immédiats un nombre prédéterminé (p. ex. 50–400 ha<sup>-1</sup>) d'arbres-élites (AÉ) (Savill 1991; Davies et al. 2008) choisis parmi les plus vigoureux des classes dominantes et codominantes, préférentiellement parmi les espèces à grande longévité (Schütz 1997, 2001). L'intervention a pour effet immédiat de créer un puits de lumière autour de la cime (Schütz 1997; Davies et al. 2008) afin de stimuler la croissance des AÉ (Schütz 1997; Dodson et al. 2012; Sanchez 2012). En créant des ouvertures en périphérie des AÉ, cette modalité d'éclaircie entraîne une hétérogénéité dans la répartition des tiges qui est propice à la conversion structurale (Schütz 1997, 2002; Susse et al. 2011; Larson et al. 2012). Par ses effets sur le peuplement, l'éclaircie par dégagement d'AÉ est un traitement principalement lié au régime de futaie irrégulière (Davies et al. 2008; Sanchez 2012).

La nouvelle loi sur l'aménagement durable du territoire forestier public au Québec (RLRQ chapitre A-18,1) préconise la réduction des écarts entre la forêt naturelle et la forêt aménagée (Ruel et al. 2007; Boucher et al. 2009a, 2009b; Alvarez et al. 2011; Boucher et Grondin 2012; Jetté et al. 2013a, 2013b). Cette orientation pourrait avoir de profondes implications dans plusieurs pratiques sylvicoles dont celle de l'éclaircie commerciale et exige le développement de nouvelles pratiques comme l'éclaircie par dégagement d'AÉ (Davies et al. 2008). Dans certaines régions comme dans l'Est du Canada où la cible de réduction des écarts entre la forêt aménagée et la forêt naturelle implique un recours plus important au régime de futaie irrégulière (Etheridge et al. 2006; Boucher et al. 2009b; Jetté et al. 2013b) l'éclaircie par dégagement d'AÉ pourrait s'avérer un traitement approprié. Toutefois, l'application de l'éclaircie par dégagement d'AÉ soulève plusieurs inquiétudes. On associe parfois ce traitement à l'éclaircie par le haut (Davies et al. 2008; Susse et al. 2011; Sanchez 2012) laquelle peut entraîner des risques d'écrémage du volume et une importante diminution de la valeur du peuplement résiduel (Prégent 2004; Laflèche et al. 2013). On associe également cette forme d'éclaircie à l'éclaircie neutre, dépendamment des critères de sélection des tiges à récolter et de l'intensité du prélèvement (Balleux et Ponette 2006). Cette étude pose l'hypothèse que la première éclaircie par dégagement d'AÉ génère un panier de produits avec une proportion accrue de produits de plus grande valeur (\$·m<sup>-3</sup>·ha<sup>-1</sup>) que celle par le bas, sans avoir d'effets négatifs sur la qualité du peuplement résiduel. Plus spécifiquement, cette étude a pour objectif de comparer l'ÉCbas et deux intensités d'éclaircie par dégagement d'AÉ sur les aspects suivants : (i) les paramètres dendrométriques et la structure diamétrale des peuplements avant et après intervention, (ii) la composition du panier de produits issus des bois de la première éclaircie et (iii) la valeur au m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> des produits forestiers.

## Matériel et méthodes

### Aire d'étude

L'aire d'étude fait partie de la section acadienne de la région forestière des Grands-Lacs-Saint-Laurent (Rowe 1972) de l'Est du Canada (48°30'N, 67°25'O). Elle est localisée dans le piedmont appalachien à une altitude variant de 300 à 430 m. La station climatique d'Amqui (183 m d'altitude) située à moins de 40 km de l'aire d'étude est caractérisée par une température moyenne annuelle (1971–2000) de 2,1 °C, une somme thermique de 1355 degrés-jours (>5 °C) et une période sans gel d'une durée moyenne de 136 jours. Les précipitations annuelles moyennes y sont de 1000 mm·an<sup>-1</sup>, dont 35 % tombe sous forme de neige (Environnement Canada 2008).

Cette région de forêt mélangée correspond au domaine de la sapinière à bouleau blanc (SBB) et à celui de la sapinière à bouleau jaune de l'est (SBJ) (Saucier et al. 1998). Deux plantations en SBJ et deux peuplements naturels en SBB, aux caractéristiques écologiques et sylvicoles par ailleurs comparables (tableau 1), furent retenus pour cette expérience. Ces deux types de peuplements ont été sélectionnés en raison de leur abondance dans la forêt acadienne et parce qu'ils sont particulièrement ciblés pour l'application de l'éclaircie commerciale et intéressants pour les usines de transformation d'essences résineuses.

### Plan expérimental

Les contraintes d'espace ont permis d'installer 16 unités expérimentales (UE) dans chacune des deux stations en peuplement naturel et 20 UE dans chacune des deux stations en plantation. Chaque UE avait une superficie de 7524 m<sup>2</sup> (99 m × 76 m) incluant les sentiers de débardage. Ces sentiers, distants de 33 m, occupaient 10 % de la superficie de chaque unité. Quatre traitements (tableau 1) ont été appliqués aléatoirement aux UE et les travaux d'éclaircie ont été exécutés manuellement et les billes débardées à l'aide d'un porteur sur chenilles ou sur roues. Les traitements AÉ100 et AÉ50 consistaient à libérer 100 ou 50 AÉ de tous leurs compétiteurs dans un rayon de 3 m de leur tronc (Schütz 1997; Sanchez 2012). Un arbre était considéré comme compétiteur lorsque ses branches touchaient celles de l'AÉ et qu'il avait au moins la moitié de sa hauteur. Les critères de sélection des AÉ, inspirés des recommandations de Schütz (1997, 2002; Davies et al. 2008) étaient: (i) faire partie de la classe d'âge dominante du peuplement, (ii) faire partie des classes sociales dominantes ou codominantes, (iii) être de bonne vigueur, (iv) avec des branches d'au plus 2 cm de diamètre sur les deux premiers mètres de la bille de souche, (v) avoir un fût rectiligne, sans défauts majeurs ni blessures récentes ou cicatrisées et (vi) une cime vivante de 40 à 60 % de la hauteur totale de l'arbre.

L'ÉCbas consistait à prélever, uniformément dans le peuplement, les tiges malades et malformées selon les critères de classification des tiges en fonction des défauts et des maladies (Boulet 2007) et ceci presque exclusivement parmi les tiges de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) ≤ 12 cm. Le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) était l'essence prioritairement visée par la récolte. Dans tous les cas, les billes destinées au sciage ont été tronçonnées à une longueur de 2,44 m avec un diamètre minimal de 9,1 cm au fin bout.

### Mesures

Nous avons fait nos mesures immédiatement avant (automne 2008) et après l'éclaircie commerciale (printemps 2009) (tableau 1). Parmi ces mesures, le DHP a été utilisé pour estimer la hauteur de chaque tige avec des modèles de régression spécifiques pour le sapin baumier et l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) en peuplement naturel (Fortin et al. 2009) et en plantation pour l'épinette blanche (Prégent et al. 2010). Après avoir obtenu la hauteur, cet intrant a servi au calcul du volume de chaque tige selon la procédure généralement reconnue au Québec (Fortin et al. 2007; Prégent et al. 2010).

Le dénombrement des tiges par classe de diamètre avant et après éclaircies a permis de réaliser les structures diamétrales par peuplement. Nous avons mesuré toutes les billes, issues des tiges récoltées dans les 20 UE de chacune des deux stations en plantations. Pour des raisons de contraintes d'accessibilité en période hivernale, nous avons mesuré toutes les billes, issues des tiges récoltées dans seulement 12 des 16 UE de chacune des deux stations d'origine naturelle (tableau 1). Les données de longueur, de diamètre et de courbure de chaque bille ont été utilisées pour créer des billes virtuelles à l'aide du logiciel Optitek version 7,7 (Optitek 2007). Le sciage optimal de chaque bille par Optitek a permis de calculer la quantité de sciures, de copeaux et le nombre de pieds mesure de planche (pmp) par type de produits (1 × 3, 1 × 4,

**Tableau 1.** Caractéristiques des quatre stations à l'étude en 2008.

Historique sylvicole	% des essences	Hauteur dominante moyenne (m)	AAM <sup>a</sup> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )	N <sup>bre</sup> d'UE <sup>b</sup>	Réplicats	Traitements expérimentés <sup>c</sup> (prélèvement en surface terrière) <sup>d</sup>	Mesures prises avant traitement <sup>e</sup>	Mesures prises après traitement <sup>f</sup>
Coupe totale (1979) régénérée naturellement, éclaircie précommerciale (1992)	Sapin (76 %) Épinette (7 %) Feuillus (17 %)	14,7	4,2	16	4	ÉCbas (25 %) AÉ50 (20 %) AÉ100 (25 %) Témoin (0 %)	Essence, DHP (arbres > 9 cm), Hauteur (dm près) de tous les arbres dans une parcelle sur trois à l'aide d'un hypsomètre	Essence, DHP (arbres > 9 cm), Sur les billes abattues: longueur, diamètre aux deux extrémités (mm près), rayon maximal de courbure
Coupe totale (1972) régénérée naturellement, éclaircies précommerciales (1985 et 1990)	Sapin (96 %) Épinette (4 %)	14,9	4,8	16	4	ÉCbas (25 %) AÉ50 (20 %) AÉ100 (25 %) Témoin (0 %)		
Plantation d'épinette blanche (1984), phytocides (1987)	Épinette (78 %) Sapin (17 %) Feuillus (5 %)	13,9	4,3	20	5	ÉCbas (25 %) AÉ50 (20 %) AÉ100 (25 %) Témoin (0 %)		
Plantation d'épinette blanche (1982), phytocides (1985)	Épinette (66 %) Sapin (31 %) Feuillus (3 %)	14,4	5,1	20	5	ÉCbas (25 %) AÉ50 (20 %) AÉ100 (25 %) Témoin (0 %)		

**Nota :** dm, décimètre.

<sup>a</sup>Accroissement annuel moyen depuis l'origine du peuplement.

<sup>b</sup>Unités expérimentales.

<sup>c</sup>ÉCbas : éclaircie par le bas, AÉ50 : éclaircie par dégagement de 50 arbres-élites ha<sup>-1</sup>, AÉ100 : éclaircie par dégagement de 100 arbres-élites ha<sup>-1</sup>.

<sup>d</sup>Excluant les sentiers de débardage.

<sup>e</sup>Mesures prises dans trois parcelles circulaires de 100 m<sup>2</sup>.UE<sup>-1</sup>.

<sup>f</sup>Mesures prises dans deux parcelles circulaires de 200 m<sup>2</sup>.UE<sup>-1</sup>.

**Tableau 2.** Prix de vente utilisé par scénario et par catégorie de bois d'œuvre pour calculer la valeur au m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>.

Catégorie de bois d'œuvre <sup>a</sup>	Scénario du prix de vente		
	Tendance 1999–2009 (\$·Mpmp <sup>-1</sup> )	Pessimiste (\$·Mpmp <sup>-1</sup> )	Optimiste (\$·Mpmp <sup>-1</sup> )
1 × 3	433 <sup>b</sup>	300	500
1 × 4	409	250	480
2 × 3	388	240	460
2 × 4	483	300	600
2 × 6	470	300	650
Copeaux + sciures	55 <sup>c</sup>	35	64

<sup>a</sup>Marché des Grands-Lacs, bois sec.

<sup>b</sup>\$CAN2009.

<sup>c</sup>Prix de vente converti en mille pieds mesure de planche (Mpmp) à partir de tonne métrique anhydre (TMA).

2 × 3, 2 × 4, 2 × 6) (Liu et al. 2007). Le logiciel Optitek optimise les produits et co-produits de sciage de chaque bille selon les paramètres qui étaient en usage dans l'industrie forestière en 2008 (Anonyme 1995; Anonyme 2009). Seules les longueurs standards (2,44 m) ont été utilisées pour obtenir le panier de produits.

Pour déterminer la valeur (\$CAN2009) de chaque m<sup>3</sup> récolté une fois transformé par simulation, nous avons utilisé le nombre de pmp·ha<sup>-1</sup> par type de produits ainsi que les copeaux et sciures. Le prix des copeaux et des sciures était fixé à 105 et 60 \$ la tonne métrique anhydre (TMA), respectivement (Duchesne et Tanguay 2011). Afin d'uniformiser les unités de mesures, nous avons converti le prix en TMA en valeur par mille pieds mesure de planche (Mpmp) en tenant compte que la masse volumique du sapin baumier est différente de celle de l'épinette blanche. Nous avons utilisé le facteur d'équivalence de 2,02 TMA pour convertir le volume de 1 Mpmp, une valeur moyenne généralement utilisée dans l'industrie du sciage et de la transformation (Anonyme 2003; Anonyme 2016). Dans cette étude, la valeur monétaire du bois de sapin baumier est identique à celle de l'épinette blanche, comme c'est le cas sur le marché du bois d'œuvre (Indec 2009). Afin de réaliser une analyse de sensibilité, nous avons utilisé l'historique du prix de vente par type de produits et par modalité d'éclaircie selon trois scénarios (tableau 2). Pour chacun des scénarios, nous avons fait varier le prix à la hausse ou à la baisse du bois d'œuvre. Le scénario tendance utilise le prix moyen entre 1999 et 2009 (Indec 2009). Le scénario pessimiste utilise le prix du bois d'œuvre le plus bas observé entre 1981 et 2009 (année de référence 1982) alors que celui du scénario optimiste a été fait avec le meilleur prix obtenu pendant la même période (années de référence 1999 et 2004) (Vincent 2015).

## Analyses statistiques

### Variables dendrométriques et valeur du peuplement

Les analyses de variance ont porté sur la différence entre les valeurs avant traitement et les valeurs après traitement pour comparer l'effet de l'origine des peuplements et des différents types d'éclaircies. Nous avons comparé la valeur de la différence pour la surface terrière, le volume par tige, le volume total ha<sup>-1</sup>, le coefficient de Hart-Becking (facteur d'espacement), le ratio hauteur dominante/DHP (ratio H/DHP), le DHP quadratique moyen (dqm), le nombre de tiges ha<sup>-1</sup> et la valeur des peuplements avec un modèle linéaire simple–mixte (Pinheiro et al. 2010) avec l'origine du peuplement et l'éclaircie comme facteurs fixes et la station comme facteur aléatoire<sup>1</sup>. Nous avons choisi ces variables dendrométriques parce qu'elles sont fréquemment utilisées pour déterminer le moment opportun pour procéder à l'éclaircie. Lorsque l'analyse détectait des différences significatives ( $p < 0,05$ ), les mo-

**Tableau 3.** Modèles candidats a priori pour expliquer la variation du pourcentage cumulé de pièces de 2 × 4 et de 2 × 6.

N° de modèle	Variables retenues pour les modèles candidats a priori
1	Surface terrière + DHP
2	Surface terrière + DHP + Hart-Becking
3	DHP + Hart-Becking + ratio H/DHP
4	DHP + ratio H/DHP
5	Surface terrière + DHP + Hart-Becking + ratio H/DHP
6	Surface terrière + Hart-Becking + ratio H/DHP

dalités d'éclaircie qui différaient étaient identifiées à l'aide de tests de comparaisons multiples de Tukey. La normalité des résidus a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro–Wilk ( $p > 0,05$ ) alors que l'homogénéité de la variance et l'indépendance des résidus ont été vérifiées par une analyse visuelle des résidus normalisés en fonction des valeurs prédites.

### Proportion de 2 × 4 et de 2 × 6

Nous avons analysé la proportion cumulée, par rapport au total de pmp, des pièces de plus grande valeur marchande (2 × 4 et 2 × 6) en fonction des principaux attributs du peuplement. Nous voulions savoir s'il était possible d'expliquer la proportion des 2 × 4 et des 2 × 6 à l'aide des variables dendrométriques au moment d'appliquer l'éclaircie. Nous avons utilisé le facteur d'inflation de la variance (VIF) pour vérifier le degré de tolérance de la multicollinéarité des variables explicatives, ce qui nous a permis de rejeter certaines variables trop corrélées entre elles (Belsley et al. 1980). Pour chaque traitement, six modèles candidats ont été a priori constitués à partir des variables retenues : surface terrière marchande, DHP quadratique moyen, coefficient de Hart-Becking et ratio H/DHP (tableau 3). Le modèle le plus parcimonieux expliquant la proportion de pmp provenant des 2 × 4 et des 2 × 6 issus de chacune des modalités d'éclaircie a été identifié selon le critère d'Akaike (AIC) (Burnham et Anderson 1998). Pour le modèle retenu, la proportion de la variation expliquée ( $R^2$ ) et son degré de signification globale ( $p < 0,05$ ) ont été calculés. Le test de Shapiro–Wilk a été utilisé pour vérifier les postulats de la régression multiple.

### Panier de produits et valeur par m<sup>3</sup> à l'hectare

Pour la composition du panier de produits et sa valeur par m<sup>3</sup> à l'hectare, nous avons utilisé un modèle linéaire simple–mixte avec l'origine du peuplement et l'éclaircie comme facteurs fixes et aléatoire. Ceci nous a permis de comparer, entre les modalités d'éclaircies, la proportion des pieds mesure de planche (pmp) par classe de diamètre au fin bout des billes ainsi que la proportion et la valeur absolue par type de produits. Les données brutes concernant le panier de produits et sa valeur, ont été transformées en  $\log_{10}$  pour les normaliser. Dans tous les cas, la normalité des résidus a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro–Wilk ( $p > 0,05$ ). Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R, version 2,11,1 (R Core Team 2010) et les bibliothèques « nlme » (Pinheiro et al. 2010) et « gmodels » (Warnes et al. 2009).

## Résultats

### Structure diamétrale et variables dendrométriques

Les traitements d'éclaircie ont modifié la distribution diamétrale des arbres formant les peuplements. L'ÉCbas a entraîné un prélèvement important de tiges au sein des classes de 8 à 12 cm de DHP en peuplements naturels et de 8 à 14 cm en plantations. En comparaison, les éclaircies par dégagement d'AE ont entraîné un prélèvement plus équitablement réparti parmi les classes de

<sup>1</sup>Voir tableau supplémentaire 1 pour le détail de l'ANOVA. Des données supplémentaires sont disponibles avec l'article par le site Web du journal au <http://nrcresearchpress.com/doi/suppl/10.1139/cjfr-2015-0395>.

Fig. 1. Structure diamétrale moyenne pour chacune des modalités d'éclaircie et pour chaque origine de peuplement, avant et après traitement.

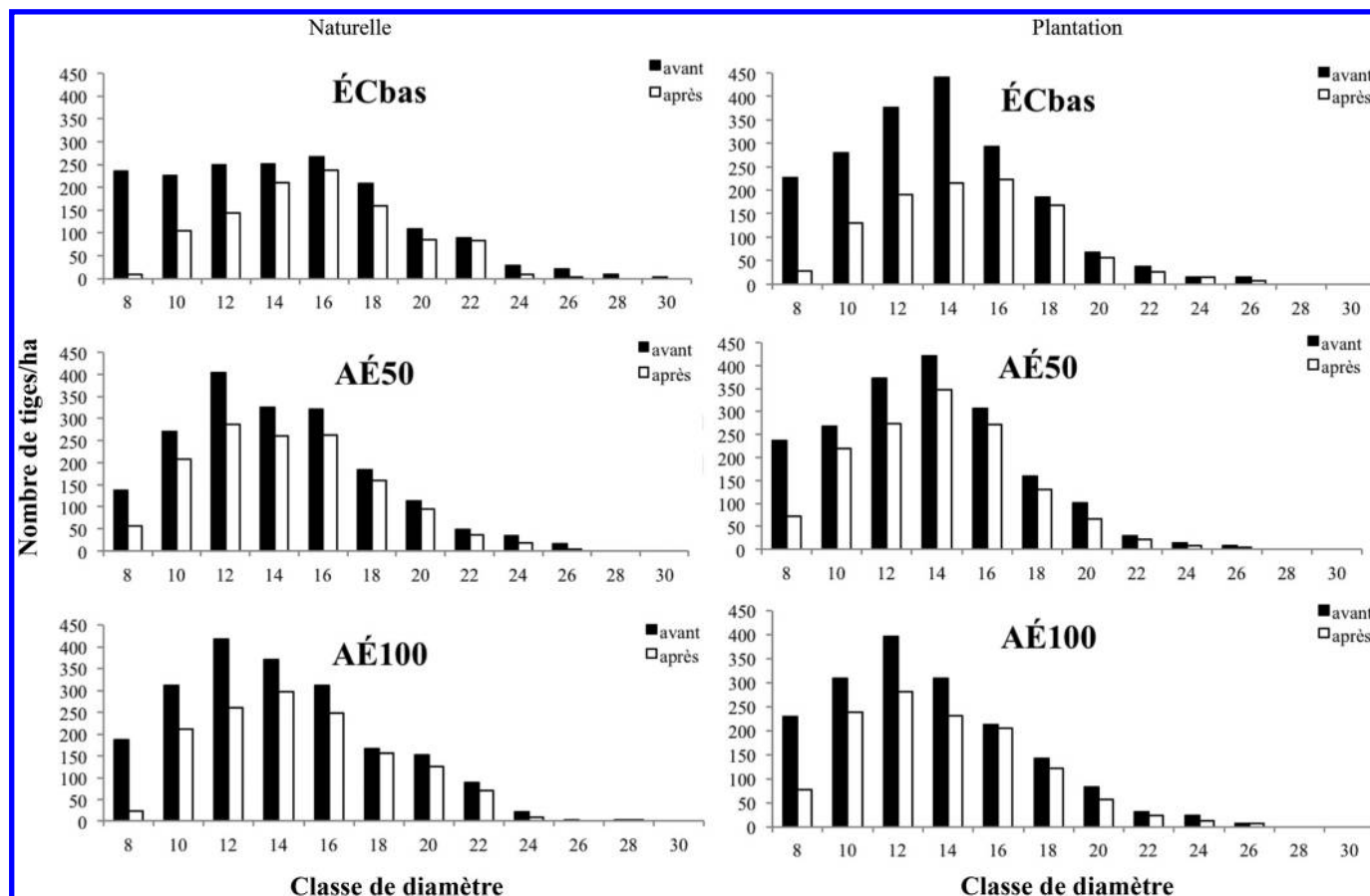


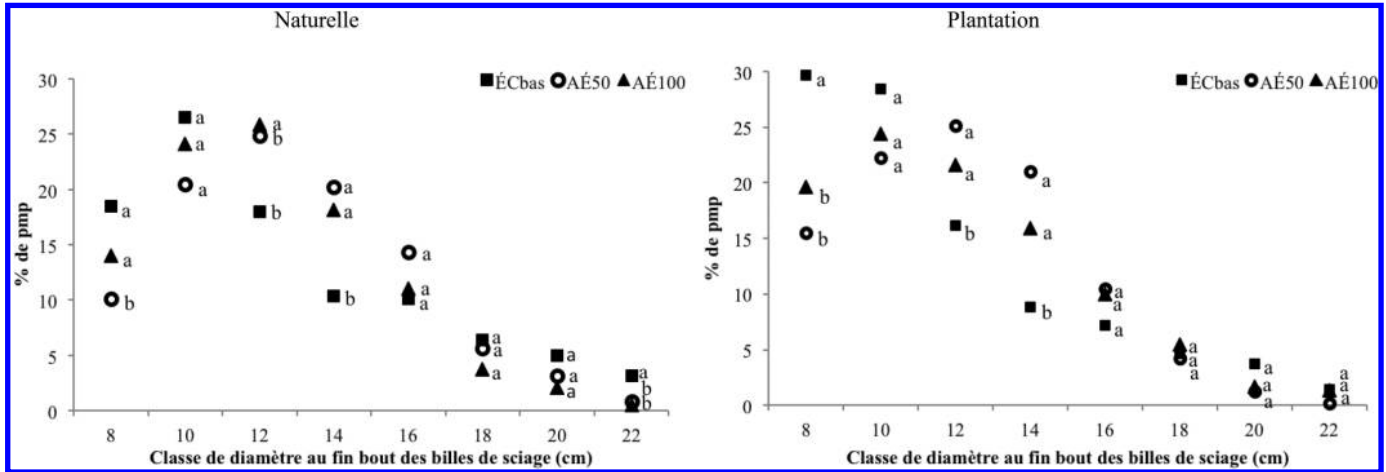
Tableau 4. Principaux attributs sylvicoles des peuplements dans les différentes modalités d'éclaircie par origine et comparaisons multiples (Tukey) des différences avant et après traitement.

Variable	Modalités d'éclaircie								Comparaisons d'éclaircies		
	Témoin		ÉCbas		AÉ50		AÉ100		ÉCbas-AÉ50	ÉCbas- AÉ100	AÉ50-AÉ100
	avant	après	avant	après	avant	après	avant	après	valeur de p <sup>e</sup>		
<b>Origine : naturelle</b>											
vol./tige (dm <sup>3</sup> )	76,7 (21,5)	94,8 (22,8)	105,4 (19,6)	86,0 (26,5)	93,4 (26,8)	78,4 (11,2)	103,7 (32,4)	0,84	0,29	0,12	
Hart-Becking (%)	14,5 (1,2)	15,5 (1,5)	20,6 (2,9)	14,9 (0,8)	18,3 (2,9)	15,5 (0,6)	19,0 (2,4)	0,57	0,69	0,98	
ratio H/DHP	103 (4)	98 (4)	92,3 (5,6)	99 (5)	99,1 (6,2)	99 (3)	96,7 (7,9)	0,25	0,62	0,82	
tiges·ha <sup>-1</sup>	2333 (392)	1985 (464)	1218 (258)	2138 (225)	1532 (445)	2080 (232)	1396 (343)	0,6	0,97	0,77	
dqm (cm) <sup>a</sup>	14,1 (1,3)	14,8 (0,8)	15,8 (1,1)	14,7 (1,6)	14,9 (1,4)	14,2 (0,9)	15,5 (1,8)	0,29	0,83	0,13	
st (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>	30,0 (5,2)	29,5 (3,6)	22,8 (3,8)	31,1 (4,9)	25,9 (6,2)	29,8 (3,1)	25,1 (4,4)	0,76	0,63	0,97	
vol·ha <sup>-1</sup> (m <sup>3</sup> )	139 (40)	147 (32)	112 (17)	149 (35)	133 (41)	147 (30)	119 (20)	0,25	0,8	0,68	
n	24 <sup>c</sup>	24	16 <sup>d</sup>	24	16	24	16	—	—	—	
<b>Origine : plantation</b>											
vol./tige (dm <sup>3</sup> )	91,9 (9,1)	85,7 (16,5)	86,7 (14,9)	86,3 (9,0)	75,4 (12,1)	81,5 (19,4)	76,2 (12,0)	0,46	0,98	0,6	
Hart-Becking (%)	16,4 (1,2)	17,9 (3,3)	23,1 (3,1)	16,1 (0,6)	19,6 (1,9)	16,7 (1,5)	23,6 (2,9)	0,25	0,98	0,36	
ratio H/DHP	95 (4,6)	94 (3)	90,4 (5,1)	96 (4)	97,3 (6,1)	97 (6)	89,4 (7,8)	0,25	0,99	0,26	
tiges·ha <sup>-1</sup>	1865 (260)	2098 (320)	1026 (190)	2113 (155)	1372 (209)	2057 (334)	1088 (213)	0,14	0,49	0,74	
dqm (cm)	15,0 (1,0)	14,2 (1,0)	15,3 (1,6)	14,3 (0,5)	14,7 (0,7)	14,0 (1,0)	14,7 (1,1)	0,30	0,47	0,97	
st (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	27,5 (3,1)	28,8 (3,9)	19,6 (4,2)	27,3 (1,1)	23,1 (2,9)	25,3 (3,9)	19,6 (3,1)	0,002	0,002	0,99	
vol·ha <sup>-1</sup> (m <sup>3</sup> )	150 (10)	153 (32)	102 (29)	146 (12)	116 (25)	130 (24)	95 (18)	0,01	0,20	0,61	
n	30	30	21	30	26	30	20	—	—	—	

Nota : Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.

<sup>a</sup>Diamètre quadratique moyen.<sup>b</sup>Surface terrière (m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>).<sup>c</sup>Nombre (n) de parcelles circulaires de 100 m<sup>2</sup> avant éclaircie.<sup>d</sup>Nombre (n) de parcelles circulaires de 200 m<sup>2</sup> après éclaircie.<sup>e</sup>Probabilité que la valeur de F théorique > F calculé à partir de l'analyse de variance.

**Fig. 2.** Pourcentage du nombre total de pieds mesure de planche (pmp) généré avec les billes de différents diamètres au fin bout dans les différentes modalités d'éclaircie et par origine de peuplement. Les données brutes ont été normalisées par transformation en  $\log_{10}$ . Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les modalités d'éclaircie pour une même classe de diamètre ( $p < 0,05$ ).



diamètre de 8 à 16 cm. Tous les types d'éclaircie ont entraîné un prélèvement faible dans les classes diamétrales supérieures (fig. 1).

Sauf exceptions, il n'y a aucune différence significative entre les modalités d'éclaircie quant à leur effet sur les variables dendrométriques mesurées. Les seules exceptions concernent une diminution significativement ( $p \leq 0,01$ ) plus importante de la surface terrière et du volume prélevé dans ÉCbas que dans AÉ50 et une diminution significativement ( $p = 0,002$ ) plus importante de la surface terrière dans ÉCbas que dans AÉ100 dans les plantations (tableau 4).

**Diamètre des billes à l'origine du panier de produits et valeur au  $m^3 \cdot ha^{-1}$  de bois récolté**

Dans les peuplements naturels, le pourcentage de la quantité totale de pmp généré avec les billes de la classe de 8 cm au fin bout est significativement plus élevé dans ÉCbas (18 %) que dans AÉ50 (10 %). C'est également le cas dans les plantations où les billes de la classe de 8 cm au fin bout produisent un pourcentage significativement plus élevé de pmp total dans ÉCbas (30 %) que dans AÉ50 (14 %) ou AÉ100 (19 %) (fig. 2). Cette tendance s'inverse chez les billes des classes de 12 et de 14 cm au fin bout. Celles-ci génèrent une proportion significativement moindre de pmp total dans ÉCbas (9 à 18 %) par rapport à AÉ50 (20 à 25 %) et AÉ100 (16 à 26 %). Toutefois, dans les peuplements naturels, la proportion de la quantité totale de pmp générée avec les billes de la classe de 12 cm au fin bout ne diffère pas significativement entre ÉCbas et AÉ50. La proportion de la quantité totale de pmp généré avec les billes des autres classes de diamètre au fin bout ne varie pas significativement entre les modalités d'éclaircies, sauf pour les billes de la classe de 22 cm où la proportion est significativement plus élevée dans ÉCbas pratiquée dans les peuplements naturels.

La simulation de la transformation des billes récoltées lors des éclaircies par dégagement d'AÉ a généré une proportion accrue de pièces de  $1 \times 4$  et de  $2 \times 4$  ainsi qu'une plus faible quantité de copeaux et sciures à l'hectare que les bois récoltés lors de l'éclaircie ÉCbas (tableau 5). Plus spécifiquement, dans les peuplements naturels et les plantations, AÉ50 et AÉ100 génèrent des bois qui permettent la production d'une proportion significativement plus importante de  $1 \times 4$  et de  $2 \times 4$  que les bois générés par ÉCbas alors que les bois issus de AÉ50 génèrent une proportion significativement plus faible de copeaux et sciures (tableau 5). En valeur absolue, les éclaircies par dégagements d'AÉ dans les peuplements naturels ont généré une quantité significativement plus faible de pmp- $ha^{-1}$  de chacun des produits que les ÉCbas, sauf les  $2 \times 4$  dans AÉ100. Pour les  $2 \times 4$ , ÉCbas a généré 1119 pmp- $ha^{-1}$  (19 %), comparativement à 796 pmp- $ha^{-1}$  (34 %) et 1219 pmp- $ha^{-1}$

**Tableau 5.** Quantité et proportion de pmp (pied mesure de planche) moyen par hectare de chacun des produits pour chaque modalité d'éclaircie par origine de peuplement.

Type de produits	Modalité d'éclaircie					
	ÉCbas		AÉ50		AÉ100	
	pmp- $ha^{-1}$	%	pmp- $ha^{-1}$	%	pmp- $ha^{-1}$	%
<b>Origine : naturelle</b>						
1 x 3	184a	3,0	57b	2,7	118c	2,9
1 x 4	43a	0,7a	30b	1,4b	65b	1,4b
2 x 3	1273a	20,2	394b	18,8	814c	18,4
2 x 4	1119	19,2a	796	33,7b	1219	29,6b
2 x 6	683a	11,8	292b	12,7	372ab	9,6
Copeaux + sciures	2700a	45,0a	647b	30,5b	1560c	38,1a
Total	6004		2217		4151	
<b>Origine : plantation</b>						
1 x 3	86a	2,5	47b	2,3	61a	2,1
1 x 4	30	0,6a	39	1,8b	45	1,3c
2 x 3	670a	18,1	413b	20,2	520a	18,0
2 x 4	645	14,5a	638	30,6b	854	24,7b
2 x 6	307ab	6,2	156b	7,2	389ac	9,8
Copeaux + sciures	1803a	58,0a	791b	37,7b	1128bc	44,0a
Total	3544		2086		3000	

**Nota :** Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les modalités d'éclaircie ( $p < 0,05$ ).

(30 %) pour AÉ50 et AÉ100, respectivement (tableau 5). L'AÉ50 a produit significativement moins de pmp- $ha^{-1}$  en pièces de  $1 \times 3$ ,  $2 \times 3$  et en copeaux et sciures, par rapport à AÉ100. Dans les plantations, la quantité de pmp- $ha^{-1}$  de  $1 \times 3$  et  $2 \times 3$  générés par les bois issus d'AÉ50 et d'AÉ100 est significativement plus faible que ceux générés à partir d'ÉCbas. Pour les  $2 \times 4$ , c'est 638 pmp- $ha^{-1}$  (31 %) qui proviennent de AÉ50 et 854 pmp- $ha^{-1}$  (25 %) dans AÉ100 comparativement à 645 pmp- $ha^{-1}$  (15 %) dans ÉCbas. Dans AÉ100, la quantité de copeaux et sciures est significativement plus faible qu'ÉCbas. Enfin, AÉ100 permet la production d'une quantité significativement supérieure de pièces de  $1 \times 3$ ,  $2 \times 3$  et  $2 \times 6$  que AÉ50 (tableau 5).

Les modèles qui expliquent le mieux la variation de la proportion cumulée de production de pmp des pièces de  $2 \times 4$  et de  $2 \times 6$  incluent le DHP quadratique moyen, le coefficient de Hart-Becking, la surface terrière et le ratio H/DHP comme variables communes. Ces modèles, tous significatifs ( $p < 0,01$ ), expliquent respectivement 36, 25, 60 et 32 % de la variation de la proportion cumulée

**Tableau 6.** Modèle le plus parcimonieux expliquant la variation de la proportion cumulée de production de 2 × 4 et de 2 × 6 par type d'éclaircie.

Type d'éclaircie	N° de modèle	dl	Variables retenues pour les modèles les plus parcimonieux							
			Surface terrière	DHP	Hart-Becking	Ratio H/DHP	Constante	AIC	R <sup>2</sup>	p
ÉCb <sub>as</sub>	5	34	-2,069 (0,859) <sup>a</sup>	6920 (2,280)	-4,105 (1,871)	-0,481 (0,443)	117,603 (73,581)	317,9	0,36	<0,01
AE50	5	34	-0,419 (1,043)	5,452 (1,320)	9,526 (2,868)	1,630 (0,553)	-311,526 (82,240)	301,9	0,25	<0,01
AE100	5	33	-1,490 (0,494)	6,45 (1,711)	-2,889 (2,086)	0,070 (0,376)	47,350 (74,101)	274,2	0,60	<0,01
Toutes <sup>b</sup>	5	119	-0,006 (0,003)	0,075 (0,010)	0,014 (0,012)	0,010 (0,002)	-1,540 (0,504)	-169,0	0,32	<0,01

Nota : dl, degrés de liberté.

<sup>a</sup>Erreur standard entre parenthèses.

<sup>b</sup>Toutes éclaircies confondues.

des pièces de bois de ces dimensions dans les ÉCb<sub>as</sub>, AE100 et AE50 et lorsque toutes les modalités sont confondues, respectivement (tableau 6).

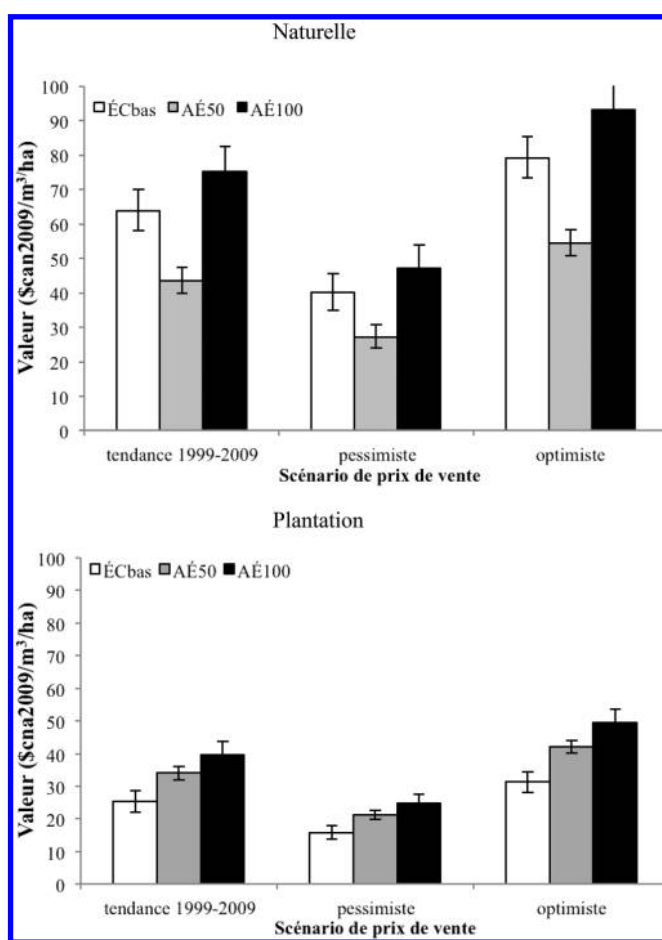
La valeur (SCAN2009) des produits de la transformation de chaque m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> récolté ne diffère pas significativement ( $p > 0,05$ ) entre les modalités d'éclaircie, peu importe le scénario du prix de vente (fig. 3). Tant chez les plantations que les peuplements d'origine naturelle, et pour tous les scénarios, la valeur de  $p$  est parfois inférieure à 0,1 entre AE50 et AE100 ( $p = 0,06$ ) et entre AE100 et l'ÉCb<sub>as</sub> ( $p = 0,07$ ). Dans tous les autres cas, la valeur de  $p > 0,1$ . Nos résultats montrent que la valeur moyenne est toujours plus élevée dans les peuplements naturels que dans les plantations. Dans les peuplements naturels, les plus faibles valeurs par m<sup>3</sup> de bois récolté viennent toujours des AE50 alors qu'elles sont toujours associées aux ÉCb<sub>as</sub> dans les plantations.

## Discussion

À notre connaissance, les effets comparés de l'éclaircie par dégagement d'AE et de l'ÉCb<sub>as</sub> sur le rendement en volume et sur la valeur monétaire des produits de la transformation des bois en peuplement résineux n'ont jamais été étudiés en Amérique du Nord. L'éclaircie par dégagement d'AE demeure à ce jour une approche principalement utilisée en Europe centrale (Schütz 1997, 2001, 2002; Susse et al. 2011; Sanchez 2012) et au Royaume-Uni (Mason et Kerr 2004; Davies et al. 2008; Vítková et Ní Dhubbáin 2013). L'éclaircie par dégagement d'AE implique le prélèvement de tiges situées principalement dans les étages dominants et codominants du peuplement (Mason et Kerr 2004; Balleux et Ponette 2006; Davies et al. 2008; Vítková et Ní Dhubbáin 2013). Il s'agit vraisemblablement de la raison pour laquelle cette forme d'éclaircie a suscité certaines inquiétudes parmi les gestionnaires et les sylviculteurs de l'est canadien. L'approche comparative entre cette nouvelle forme d'éclaircie et la modalité plus communément utilisée dans l'Est du Canada amène un éclairage nouveau sur cette question et précise les avantages économiques de l'utilisation de l'éclaircie par AE.

Nos résultats montrent que l'éclaircie commerciale par dégagement d'AE s'apparente à une éclaircie neutre, tant pour les peuplements naturels que les plantations (fig. 1) étant donné que la récolte des tiges tend à être répartie dans toutes les classes de diamètre (Kerr et Haufe 2011). C'est l'une des premières conditions pour l'amorce du processus de conversion structurale puisque toutes les classes de diamètres sont représentées dans le peuplement résiduel (Drössler et al. 2014). Au contraire, la récolte dans l'ÉCb<sub>as</sub> vise principalement les tiges de plus faible diamètre (Kerr et Haufe 2011), ce qui s'est traduit dans cette étude par un prélèvement beaucoup plus intense au sein des classes de diamètre de 8 à 12 cm (fig. 1). La récolte quasi exclusive des plus petites tiges avec l'ÉCb<sub>as</sub> accentue le caractère régulier de la futaie du peuplement résiduel (Teraoka et Keyes 2011; Vítková et Ní Dhubbáin 2013). En Europe, l'éclaircie par dégagement d'AE est de plus en plus utilisée parce qu'elle permet de dégager les tiges les plus vigoureuses et entraîne une hétérogénéité accrue dans la distribution spatiale des tiges comparativement à l'ÉCb<sub>as</sub> (Davies et al. 2008; Vítková et Ní Dhubbáin 2013).

**Fig. 3.** Valeur du panier de produits (SCAN2009-m<sup>-3</sup>.ha<sup>-1</sup>) selon différents scénarios de prix de vente de bois d'œuvre et de co-produits pour chaque modalité d'éclaircie par origine de peuplement. Les données brutes ont été normalisées par transformation en log<sub>10</sub>. Aucune différence significative entre les modalités d'éclaircie pour un même scénario ( $p > 0,05$ ).



Toutes les modalités d'éclaircie mises à l'essai ici ont eu pour effet de conserver un peuplement résiduel de qualité (tableau 4). Le coefficient de Hart-Becking augmente dans tous les cas, ce qui signifie que l'espacement moyen entre les tiges est suffisant pour permettre une libre croissance des tiges résiduelles. Le prélèvement du nombre de tiges, de la surface terrière et du volume par hectare est similaire d'un traitement à l'autre alors que le volume moyen par tige et le dqm après traitement demeurent stables ou augmentent dans toutes les modalités d'éclaircie sauf pour quelques exceptions (tableau 4). Ces résultats montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les modalités d'éclaircie pour les principaux attributs sylvicoles et suggèrent que dans le cas d'AE50

ou d'AE100, le prélèvement des tiges compétitrices uniquement autour des arbres-élites permet de récolter de plus grosses tiges au moment de la première éclaircie sans affecter la qualité du peuplement résiduel.

L'ÉCbas implique la récolte de plus petites tiges et par conséquent de plus petites billes (fig. 2). Entre 45 et 58 % des billes récoltées dans cette éclaircie ont un diamètre inférieur à 12 cm au fin bout alors que cette proportion diminue de 30 à 36 % pour AE50 et AE100 (fig. 2). La simulation de la transformation des billes suggère que l'ÉCbas génère une proportion accrue de produits de plus faible dimension et de plus faible valeur au m<sup>3</sup> récolté que dans les éclaircies par dégagement d'AE, particulièrement dans les plantations (fig. 3). La proportion maximale des pièces de 2 × 4 et de 2 × 6 pour l'ÉCbas atteint 31 % comparativement à 47 % dans AE50 et 40 % dans AE100 pour une production de pmp-ha<sup>-1</sup> généralement moindre (tableau 5). Les éclaircies par AE tendent à récolter un volume de plus grande valeur pour chaque m<sup>3</sup> récolté puisqu'elles produisent autant de 2 × 6, plus de pièces de 2 × 4, et génèrent moins de sciures et de copeaux comparativement à l'ÉCbas (tableau 5). La valeur plus élevée par m<sup>3</sup> prélevé dans les peuplements naturels est probablement liée aux plus grosses tiges qui se trouvaient dans plusieurs blocs de peuplements naturels comparativement aux plantations avant la coupe (tableaux 4 et 5).

Le volume moyen des tiges prélevées est l'un des paramètres utilisés pour estimer la profitabilité des interventions de récoltes (Liu et al. 2007). Cela est vrai à l'échelle d'un arbre, mais il est plus difficile de prédire la composition et la valeur du panier de produits d'un peuplement uniquement sur la base du volume moyen par tige. La surface terrière et le diamètre quadratique moyen sont reconnus pour avoir une forte influence sur la composition du panier de produits forestiers (Aubry et al. 1998; Prestemon et Buongiorno 2000; Zhang et Tong 2005). Si on ajoute à ces deux variables le facteur d'élancement (ratio H/DHP) et le facteur d'espacement (Hart-Becking) on obtient des modèles significatifs qui expliquent entre 25 et 60 % de la variation dans la proportion des 2 × 4 et des 2 × 6 cumulées (tableau 6). Les variables dendrométriques utilisées lors de l'inventaire forestier peuvent aider le sylviculteur et le gestionnaire dans leur prise de décision quant au choix des sites à éclaircir et le moment optimal pour intervenir. Les 2 × 4 et les 2 × 6 représentent les principaux produits sur lesquels repose la rentabilité d'une usine de première transformation puisque ce sont ces pièces qui ont généralement la plus grande valeur sur le marché (Indec 2009). Dans un contexte où le prix du bois fluctue constamment, les outils qui aident à prédire la quantité de produits de haute valeur sont importants puisque la première éclaircie est réputée être peu rentable, particulièrement dans le cas de l'ÉCbas (Eliasson et Lageson 1999).

Les critères de sélection des arbres à récolter déterminent eux aussi la composition du panier de produits. L'éclaircie commerciale par le bas contraint le sylviculteur à prélever les tiges de moindre qualité et celles situées dans les plus petites classes de diamètre du peuplement. Dans les éclaircies par dégagement d'AE, ce sont les tiges qui sont en concurrence directe avec les arbres dominants et codominants du peuplement qui sont prélevées (Davies et al. 2008). En focalisant le prélèvement autour des AE, on prélève de plus gros arbres tout en récoltant une certaine proportion de tiges de petites et de moyennes dimensions ayant pour résultat d'avoir un meilleur panier de produits, de favoriser la croissance des meilleures tiges (Balleux et Ponette 2006; Bradford et Palik 2009; Macdonald et al. 2010; Sanchez 2012) et de permettre aux AE de conserver leur dominance tout au long du processus de conversion structurale (Davies et al. 2008). Ce mode de prélèvement contribue davantage à rendre la répartition spatiale et la distribution diamétrale des tiges irrégulières (Palik et al. 2003; Davies et al. 2008; Susse et al. 2011; Vítková et Ní Dhubháin 2013) bien que l'ÉCbas puisse le faire dans certains cas (Gauthier et al. 2015). Or, une répartition spatiale et diamétrale irrégulière des tiges représentent deux des principales conditions de réussite de

la conversion structurale des peuplements (Schütz 1997, 2001; Susse et al. 2011; Sanchez 2012; Drössler et al. 2014). Pendant le processus de conversion, il est suggéré de dégager un minimum de 50 à plus de 500 tiges à l'hectare dégagé de deux compétiteurs ou plus (Sanchez 2012). Le nombre d'arbres élites à dégager et de compétiteurs à prélever peut être progressif et il est variable selon la densité et la qualité du peuplement d'origine, (Savill 1991; Davies et al. 2008) de l'essence et du diamètre cible des AE (Savill 1991; Balleux et Ponette 2006; Davies et al. 2008).

Cette étude procure plusieurs avenues pertinentes pour guider les stratégies d'aménagement forestier dans les régions où il faut réduire l'écart entre les forêts naturelles et les forêts aménagées et où on vise des objectifs de production de matière ligneuse. L'exemple de la région de l'Est-du-Québec est éloquent. Pour cette région seulement, on estime à environ 85 000 ha, entre 2012 et 2022, le potentiel de première éclaircie commerciale (Gagné et Lavoie 2014). Pour la même période, ces superficies pourraient produire plus de 850 millions de pmp provenant de la première éclaircie (ou 77 millions de pmp annuellement), ou 23 % de la capacité de production totale annuelle de l'ensemble des usines de sciage de la région qui est estimé à environ 340 millions de pmp (OFBSL 2005). Les superficies considérables à traiter en éclaircie dans cette région ou dans les autres régions de la forêt acadienne offrent une excellente opportunité de diversifier les approches sylvicoles.

La diversification des approches sylvicoles est un concept désormais préconisé par la sylviculture moderne (Puettmann et Tappeiner 2014) mais son déploiement doit être économiquement rentable et écologiquement justifié. Lorsque l'objectif sylvicole est de convertir un peuplement de structure régulière vers une structure irrégulière, l'éclaircie par dégagement d'AE s'avère une option à considérer non seulement pour des raisons écologiques, mais aussi pour des raisons économiques (Vítková et Ní Dhubháin 2013). Les résultats de cette étude suggèrent que l'éclaircie par dégagement d'AE génère des billes de plus grand diamètre qui permettent la fabrication d'un ensemble de produits forestiers composé majoritairement de pièces de plus grande valeur que l'ÉCbas, tout en maintenant un peuplement résiduel de qualité dans les deux cas.

Toutefois le développement à plus long terme (accroissement et régénération) des peuplements ainsi que les coûts reliés à ces deux types d'éclaircie dans un contexte opérationnel doivent être mesurés afin de pouvoir réaliser une comparaison pleinement éclairée de ces deux approches.

## Remerciements

Le financement de cette étude a été assuré par la Chaire de recherche sur la forêt habitée de l'Université du Québec à Rimouski, la Conférence Régionale des ÉluEs du Bas-Saint-Laurent et le Ministère des Ressources naturelles et de la faune du Québec. Merci à Raynald Côté, André Laberge, Stéphane Didier, Stéphane Giasson, David Coulombe, Antoine Miville, Élise Larose-Simard, Olivier Laroche, Vital Ouellet, Mariig Hamon, Dave Johnson et Simon Henry pour l'aide à la cueillette de données sur le terrain et Messieurs Tommy Savoie et Patrick Dallain du SEREX à Amqui pour l'aide en laboratoire. Un merci spécial à Dr. Alain Caron pour la révision des analyses statistiques et Stéphane Tremblay de la direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec pour la révision du manuscrit ainsi que deux réviseurs anonymes pour leurs judicieuses suggestions.

## Bibliographie

- Alvarez, E., Bélanger, L., Archambault, L. et Raulier, F. 2011. Portrait préindustriel dans un contexte de grande variabilité naturelle : une étude de cas dans le centre du Québec (Canada). *Forest. Chron.* **87**: 612–624. doi:10.5558/tfc2011-068.
- Anonyme. 1995. Optitek : Un outil d'aide à la décision pour l'industrie du bois de sciage. Technote TEC-32F. Forintek Canada Corp.



- Anonyme. 2003. Tableau sur les facteurs d'équivalence. Agence des forêts privées de Québec. <http://afpq03.ca/wp-content/uploads/2014/06/EQUIVAL.pdf> Consulté sur le site internet le 7 juillet 2016.
- Anonyme. 2009. Optitek, un outil puissant pour maximiser la valeur économique des forêts canadiennes. Ressources naturelles Canada-FPInnovations. Partenariat innovation forêt : <http://www.partenariat.qc.ca/outils>.
- Anonyme. 2016. Facteurs d'équivalence. Syndicat des producteurs forestiers du Bas-Saint-Laurent. <http://www.spfbsl.com/mise-en-marche-collective/facteurs-dequivalence.html>. Consulté sur le site internet le 7 juillet 2016.
- Aubry, C.A., Adams, W.T. et Fahey, T.D. 1998. Determination of relative economic weights for multitrait selection in coastal Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* **28**: 1164–1170. doi:10.1139/x98-084.
- Balleux, P. et Ponette, Q. 2006. Dispositif d'éclaircie en épicéa, principaux enseignements de trente années d'expérience. Forêt Wallonne. No. 83. 21 p.
- Belsley, D.A., Kuh, E. et Welsch, R.E. 1980. Regression diagnostics: identifying influential data and sources of collinearity. John Wiley, New York. doi:10.1002/0471725153.
- Boucher, Y. et Grondin, P. 2012. Impact of logging and natural stand-replacing disturbances on high-elevation boreal landscape dynamics (1950–2005) in eastern Canada. *For. Ecol. Manag.* **263**: 229–239. doi:10.1016/j.foreco.2011.09.012.
- Boucher, Y., Arseneault, D. et Sirois, L. 2009a. Logging history (1820–2000) of a heavily exploited southern boreal forest landscape: insights from sunken logs and forestry maps. *For. Ecol. Manag.* **258**: 1359–1368. doi:10.1016/j.foreco.2009.06.037.
- Boucher, Y., Arseneault, D. et Sirois, L. 2009b. La forêt préindustrielle du Bas-Saint-Laurent et sa transformation (1820–2000): implications pour l'aménagement écosystémique. *Le Naturaliste Canadien*. **133**(2): 60–69.
- Boulet, B. 2007. Défauts et indices de la carie des arbres. 2e édition. Les publications du Québec.
- Bradford, J.B. et Palik, B.J. 2009. A comparison of thinning methods in red pine: consequences for stand-level growth and tree diameter. *Can. J. For. Res.* **39**: 489–496. doi:10.1139/X08-201.
- Buckman, E.R., Bishaw, B., Hanson, T.J. et Benford, F.A. 2006. Growth and yield of red pine in the Lake States. United States Department of Agriculture. Forest Service. General Technical Report NC-271. MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station.
- Burnham, K.P. et Anderson, D.R. 1998. Model selection and inference: a practical information/theoretic approach. Springer, New-York, p. 353.
- 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**: 25–35. doi:10.1093/forestry/75.1.25.
- Davies, O., Haufe, J. et Pommerening, A. 2008. Silvicultural principles of continuous cover forestry. A guide to best practice. Forestry Commission Wales. Bangor university. [http://tyfcoed.bangor.ac.uk/BPG\\_final.pdf](http://tyfcoed.bangor.ac.uk/BPG_final.pdf).
- Dodson, E.K., Ares, A. et Puettmann, K.J. 2012. Early responses to thinning treatments designed to accelerate late successional forest structure in young coniferous stands of western Oregon, USA. *Can. J. For. Res.* **42**: 345–355. doi:10.1139/x11-188.
- Drössler, L., Nilsson, U. et Lundqvist, L. 2014. Simulated transformation of even-aged Norway spruce stands to multi-layered forests: an experiment to explore the potential of tree size differentiation. *Forestry*, **87**: 239–248. doi:10.1093/forestry/cpt037.
- Duchesne, I. et Tanguay, F. 2011. Effects of initial spacing on tree and wood attributes, lumber quality and value in white spruce -The Stanley spacing trial case study- FPInnovations. Project No. 201002863. Canadian Forest Service No. 31.
- Eliasson, L. et Lageson, H. 1999. Simulation study of a single-grip harvester in thinning from below and thinning from above. *Scand. J. Forest Res.* **14**: 589–595. doi:10.1080/02827589908540824.
- Environnement Canada. 2008. Archives nationales d'information et de données climatologiques. [http://climate.weatheroffice.gc.ca/Welcme\\_f.html](http://climate.weatheroffice.gc.ca/Welcme_f.html).
- Etheridge, D.A., MacLean, D.A., Wagner, R.G. et Wilson, J.S. 2006. Effects of intensive forest management on stand and landscape characteristics in northern New Brunswick, Canada (1945-2027). *Landscape Ecol.* **21**: 509–524. doi:10.1007/s10980-005-2378-9.
- Fortin, M., DeBlois, J., Bernier, S. et Blais, G. 2007. Mise au point d'un tarif de cubage général pour les forêts québécoises: une approche pour mieux évaluer l'incertitude associée aux prévisions. *Forest. Chron.* **83**(5): 754–765. doi:10.5558/tfc83754-5.
- Fortin, M., Bernier, S., Saucier, J.-P. et Labbé, F. 2009. Une relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 20 espèces commerciales du Québec. Mémoire de recherche forestière no. 153. Direction de la recherche forestière. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 22 p.
- Gagné, L. et Lavoie, L. 2014. Rendement des jeunes forêts et potentiel d'éclaircie commerciale dans la forêt publique et la forêt privée du Bas-Saint-Laurent. Conférence régionale des élus, Bas-Saint-Laurent. 33 p. Disponible à l'adresse <http://www.crebls.org/ressources-naturelles/chantier-d-eclaircie-commerciale>.
- Gauthier, M.-M., Barrette, M. et Tremblay, S. 2015. Commercial thinning to meet wood production objectives and develop structural heterogeneity: A case study in the spruce-fir forest, Quebec, Canada. *Forests*, **6**: 510–532. doi:10.3390/f6020510.
- Helms, J.A. 1998. The dictionary of forestry. Society of American Foresters, Bethesda, Md, USA.
- Indec. 2009. Marché nord-américain de sciage résineux. Conseil de l'industrie forestière du Québec. Service économie et marchés. <http://www.pribec.com> 52 p.
- Jetté, J.-P., Leblanc, M., Bouchard, M., Déry, S. et Villeneuve, N. 2013a. Intégration des enjeux écologiques dans les plans d'aménagement forestier intégré, Partie I – Analyse des enjeux, Québec, gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 150 p.
- Jetté, J.-P., Leblanc, M., Bouchard, M., Déry, S. et Villeneuve, N. 2013b. Intégration des enjeux écologiques dans les plans d'aménagement forestier intégré, Partie II – Élaboration de solutions aux enjeux, Québec, gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 159 p.
- Kerr, G. et Haufe, J. 2011. Thinning practice A silvicultural guide. Forestry commission, Forest research. 54 p. Disponible en ligne : [http://www.forestry.gov.uk/pdf/Silviculture\\_Thinning\\_Guide\\_v1\\_Jan2011.pdf/\\$FILE/Silviculture\\_Thinning\\_Guide\\_v1\\_Jan2011.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/Silviculture_Thinning_Guide_v1_Jan2011.pdf/$FILE/Silviculture_Thinning_Guide_v1_Jan2011.pdf).
- Lafèche, V., Larouche, C. et Guillemette, F. 2013. Chapitre 15 – L'éclaircie commerciale, dans Ministère des ressources naturelles, *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, pp. 300–327. ISBN 978-2-551-25229-9
- Larson, A.J., Stover, K.C. et Keyes, C.R. 2012. Effects of restoration thinning on spatial heterogeneity in mixed-conifer forest. *Can. J. For. Res.* **42**: 1505–1517. doi:10.1139/x2012-100.
- Liu, C., Zhang, S.Y., Cloutier, A. et Rycabel, T. 2007. Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics. *For. Ecol. Manag.* **242**: 648–655. doi:10.1016/j.foreco.2007.01.077.
- Macdonald, E., Gardiner, B. et Mason, W. 2010. The effects of transformation of even-aged stands to continuous cover forestry on conifer log quality and wood properties in the UK. *Forestry*, **83**(1): 1–16. doi:10.1093/forestry/cpp023.
- Mason, B. et Kerr, G. 2004. Transforming even-aged conifer stands to continuous cover management. Information note. 8 p. ISBN : 0-85538-620-7. <http://www.forestry.gov.uk>.
- Nyland, R.D. 1996. Silviculture concepts and applications. McGraw-Hill, New York.
- OFBSL (Observatoire de la foresterie du Bas-Saint-Laurent). 2005. Industrie forestière: Portrait et enjeux. 120 p. <http://www.ofbsl.net>.
- Optitek. 2007. Logiciel de simulation et d'optimisation de sciage. Version 7.7. FPInnovations. Canada. <http://www.fpinnovations.ca>.
- Palik, B., Mitchell, R.J., Pecot, S., Battaglia, M. et Pu, M. 2003. Spatial distribution of overstory retention influences resources and growth of longleaf pine seedlings. *Ecol. Appl.* **13**(3): 674–686. doi:10.1890/1051-0761(2003)013[0674:SDOORJ]2.0.CO;2.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D. et The R Development Core Team, 2010. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-197.
- Prégent, G. 2004. Éclaircie commerciale des plantations. Les façons de faire... Progrès-Forestier no. 169. 3 p. Association forestière des cantons de l'Est. <http://www.afce.qc.ca>.
- Prégent, G., Picher, G. et Auger, I. 2010. Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec. Mémoire de recherche forestière no. 160. Direction de la recherche forestière. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. ISBN (PDF): 978-2-550-60589-8. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche>.
- Prestemon, J.P. et Buongiorno, J. 2000. Determinants of tree quality and lumber value in natural uneven-aged southern pine stands. *Can. J. For. Res.* **30**: 211–219. doi:10.1139/x99-191.
- Puettmann, K.J. et Tappeiner, J.C. 2014. Multi-scale assessments highlight silvicultural opportunities to increase species diversity and spatial variability in forests. *Forestry*, **87**: 1–10. doi:10.1093/forestry/cpt050.
- R Cote Team. 2010. R (version 2.11.1): A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. <http://www.R-project.org/>.
- RLRQ Chapitre A-18.1. Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier. Document disponible en ligne: <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/A-18.1>.
- Rowe, J.S. 1972. Forest regions of Canada. Department of the environment, Canadian forestry service. Publication No. 1300. Cat. No. Fo 47-1300. 172 p.
- Ruel, J.-C., Roy, V., Lussier, J.-M., Pothier, D., Meek, P. et Fortin, D. 2007. Mise au point d'une sylviculture adaptée à la forêt boréale irrégulière. *Forest. Chron.* **83**(3): 367–374. doi:10.5558/tfc83367-3.
- Sanchez, C. 2012. Synthèse des méthodes d'irrégularisation des pessières pour la Wallonie. Vers une sylviculture durable, des écosystèmes diversifiés et des revenus soutenus. 44 p. ISBN: 2-9600251-7-2. Forêt Wallonne asbl. <http://www.foretwallonne.be>.
- Saucier, J.-P., Bergeron, J.-F., Grondin, P. et Robitaille, A. 1998. Les régions écologiques du Québec méridional (3e version): un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles du Québec. Supplément de L'Aubelle. **124**: 1–12.

- Savill, P.S. 1991. The silviculture of trees used in British Forestry. CAB International, Wallingford.
- Schütz, J.-P. 1997. Sylviculture 2. La gestion des forêts irrégulières et mélangées. Presses polytechniques et universitaires romandes. 176 p. ISBN 2-88074-349-4
- Schütz, J.-P. 2001. Opportunities and strategies of transforming regular forests to irregular forests. *For. Ecol. Manag.* **151**: 87–94. doi:10.1016/S0378-1127(00)00699-X.
- Schütz, J.-P. 2002. Silvicultural tools to develop irregular and diverse forest structures. *Forestry*, **75**(4): 329–337. doi:10.1093/forestry/75.4.329.
- Smith, D.M., Larson, B.C., Kelty, M.J. et Ashton, P.M. 1997. The practice of silviculture: Applied forest ecology, 9e edition. Wiley edition, 560 p. ISBN-10: 047110941X, ISBN-13: 978-0471109419.
- Susse, R., Allegrini, C., Bruciamacchie, M. et Burrus, R. 2011. Management of irregular forests- developing the full potential of the forest. Association Futaie Irrégulière, France. AFI-ISBN 978-2-9538331-1-9. 144 pages.
- Teraoka, J.S. et Keyes, C.R. 2011. Low thinning as a forest restoration tool at Redwood National Park. *West. J. Appl. For.* **26**(2): 91–93.
- Vincent, M. 2015. Secteur forestier Québécois: mise à jour économique. Conseil de l'industrie forestière du Québec. Assemblée d'information des membres associés, 28 janvier 2015, Château Bonne Entente, Québec. Présentation powerpoint. Site consulté le 28 septembre 2015 : <http://www.cifq.com/documents/file/Documentation/Conf%C3%A9rences%20et%20pr%C3%A9sentations/Assembl%C3%A9e%20membres%20associ%C3%A9s/presentation-michel-vincent-mise-a-jour-economique.pdf>.
- Vítková, L. et Ní Dhubháin, Á. 2013. Transformation to continuous cover forestry: a review. *Irish Forestry Journal*, **70**: 119–140.
- Warnes, G.R., Bolker, B., Lumley, T. et Johnson, R.C., Contributions from Randall, C., Johnson are Copyright 2009. SAIC-Frederick, Inc. Funded by the Intramural Research Program, of the NIH, National Cancer Institute and Center for Cancer Research under NCI Contract NO1-CO-12400. gmodels: Various R programming tools for model fitting. R package version 2.15.0. <http://CRAN.R-project.org/package=gmodels>.
- Zhang, S.-Y. et Tong, Q.-J. 2005. Modeling simulated product recovery in relation to selected tree characteristics in jack pine using sawing simulator Optitek. *Ann. For. Sci.* **62**: 219–228. doi:10.1051/forest:2005013.