

## Effets après 5 ans de l'éclaircie commerciale mécanisée dans une bétulaie jaune âgée de 41 ans

François Guillemette<sup>1</sup>, ing.f., M. Sc., Alexandre Morin-Bernard, ing.f. et Steve Bédard, ing.f., M. Sc.

### Résumé

Le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) est la deuxième essence feuillue la plus récoltée au Québec. Son bois est recherché par l'industrie et les consommateurs. Les peuplements à dominance feuillue abritant cette espèce sont susceptibles de générer des produits d'une grande valeur, et leur proximité géographique par rapport aux zones habitées facilite une sylviculture plus intensive. Malgré cela, peu de connaissances sont disponibles au sujet de l'effet des traitements sylvicoles comme l'éclaircie commerciale (EC) sur des peuplements composés majoritairement de cette essence. Un dispositif expérimental a donc été installé sur le territoire de la Station touristique Duchesnay, dans une bétulaie jaune issue d'une coupe totale faite en 1971. Ce peuplement âgé de 41 ans avait 1 103 arbres à l'hectare avec un diamètre moyen quadratique de 16,6 cm, ce qui représentait une surface terrière (ST) de 22,0 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>. Le dispositif comprenait 4 traitements : un témoin sans intervention, une EC faible, une EC modérée et une EC forte (ST résiduelles moyennes de 14,4 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>, 11,9 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> et 9,6 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> dans les EC, respectivement). Les résultats après 5 ans montrent que les EC n'ont pas eu d'effet significatif sur l'accroissement annuel périodique net, calculé sur la base de la ST du peuplement. Elles ont surtout permis d'accroître la présence du bouleau jaune et des arbres d'avenir dans le peuplement, grâce à la récolte prioritaire des peupliers et d'espèces peu désirées. Les arbres de plus petits diamètres situés en bordure des sentiers sont ceux dont la croissance a le mieux réagi aux éclaircies. L'accroissement annuel périodique du témoin était encore très bon dans la période quinquennale suivant la récolte (0,4 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>), en particulier pour les arbres de plus gros diamètres et ceux d'avenir.

Mots-clés : bouleau jaune, éclaircie, peuplement équienne, récolte mécanisée, traitement sylvicole

<sup>1</sup> Auteur de correspondance : [francois.guillemette@mffp.gouv.qc.ca](mailto:francois.guillemette@mffp.gouv.qc.ca)

### Abstract

*Yellow birch (Betula alleghaniensis Britton) is the second most-harvested hardwood species in Quebec. Its wood is valued by both the industry and consumers. Hardwood-dominated stands harboring this species are likely to yield high-value products, and their proximity to inhabited regions facilitates a more intensive silviculture. Yet, little is known about the effects of silvicultural treatments such as commercial thinning on stands composed mostly of yellow birch. We set up an experiment on the territory of the Station touristique Duchesnay, in a yellow birch stand that arose after a clearcutting in 1971. This 41-year-old stand contained 1 103 trees per hectare with a quadratic mean diameter of 16.6 cm, which represents a basal area of 22.0 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>. The experimental design comprises 4 treatments: a control (no intervention) and commercial thinnings of light, moderate and strong intensity (mean residual basal area: 14.4 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>, 11.9 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> and 9.6 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>, respectively). After 5 years, results show that the thinnings had no significant effect on net periodic annual increment calculated on the basis of stand basal area. These treatments mostly led to an increase in yellow birch and crop trees in the stand following the harvest targeting poplars and other non-desired species. The smaller-diameter trees near the trails showed the best growth response to the thinnings. Trees in the control treatment, especially crop trees and those with larger diameters, had a good periodic annual increment (0.4 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>).*

*Keywords: yellow birch, even-aged stand, silvicultural treatment, thinning, mechanical harvesting*



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

## 1. Introduction

Le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) est la deuxième essence feuillue la plus récoltée au Québec. La valeur marchande de ses sciages de première qualité est excellente (CRIQ 2002). Pourtant, dans le passé, des pratiques forestières visant la récolte prioritaire des arbres de qualité de cette essence ainsi que des difficultés liées à sa régénération ont entraîné une diminution de l'abondance des bouleaux jaunes de qualité dans les bétulaies jaunes et les érablières à bouleau jaune (Boulet 2015). Dans ce contexte, il apparaît essentiel de déterminer quels scénarios sylvicoles permettent d'améliorer le recrutement du bouleau jaune et de favoriser le développement d'arbres de qualité, afin de maximiser la valeur du capital forestier dans les peuplements.

Des travaux antérieurs réalisés à la Station touristique Duchesnay ont démontré qu'une coupe totale pratiquée dans une érablière à bouleau jaune peut favoriser un retour accru du bouleau jaune lorsqu'elle est accompagnée d'une perturbation suffisante du sol (Robitaille *et al.* 1990). Ces travaux ont également confirmé que l'éclaircie précommerciale exerce un effet marqué sur la croissance en diamètre des gaules et permet d'assurer l'avantage du bouleau jaune sur les espèces concurrentes. Afin de favoriser la croissance des arbres de meilleure qualité et leur permettre d'atteindre plus rapidement le diamètre nécessaire à la production de bois d'œuvre de grande valeur, l'éclaircie commerciale (EC) apparaît comme un traitement approprié. Le fait que les peuplements à dominance de bouleau jaune sont généralement situés près des zones habitées et des usines de transformation facilite une sylviculture plus intensive, ce qui rend l'EC d'autant plus pertinente.

L'éclaircie commerciale est un type de coupe qui permet de récolter une partie des arbres d'un peuplement de structure équienne parvenu en période de prématurité afin d'en répartir le potentiel de croissance sur un nombre limité d'arbres (Lafliche *et al.* 2013). Dans les peuplements de feuillus, l'objectif principal à long terme est de favoriser l'accroissement des arbres de meilleure qualité afin qu'ils atteignent plus rapidement le diamètre à maturité (environ 45 cm; Guillemette 2016). Les effets de l'éclaircie sur la production peuvent varier selon le type d'éclaircie réalisée, l'âge du peuplement, sa densité, sa composition en essences et la qualité de la station (Smith *et al.* 1997). Dans les peuplements de feuillus âgés de 45 à 69 ans, il a été démontré que l'EC de type sélectif, soit celle visant à enlever les arbres de mauvaise qualité et ceux exerçant une

forte concurrence à proximité des arbres à conserver, peut favoriser l'accroissement net du peuplement en diminuant la mortalité et en favorisant la croissance en diamètre des arbres résiduels (Erdmann et Oberg 1973, Leak et Yamasaki 2012, Pothier 1996). En revanche, lorsque l'EC vise le prélèvement des arbres dominants (éclaircie par le haut), elle peut entraîner une diminution de l'accroissement net, alors que le prélèvement des arbres dominés (éclaircie par le bas) n'aura que peu d'effets sur l'accroissement net du peuplement (Marquis et Ernst 1991). Dans une note de recherche précédente, Bédard *et al.* (2018) ont analysé les mesures prises 5 ans après des éclaircies commerciales mécanisées réalisées dans de jeunes érablières âgées de 30 à 35 ans comportant une proportion notable de bouleau jaune (21,7 à 31,9 %). L'EC avait permis d'augmenter la surface terrière (ST) des arbres d'avenir ainsi que la production à l'échelle du peuplement avec un gain d'accroissement périodique net de l'ordre de 0,24 à 0,45 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup> comparativement aux témoins sans intervention. Cette augmentation était attribuable à la fois à l'effet positif de l'EC sur l'accroissement en diamètre des arbres et à une réduction de la mortalité.

Dans la présente note, nous avons voulu vérifier si ces conclusions pouvaient aussi s'appliquer à un peuplement dominé par le bouleau jaune. À notre connaissance, aucune étude réalisée au Québec n'a démontré les effets empiriques ou quantitatifs de l'EC mécanisé dans les bétulaies jaunes âgées d'environ 40 ans. Dans le but d'en évaluer les effets et d'en comprendre les modalités, un dispositif expérimental a été mis en place afin de tester les principales hypothèses suivantes : 1) l'EC favorise le maintien d'un peuplement vigoureux, et donc, une réduction de la mortalité et une augmentation de l'accroissement à l'échelle du peuplement par rapport à un témoin sans intervention; 2) l'EC permet d'augmenter l'accroissement des arbres par rapport à un témoin sans intervention; 3) l'accroissement des arbres augmente avec l'intensité de l'éclaircie; et 4) l'accroissement des arbres augmente en bordure des sentiers de récolte.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental se situe à la Station touristique Duchesnay, à environ 40 km au nord-ouest de la ville de Québec (lat. 46° 52' N., long. 71° 39' O.). Bien que situé en bordure de la limite septentrionale du sous-domaine bioclimatique de l'érablière à tilleul de l'Est, ce secteur est compris dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune de l'Est, dans la région écologique 4d – Hautes collines de Charlevoix et du Saguenay et la sous-région écologique 4d-M, soit la plus méridionale de cette région écologique (Saucier *et al.* 1998), dans laquelle les peuplements composés de sapin baumier (*Abies balsamea* L.) et de bouleau jaune sont fortement représentés. Toutefois, la région bénéficie d'un climat relativement clément; les pentes longues et régulières sont colonisées par des érablières, dans lesquelles les principales essences compagnes sont le bouleau jaune et le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.) (Blouin et Berger 2003). La température annuelle moyenne y est de 2,5 °C, et les précipitations annuelles moyennes y sont d'environ 1200 mm (Blouin et Berger 2003).

Le dispositif a été établi en 2012 dans une bétulaie jaune issue d'une coupe totale réalisée en 1971. La récolte, effectuée par troncs entiers, avait pour objectif de perturber le sol suffisamment pour favoriser le retour du bouleau jaune (scarifiage passif). Le peuplement étudié se situe sur un till de moyennement épais à épais (code 1AY, soit une classe modale entre 50 cm et 1 m d'épaisseur, et code 1A, soit une classe modale supérieure à 1 m d'épaisseur) présentant un drainage modéré (classe de drainage 30) et sur des pentes allant de faibles à modérées (classes de pente B, C et D, inclinaison de 4 à 30 %). Dans le passé, le site a déjà accueilli un dispositif expérimental établi pour suivre les effets d'une éclaircie précommerciale par puits de lumière réalisée en 1981 (Robitaille *et al.* 1990). Les traitements testés en 1981 étaient un témoin sans intervention, de même que le dégagement dans un rayon de 0,5 m, de 1,0 m ou de 1,5 m autour du tronc de 400 bouleaux jaunes à l'hectare. L'effet potentiel de cette ancienne expérience sur le présent dispositif a été isolé dans l'effet des blocs expérimentaux. Ainsi, tous les traitements d'un même bloc expérimental du dispositif de 2012 avaient reçu le même traitement d'éclaircie précommerciale en 1981.

Le dispositif actuel comporte 4 traitements répartis dans 28 unités expérimentales distribuées en 7 blocs

complets : 2 blocs étaient des témoins en 1981, tandis que les arbres de 3 blocs avaient été dégagés à l'époque sur un rayon de 0,5 m, et que 2 autres blocs l'avaient été sur un rayon de 1,0 m. Les unités expérimentales, de forme carrée ou rectangulaire, ont une superficie de 1000 m<sup>2</sup> (0,1 ha). Les traitements de 2012, attribués de manière aléatoire aux unités expérimentales de chaque bloc, se définissent ainsi : témoin sans intervention, éclaircie de forte intensité, éclaircie d'intensité modérée et éclaircie de faible intensité. L'éclaircie de forte intensité visait un prélèvement de 60 % de la ST marchande (ST résiduelle : 8,8 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>), alors que le prélèvement visé pour les EC d'intensité modérée et faible était respectivement de 45 % et 30 % (ST résiduelles : 12,5 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> et 15,4 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>). Ces cibles de ST pour l'EC forte et l'EC faible correspondent respectivement au seuil minimal de densité à maintenir dans un peuplement (communément appelée « ligne C ») et à la densité optimale pour favoriser la croissance de l'étage supérieur (« ligne B »), selon le diagramme de gestion de la densité de Leak *et al.* (2014). Le traitement d'intensité modérée correspond à une situation intermédiaire.

En plus de viser une ST résiduelle donnée, les EC ont pour objectif de réduire la compétition dans l'entourage immédiat des arbres d'avenir martelés positivement (rayon de 6 m) afin de favoriser leur vigueur et leur croissance. Ainsi, un martelage positif a été effectué sur l'ensemble du secteur avant la récolte, y compris dans les unités expérimentales du témoin. Les arbres à dégager ont été déterminés selon un espacement moyen de 8, 10 ou 14 m en fonction de l'intensité de l'EC et, conséquemment, de la ST résiduelle ciblée. Un espacement moyen de 10 m a été utilisé dans les placettes témoins à fins de comparaison. Ces espacements correspondent respectivement à des densités théoriques de 200, 130 et 70 arbres martelés à l'hectare, selon que l'intensité de l'EC prévue est forte, modérée ou faible. La densité des arbres martelés a été respectivement de 194, 144 et 64 arbres·ha<sup>-1</sup> pour l'éclaircie forte, modérée et faible, et de 129 arbres·ha<sup>-1</sup> pour le traitement témoin. Une même directive de récolte a été donnée pour les trois intensités d'EC; l'objectif était de créer des sentiers larges de 4,5 m et espacés de 20 m, puis de récolter entre les sentiers les deux plus gros concurrents de chaque arbre martelé positivement tout en protégeant au maximum les arbres martelés. Plus il y avait d'arbres martelés positivement, plus l'EC était forte et plus la ST résiduelle était faible. De plus, la récolte du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) a été priorisée de manière indirecte, puisque cette essence n'était pas identifiée comme étant d'avenir et que les



**Figure 1.** Équipements utilisés pour la récolte : a) abatteuse multifonctionnelle pour l'abattage; b) porteur forestier pour le débardage (Photos : F. Guillemette).

peupliers étaient souvent plus gros que les arbres d'avenir à dégager. En fin de compte, les sentiers ont atteint une largeur de 4,5 à 6 m, et leurs centres étaient espacés de 15 à 25 m selon les conditions du terrain. La récolte s'est faite selon le procédé par bois courts, soit un abattage réalisé par une abatteuse multifonctionnelle et un débardage des billes de 2,5 m de longueur par un porteur forestier (figure 1).

## 2.2. Prise de données

Pour tous les arbres d'un diamètre à hauteur de poitrine (DHP, à 1,3 m du niveau du sol) de 91 mm ou plus, les données suivantes ont été notées avant la coupe (été 2012), après la coupe (automne 2012) et 5 ans après la coupe (automne 2017) : l'essence, l'état (vivant, vivant martelé, mort, coupé, recrue), le DHP (au millimètre près, avec un ruban forestier), le code d'enselement, la position par rapport au centre de la placette (azimut et distance), la classe de vigueur selon Majcen *et al.* (1990), la priorité de récolte selon le système de classification MSCR (Boulet 2005) ainsi que la notion d'arbre d'avenir.

L'enselement a été mesuré conformément aux normes de la Direction des inventaires forestiers (MFFP 2019), soit par une méthode qui s'apparente à la *Kraft crown classification* décrite par Smith *et al.* (1997) et utilisée dans plusieurs études. Le code d'enselement est attribué à chaque arbre selon l'étage, mais également en fonction de la densité du couvert, des caractéristiques topographiques, de la porosité des houppiers ainsi que de la position relative des arbres par rapport à l'angle d'incidence des rayons solaires (MFFP 2019). Ce code varie de

1 à 4, selon les définitions suivantes : code 1) arbre très ensoleillé, dont le houppier est exposé au soleil à la fois sur le dessus et sur ses 4 faces; code 2) arbre moyennement ensoleillé, dont le houppier reçoit le rayonnement sur le dessus et sur une certaine portion de la partie latérale supérieure; code 3) arbre peu ensoleillé, dont le houppier ne reçoit qu'un peu de rayonnement direct sur le dessus; code 4) arbre non ensoleillé, dont le houppier ne reçoit pas de rayonnement solaire direct.

La classe de vigueur permet d'évaluer le risque de mortalité de l'arbre d'ici la prochaine intervention (15 à 25 ans), mais également son potentiel pour la production de bois d'œuvre (Fortin *et al.* 2008, 2009, Majcen *et al.* 1990). Essentiellement, la vigueur est évaluée à partir du houppier ainsi que des défauts et des blessures observés sur le tronc ou les racines. Ainsi, si plus du tiers du houppier présente du dépérissement ou un dommage, ou si l'on observe un signe ou un symptôme de carie sur le tronc, alors l'arbre est considéré comme non vigoureux. Autrement, l'arbre est considéré comme vigoureux. Par ailleurs, le potentiel du tronc pour la production de bois d'œuvre est évalué d'après la présence de défauts externes pouvant causer de la coloration et de la carie. On considère qu'un arbre possède un potentiel de bois d'œuvre s'il a au moins une section de 1,8 m de long sur le tronc principal avec au moins une face claire sans défauts et sans réduction associée à la carie. Les classes de vigueur sont ainsi définies pour les arbres feuillus : classe 1) arbre vigoureux avec potentiel de bois d'œuvre; classe 2) arbre vigoureux sans potentiel de bois d'œuvre; classe 3) arbre non vigoureux avec potentiel

de bois d'œuvre; classe 4) arbre non vigoureux sans potentiel de bois d'œuvre. Pour les arbres résineux, le potentiel de bois d'œuvre n'est pas évalué et les classes sont : 5) vigoureux et 6) non vigoureux.

La classification MSCR permet d'évaluer, à partir de l'observation de défauts pathologiques ou physiologiques, le risque que présente un arbre de dépérir ou de se dégrader dans le temps, ce qui permet de déterminer lesquels sont à récolter en priorité si l'on veut améliorer à long terme la vigueur d'un peuplement. La classe M indique un arbre voué à mourir dans moins de vingt ans. La classe S correspond à un arbre dont la survie n'est pas compromise pour la période de vingt ans à venir, mais qui présente un risque de dégradation. La classe C indique un arbre défectueux, mais dont le bois n'est pas atteint par la carie, alors que la classe R désigne les arbres sains et vigoureux à garder en réserve. À noter que nous avons regroupé les classes C et R dans le cadre de ce projet.

Finalement, un arbre était identifié comme arbre d'avenir s'il répondait à tous les critères suivants : essence désirée, vigoureux (classe 1 ou 5), code d'ensoleillement 1 ou 2, absence de fourche en forme de V, qualité potentielle du tronc équivalant à la classe A du MFFP (2014) et originant d'un semis ou d'un rejet bas (moins de 15 cm du sol). Les essences désirées étaient le bouleau jaune, le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marshall), l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marshall), l'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.) et l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss).

### 2.3. Traitement des données et analyses statistiques

Les données de ST ( $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) et de volume marchand brut (VMB, en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) ont été additionnées à l'échelle du peuplement selon les composantes suivantes de l'accroissement annuel périodique, comme l'ont proposé Erdmann et Oberg (1973) :

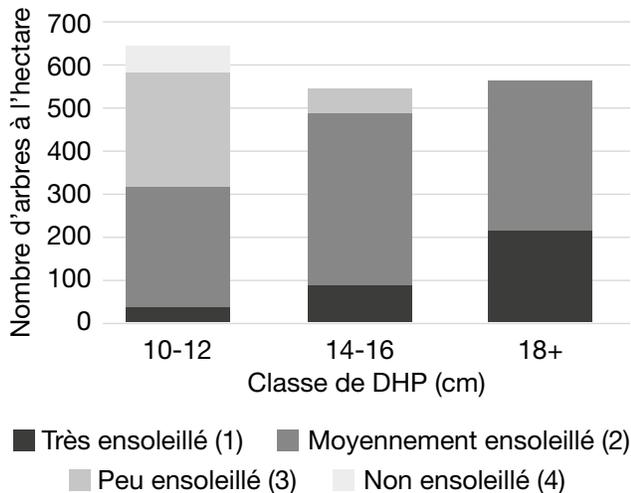
- **accroissement annuel périodique des survivants (AAS)** : les survivants sont les arbres vivants qui avaient un DHP de 9,1 cm et plus au moment de la mesure après coupe et qui étaient toujours vivants lors du suivi quinquennal;
- **accroissement annuel périodique des recrues (AAR)** : les recrues sont les arbres vivants qui avaient un DHP de moins de 9,1 cm au moment de la mesure après coupe et dont le DHP a atteint ou dépassé 9,1 cm au cours de la période quinquennale;

- **accroissement annuel périodique brut (AAB)** : somme de l'AAS et de l'AAR;
- **mortalité annuelle périodique (MAP)** : la mortalité est comptabilisée sur les arbres qui étaient vivants et qui avaient un DHP de 9,1 cm et plus au moment de la mesure après la coupe et qui sont morts au cours de la période quinquennale;
- **accroissement annuel périodique net (AAN)** : différence entre l'AAB et la MAP.

Les accroissements ont été calculés à partir des mesures de DHP. Le VMB a été calculé à partir des équations de Fortin et al. (2007) et les hauteurs à partir des relations hauteur-diamètre de Auger (2016), intégrées dans Artemis-2014 (Fortin et Langevin 2010, Power 2015), un modèle de croissance développé pour les forêts du Québec et basé sur une approche par arbre individuel. Ce dernier a été paramétré pour tenir compte de la région écologique dans laquelle se trouve le dispositif ainsi que des caractéristiques physiques du milieu.

Afin de vérifier l'existence d'un effet significatif du traitement ( $p < 0,05$ ), nous avons réalisé des analyses de variance à partir des composantes de l'accroissement annuel périodique en ST et en VMB à l'échelle du peuplement ainsi que celui en diamètre à l'échelle de l'arbre. Le traitement a été spécifié comme effet fixe. Le bloc a été considéré comme effet aléatoire dans le cas des analyses à l'échelle du peuplement, alors que pour les analyses à l'échelle de l'arbre, c'est plutôt l'unité expérimentale qui a été considérée comme effet aléatoire. Les analyses ont été effectuées avec le logiciel R, version 3.5.1 (R Core Team 2018) et les ensembles *lme4* (Bates et al. 2015) et *emmeans* (Lenth et al. 2018). La ST avant traitement a été testée comme covariable dans les analyses de variance afin de tenir compte des différences potentielles entre les unités expérimentales, mais elle ne s'est révélée significative dans aucun cas. Comme l'effet de bloc était significatif pour l'accroissement en DHP, nous avons vérifié la présence d'un effet associé à la position dans la pente, certains blocs étant positionnés en haut de pente et d'autres en bas de pente. Cependant, nous n'avons décelé aucune tendance en ce sens.

Nous avons réparti les arbres dans trois classes de DHP (10-12 cm, 14-16 cm, 18 cm et plus) afin de vérifier l'effet de l'EC sur l'accroissement des arbres. Ces classes ont été choisies de manière à constituer des groupes de taille similaire, mais avec différentes répartitions des arbres en fonction de l'ensoleillement (figure 2). Ainsi, les arbres de DHP de 10-12 cm sont



**Figure 2.** Répartition du nombre d'arbres à l'hectare selon la classe de DHP et le code d'ensoleillement.

généralement moyennement ensoleillés (code 2 : 44,1 %) ou peu ensoleillés (code 3 : 41,2 %). Les arbres de DHP de 14-16 cm sont en grande majorité moyennement ensoleillés (code 2 : 72,7 %), tandis que ceux de DHP de 18 cm et plus sont presque exclusivement moyennement ensoleillés (code 2 : 61,3 %) ou très ensoleillés (code 1 : 38,1 %).

Lorsqu'un effet significatif du traitement était détecté pour une composante de l'accroissement annuel périodique, nous avons effectué des comparaisons multiples afin de déterminer les paires présentant des différences significatives. Le seuil de signification pour les comparaisons multiples a été ajusté selon la méthode HSD (*honestly significant difference*) de Tukey. Les traitements étaient ainsi comparés par paires selon les 6 combinaisons suivantes, établies *a priori* :

- 1) EC forte par rapport au témoin;
- 2) EC modérée par rapport au témoin;
- 3) EC faible par rapport au témoin;
- 4) EC forte par rapport à l'EC modérée;
- 5) EC forte par rapport à l'EC faible;
- 6) EC modérée par rapport à l'EC faible.

Les postulats d'homogénéité de la variance et de normalité des résidus ont été vérifiés graphiquement. Une seule variable, l'AAR, a nécessité une transformation logarithmique. Pour celle-ci, nous avons réalisé l'analyse de variance ainsi que les comparaisons multiples à partir de la variable transformée, mais nous présentons les résultats à partir des données brutes comme pour toutes les autres variables.

Afin de prendre en considération l'existence potentielle d'un effet de lisière occasionné par la présence des sentiers de récolte, ceux-ci ont été géoréférencés et les arbres ont été classés selon leur distance par rapport au centre du sentier le plus près ( $\leq 5$  m ou  $> 5$  m). Une analyse supplémentaire a servi à vérifier l'existence d'un effet de la distance au sentier sur l'accroissement des arbres, ainsi que la présence d'une interaction entre les traitements et la distance, et ce, soit pour le bouleau jaune seul ou pour l'ensemble des arbres de même que pour deux classes de DHP (10-14 cm, 16 cm et plus). Ces seuils, différents de ceux utilisés précédemment, étaient requis afin de conserver un nombre minimal d'observations ( $n \geq 5$ ) dans chaque combinaison d'unité expérimentale, de distance et d'essence, et de répartir la population en deux groupes de DHP de taille similaire. Les unités expérimentales témoins n'ont pas été considérées dans cette partie de l'analyse, puisqu'aucun sentier n'y a été aménagé.

**Tableau 1.** Caractéristiques dendrométriques moyennes et composition en essences selon le traitement et le moment du mesurage : surface terrière (ST) marchande et densité du peuplement, densité des arbres martelés et des arbres d'avenir, diamètre à hauteur de poitrine quadratique (Dq), volume marchand brut (VMB) et abondance des essences.

Traitement*	Mesurage	ST (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Densité (arbres·ha <sup>-1</sup> )	Densité des arbres martelés (arbres·ha <sup>-1</sup> )	Arbres d'avenir		Dq (cm)	VMB (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Essence <sup>†</sup> (% de la ST)				
					Densité (arbres·ha <sup>-1</sup> )	% de la ST			BOJ	ERS	PET	AC	FNC
Témoin	Avant EC	21,2	1 077	129	93	11,3	16,6	116	57,2	3,2	21,1	9,9	8,7
	Après EC	21,2	1 077	129	93	11,3	16,6	117	57,2	3,2	21,1	9,9	8,7
	5 ans après EC	23,2	1 009	121	139	18,0	18,0	137	62,8	3,7	20,6	10,1	2,8
EC faible	Avant EC	22,0	1 104	64	111	13,4	16,6	123	63,7	4,9	16,5	8,1	6,7
	Après EC	14,4	713	64	86	17,3	16,8	76	68,9	5,4	12,0	9,3	4,3
	5 ans après EC	16,8	721	63	111	22,4	17,9	96	72,7	6,1	10,8	9,1	1,2
EC modérée	Avant EC	22,7	1 130	144	136	14,6	16,7	129	58,2	3,4	25,2	6,9	6,3
	Après EC	11,9	593	137	93	20,4	16,9	63	71,4	3,8	14,9	6,4	3,6
	5 ans après EC	14,6	653	109	111	24,4	17,7	81	77,3	4,7	11,0	5,6	1,4
EC forte	Avant EC	22,0	1 099	194	113	12,7	16,6	125	46,3	7,4	31,2	8,5	6,6
	Après EC	9,6	499	187	83	23,1	16,5	49	66,4	9,4	14,6	7,7	1,9
	5 ans après EC	12,3	557	179	91	25,9	17,5	67	70,1	10,5	10,3	8,5	0,6

\* EC = éclaircie commerciale.

† BOJ = bouleau jaune; ERS = érable à sucre; PET = peuplier faux-tremble; AC = autres essences commerciales : bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marshall), bouleau gris (*Betula populifolia* Marshall), érable rouge (*Acer rubrum* L.), hêtre à grandes feuilles, sapin baumier; FNC = Feuillus non commerciaux : cerisier de Pennsylvanie, érable à épis (*Acer spicatum* Lamb.), érable de Pennsylvanie (*Acer pensylvanicum* L.), sorbier d'Amérique (*Sorbus americana* Marshall).

### 3. Résultats

#### 3.1. Portrait avant et après la coupe

Avant la coupe, la ST marchande moyenne variait de 21,2 à 22,7 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> selon le traitement, alors que les valeurs de VMB s'étendaient de 116 à 129 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> (tableau 1). Les surfaces terrières moyennes prélevées ont été respectivement de 7,6 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>, 10,8 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> et 12,4 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> pour les EC d'intensité faible, modérée et forte. Ainsi, les surfaces terrières après éclaircie étaient respectivement de 14,4 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>, 11,9 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> et 9,6 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> pour ces trois mêmes intensités de prélèvement. Les valeurs correspondantes en VMB sont des prélèvements de 47, 66 et 76 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> et des volumes résiduels de 76, 63 et 49 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> pour les EC d'intensité faible, modérée et forte, respectivement. Dans les unités expérimentales du traitement d'éclaircie de faible intensité, la densité moyenne a été réduite de 35 % (de 1 104 à 713 arbres·ha<sup>-1</sup>), alors qu'elle a été réduite de 47 % pour l'éclaircie d'intensité modérée (de 1 130 à 593 arbres·ha<sup>-1</sup>) et de 55 % (de 1 099 à 499 arbres·ha<sup>-1</sup>) dans le cas de l'éclaircie de forte intensité. Les diamètres quadratiques sont semblables pour tous les traitements, avant ou après l'éclaircie, soit de 16,5 à 16,9 cm.

Avant l'intervention, le bouleau jaune représentait de 46,3 à 63,7 % de la ST marchande. Le peuplier faux-tremble était la seconde espèce en importance, représentant de 16,5 à 31,2 % de la ST (tableau 1). L'érable à sucre ainsi que quelques autres feuillus commerciaux étaient également présents dans une proportion notable. Les feuillus non commerciaux, représentés principalement par le cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pensylvanica* L. f.), ont été considérés dans les statistiques descriptives puisqu'ils occupaient de 6,3 à 8,7 % de la ST avant coupe. Leur proportion avait toutefois fortement diminué 5 ans après traitement (de 0,6 à 2,8 % de la ST), y compris dans le cas du témoin sans intervention. La proportion de la ST occupée par le peuplier faux-tremble a également fortement diminué à la suite de l'éclaircie, avec une réduction moyenne variant de 4,5 à 16,6 points de pourcentage, selon le traitement. La récolte de peuplier a été de 15 à 33 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> lors des éclaircies, ce qui constituait de 34 à 46 % du prélèvement, selon l'intensité de l'EC (données non présentées). L'abondance relative du peuplier a continué à diminuer dans les unités éclaircies au cours de la période quinquennale suivante, pour atteindre une proportion moyenne allant de 10,3 à 11 % de la ST marchande totale (tableau 1). Les

**Tableau 2.** Surface terrière (ST) marchande moyenne et sa répartition par classe de vigueur, en proportion de la ST et en valeur absolue, selon le traitement et le moment du mesurage.

Traitements*	Mesurage	ST (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Classe de vigueur <sup>†</sup>													
			FNC							Vigoureux						
			(%)							(m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )						
FNC	1	2	3	4	5	6	FNC	1	2	3	4	5	6			
Témoin	Avant EC	21,2	8,9	63,3	3,0	9,3	15,1	0,2	0,3	1,9	13,4	0,6	2,0	3,2	0,0	0,1
	Après EC	21,2	8,9	63,2	3,0	9,5	15,1	0,2	0,3	1,9	13,4	0,6	2,0	3,2	0,0	0,1
	5 ans après EC	23,2	2,9	64,6	3,7	10,4	18,2	0,0	0,2	0,7	14,9	0,9	2,4	4,2	0,0	0,1
EC faible	Avant EC	22,0	6,9	62,8	3,9	11,6	14,8	0,0	0,0	1,5	13,8	0,9	2,6	3,3	0,0	0,0
	Après EC	14,4	4,3	61,5	3,4	16,5	14,4	0,0	0,0	0,6	8,8	0,5	2,4	2,1	0,0	0,0
	5 ans après EC	16,8	1,4	57,4	3,4	19,5	18,4	0,0	0,0	0,2	9,6	0,6	3,3	3,1	0,0	0,0
EC modérée	Avant EC	22,7	5,5	63,6	7,4	10,4	12,8	0,4	0,0	1,2	14,5	1,7	2,4	2,9	0,1	0,0
	Après EC	11,9	3,1	65,5	4,3	16,2	10,2	0,7	0,0	0,4	7,8	0,5	1,9	1,2	0,1	0,0
	5 ans après EC	14,6	1,5	60,3	5,3	16,2	16,3	0,4	0,0	0,2	8,8	0,8	2,4	2,4	0,1	0,0
EC forte	Avant EC	22,0	6,3	68,3	5,3	9,4	10,7	0,0	0,0	1,4	15,0	1,2	2,1	2,4	0,0	0,0
	Après EC	9,6	1,7	68,1	4,9	14,1	11,2	0,0	0,0	0,2	6,5	0,5	1,4	1,1	0,0	0,0
	5 ans après EC	12,3	0,7	66,2	7,7	12,2	13,1	0,0	0,0	0,1	8,2	0,9	1,5	1,6	0,0	0,0

\* EC = éclaircie commerciale.

† FNC : feuillus non commerciaux (pas de classe de vigueur); 1 : vigoureux, avec potentiel de bois d'œuvre; 2 : vigoureux, sans potentiel de bois d'œuvre; 3 : non vigoureux, avec potentiel de bois d'œuvre; 4 : non vigoureux, sans potentiel de bois d'œuvre; 5 : vigoureux (essence résineuse); 6 : non vigoureux (essence résineuse).

traitements ont entraîné un accroissement immédiat de 5,2 à 20,1 points de pourcentage de la proportion de la ST occupée par le bouleau jaune, qui atteignait, en moyenne, de 66,4 à 71,4 % de la ST marchande totale après la coupe. Cinq ans plus tard, cette essence représentait de 70,1 à 77,3 % de la ST dans les unités éclaircies, mais seulement 62,8 % dans les unités témoins.

Selon le traitement, de 93 à 136 arbres·ha<sup>-1</sup> avaient été identifiés comme arbres d'avenir avant l'intervention, ce qui représentait de 11,3 à 14,6 % de la ST marchande totale (tableau 1). Ainsi, dans le cas de l'EC de faible intensité, le martelage positif (64 arbres·ha<sup>-1</sup>) était inférieur au nombre d'arbres d'avenir mesurés, alors qu'il était semblable dans l'EC modérée (144 arbres·ha<sup>-1</sup>) et nettement supérieur dans l'EC forte (194 arbres·ha<sup>-1</sup>). Après l'application des éclaircies, les unités expérimentales contenaient en moyenne de 83 à 93 arbres d'avenir à l'hectare (11,3 à 23,1 % de la ST) et 5 ans après le traitement, de 91 à 139 arbres d'avenir à l'hectare, soit de 18,0 à 25,9 % de la ST.

Avant les éclaircies, le peuplement comportait déjà une forte proportion d'arbres vigoureux et de qualité

(classe de vigueur 1), la ST qu'ils occupaient variant de 62,8 à 68,3 % de la ST marchande (tableau 2). Les traitements n'ont entraîné que de faibles variations de ces proportions. Toutefois, après 5 ans, la proportion moyenne de la ST occupée par les arbres de classe de vigueur 1 avait légèrement diminué dans le cas des EC (de -1,9 à -5,2 %), alors qu'elle avait augmenté pour le témoin (+1,4 %). En valeur absolue, la ST des arbres de la classe 1 s'est tout de même accrue pour l'ensemble des EC (+0,8 à +1,7 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>), ainsi que dans le cas du témoin sans intervention (+1,5 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>).

La classification des arbres selon le système MSCR permet de constater qu'avant traitement, la majorité des arbres ne présentaient pas de risque de dégradation pour les 20 prochaines années (de 72,3 à 80,2 % dans la classe CR, tableau 3). La proportion moyenne des arbres des classes C et R s'est légèrement accrue dans les EC, après la récolte réalisée à la suite d'un martelage positif. Toutefois, il est difficile de percevoir une tendance dans les 5 années suivant le traitement. En valeur absolue, la ST occupée par les arbres des priorités C et R s'est accrue de 1,5 à 2,4 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> selon l'intensité de l'EC au cours des 5 années suivant la récolte. Dans le cas

**Tableau 3.** Surface terrière marchande (ST) moyenne et sa répartition par classe de priorité de récolte, selon le traitement et le moment de mesurage.

Traitement*	Mesurage	ST (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Classe de priorité de récolte <sup>†</sup>							
			M (%)				S (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )			
			M	S	CR	FNC	M	S	CR	FNC
Témoin	Avant EC	21,2	12,7	5,3	73,1	8,9	2,7	1,1	15,5	1,9
	Après EC	21,2	12,9	5,3	72,9	8,9	2,7	1,1	15,5	1,9
	5 ans après EC	23,2	16,0	4,6	76,5	2,9	3,7	1,1	17,7	0,7
EC faible	Avant EC	22,0	15,1	5,7	72,3	6,9	3,3	1,3	15,9	1,5
	Après EC	14,4	14,2	6,4	75,1	4,3	2,0	0,9	10,8	0,6
	5 ans après EC	16,8	19,2	4,6	74,9	1,3	3,2	0,8	12,6	0,2
EC modérée	Avant EC	22,7	11,5	5,0	78,0	5,5	2,6	1,1	17,7	1,2
	Après EC	11,9	11,2	5,5	80,2	3,1	1,3	0,7	9,6	0,4
	5 ans après EC	14,6	18,0	4,3	76,1	1,6	2,6	0,6	11,1	0,2
EC forte	Avant EC	22,0	10,0	3,5	80,2	6,3	2,2	0,8	17,7	1,4
	Après EC	9,6	9,4	3,9	85,0	1,7	0,9	0,4	8,2	0,2
	5 ans après EC	12,3	9,7	3,3	86,2	0,7	1,2	0,4	10,6	0,1

\* EC = éclaircie commerciale.

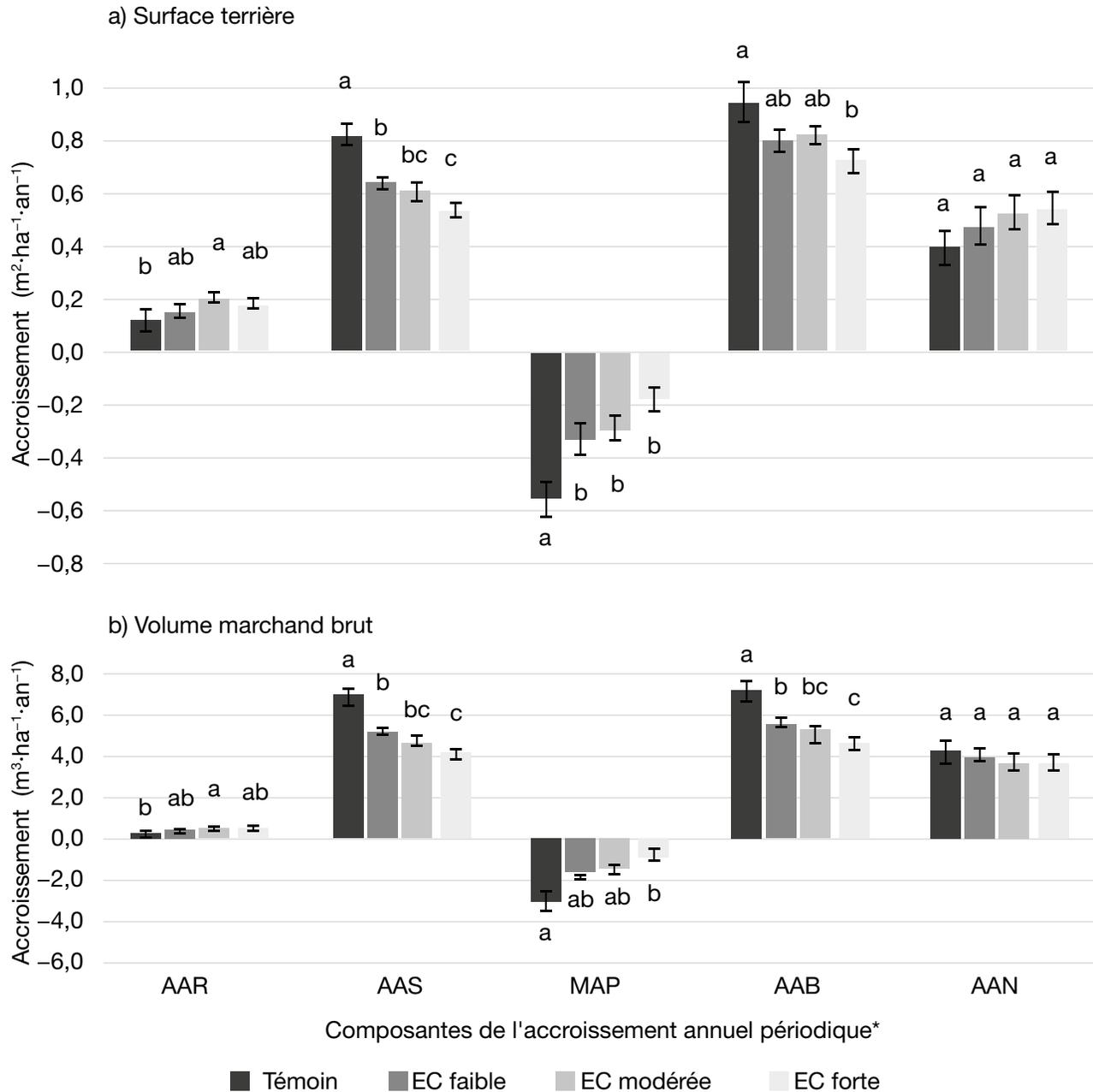
† M : arbre voué à mourir dans moins de vingt ans; S : arbre dont la survie n'est pas compromise pour les vingt prochaines années; CR : arbre défectueux, mais n'étant pas affecté par la carie ou arbre sains et vigoureux qui doivent être gardés en réserve; FNC : Feuillus non commerciaux.

**Tableau 4.** Résultat des analyses de variance de l'effet des traitements sur les composantes de l'accroissement annuel périodique quinquennal en surface terrière et en volume marchand brut. Les valeurs de  $p$  inférieures à 0,05, qui dénotent un effet significatif, apparaissent en caractères gras.

Mesure	Variable*	DL num. <sup>†</sup>	DL dén. <sup>†</sup>	Valeur de F	Valeur de $p$
Accroissements périodiques en surface terrière	AAN	3	18	2,19	0,125
	AAS	3	18	30,1	< 0,001
	AAR	3	18	3,47	0,038
	AAB	3	18	4,47	0,016
	MAP	3	18	7,24	0,002
Accroissements périodiques en volume marchand brut	AAN	3	18	0,36	0,780
	AAS	3	18	41,12	< 0,001
	AAR	3	18	3,79	0,029
	AAB	3	18	25,6	< 0,001
	MAP	3	18	5,63	0,007

\* AAN = accroissement net; AAB = accroissement brut; AAS = accroissement des survivants; AAR = accroissement des recrues; MAP = mortalité annuelle périodique.

† DL num. = degrés de liberté au numérateur; DL dén. = degrés de liberté au dénominateur.



\* AAN = accroissement annuel net; AAB = accroissement annuel brut; AAS = accroissement annuel des survivants; AAR = accroissement annuel des recrus; MAP = mortalité annuelle périodique. Les lettres différentes (a, b ou c) au-dessus ou en dessous des colonnes indiquent des différences significatives au seuil d'erreur  $p < 0,05$ .

**Figure 3.** Accroissement annuel périodique a) en surface terrière et b) en volume marchand brut pour la première période quinquennale après la coupe, selon le traitement. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur type.

du témoin, cette augmentation a atteint  $2,2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ . Pour l'ensemble des traitements à l'exception de l'EC forte, le pourcentage de la ST occupée par les arbres de priorité M a augmenté pendant la période de 5 ans suivant l'intervention.

## 3.2. Accroissement à l'échelle du peuplement

Les résultats des tests statistiques sur les composantes de l'accroissement étaient semblables entre les données de ST et celles de VMB (tableau 4 et figure 3). Conséquemment, seuls les résultats en ST sont présentés en détail, de même que les exceptions applicables au volume.

L'accroissement net a peu varié entre les traitements (de  $0,48$  à  $0,55 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  dans le cas des EC, et  $0,40 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  pour le témoin; figure 3a). Un examen des composantes de l'accroissement permet de mieux comprendre l'effet des traitements sur la dynamique de croissance dans les unités expérimentales, ces composantes exerçant des effets opposés. Ainsi, l'accroissement des survivants variait significativement en fonction du traitement ( $p < 0,001$ ; tableau 4) et était plus grand pour le témoin que les EC ( $p < 0,001$ ). Parmi les EC, l'accroissement des survivants était plus grand dans le traitement de faible intensité que dans celui de forte intensité ( $p = 0,033$ ). Le recrutement variait aussi en fonction du traitement ( $p = 0,038$ ), mais de manière opposée à celui de l'accroissement des survivants : il était plus grand dans toutes les EC que dans le témoin, bien que les comparaisons multiples aient révélé un écart significatif seulement entre l'EC modérée et le témoin ( $p = 0,033$ ). L'accroissement brut, soit la somme de l'accroissement des survivants et du recrutement, variait en fonction du traitement ( $p = 0,016$ ; tableau 4) et était significativement plus grand dans le témoin que dans l'EC forte ( $p = 0,005$ ), avec une différence de  $0,23 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  (figure 3a). Toutefois, l'accroissement brut en volume était significativement plus faible dans toutes les EC ( $p < 0,001$ ) que dans le témoin, et il était aussi plus faible dans l'EC forte que dans l'EC faible ( $p = 0,030$ ). Finalement, les pertes par mortalité variaient elles aussi en fonction du traitement ( $p = 0,002$ ; tableau 4). Elles étaient significativement plus fortes dans le témoin que dans les EC forte ( $p = 0,001$ ) et modérée ( $p = 0,023$ ), mais pas dans le cas de l'EC faible ( $p = 0,061$ ), quoiqu'il y ait eu une tendance en ce sens. Pour la mortalité exprimée sur la base du volume, seul le témoin avait une valeur significativement plus élevée que l'EC de forte intensité ( $p = 0,004$ ).

## 3.3. Accroissement des arbres

### 3.3.1 Ensemble des arbres

L'accroissement en DHP des arbres variait significativement selon l'interaction de leur classe de DHP et le traitement ( $p = 0,011$ ; tableau 5). Ainsi, l'accroissement des arbres était très significativement ( $p < 0,001$ ) différent entre les 3 classes de DHP pour tous les traitements, à l'exception des EC forte et faible, où la différence entre les classes de DHP de  $10-12 \text{ cm}$  et de  $14-16 \text{ cm}$  était près du seuil de signification ( $p = 0,051$  et  $0,047$ ). Il n'y avait pas d'effet significatif du traitement sur l'accroissement des arbres de DHP  $18 \text{ cm}$  et plus ( $p = 0,112$ ), lesquels avaient un accroissement moyen de  $4,8 \pm 0,1 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  (tableau 6). Quant aux arbres des classes de DHP de  $10-12 \text{ cm}$  et de  $14-16 \text{ cm}$ , les accroissements étaient significativement différents ( $p \leq 0,023$ ) entre le traitement d'éclaircie forte ( $3,8 \pm 0,2 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  et  $4,4 \pm 0,3 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$ , respectivement) et le témoin ( $1,9 \pm 0,1 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  et  $3,1 \pm 0,1 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$ ). Les résultats des tests statistiques spécifiques au bouleau jaune sont les mêmes que pour l'ensemble des essences et les accroissements sont présentés en détail au tableau 6.

Les résultats sont aussi présentés en accroissement du VMB de l'arbre afin de mieux montrer la contribution de l'accroissement des plus gros arbres à la productivité totale en volume du peuplement (tableau 6). Alors que le gain annuel moyen en volume, tous traitements confondus, était de  $4,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$  pour les arbres des classes de DHP de  $10-12 \text{ cm}$ , il s'élevait à  $7,3 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$  dans le cas des arbres de la classe de DHP de  $14-16 \text{ cm}$  et à  $14,8 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$  pour les arbres de la classe de DHP de  $18 \text{ cm}$  et plus. Ainsi, le rapport entre les accroissements de deux classes de DHP pour un même traitement est approximativement doublé lorsque celui-ci est calculé en volume plutôt qu'en diamètre. Par exemple, alors que dans un peuplement témoin, un bouleau jaune de DHP de la classe  $18 \text{ cm}$  et plus s'est accru 2,5 fois plus rapidement qu'un bouleau jaune de la classe  $10-12 \text{ cm}$  ( $5,0 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1} \div 2,0 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1} = 2,5$ ), le rapport équivalent en volume est de 5,1 ( $13,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1} \div 2,7 \text{ dm}^3 \cdot \text{an}^{-1} = 5,1$ ).

### 3.3.2 Arbres martelés

L'accroissement en DHP des arbres martelés positivement ( $4,6 \pm 0,2 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  à  $5,7 \pm 0,3 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  par traitement; tableau 6) était significativement plus grand que celui des arbres non martelés ( $2,9 \pm 0,1 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  à  $3,8 \pm 0,1 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  par traitement;

**Tableau 5.** Résultat des analyses de variance sur l'accroissement annuel périodique en diamètre à hauteur de poitrine (DHP). Les valeurs de *p* inférieures à 0,05, qui dénotent un effet significatif, apparaissent en caractères gras.

Analyse	Essence/Classe de DHP*	Effet <sup>†</sup>	DL num. <sup>‡</sup>	DL dén. <sup>‡</sup>	Valeur de F	Valeur de <i>p</i>
Globale	Toutes/Toutes	TRT	3	24,0	5,2	<b>0,006</b>
		C_DHP	2	1732,4	179,5	<b>&lt; 0,001</b>
		TRT × C_DHP	6	1734,5	2,8	<b>0,011</b>
	Toutes/10-12 cm	TRT	3	23,9	5,5	<b>0,005</b>
	Toutes/14-16 cm	TRT	3	24,0	3,5	<b>0,030</b>
	Toutes/18+ cm	TRT	3	24,3	2,2	0,112
	BOJ/10-12 cm	TRT	3	23,3	6,1	<b>0,003</b>
	BOJ/14-16 cm	TRT	3	24,0	3,5	<b>0,032</b>
	BOJ/18+ cm	TRT	3	23,6	1,2	0,325
	Effet de la distance au sentier	Toutes/10-14 cm	EC	2	17,9	2,0
DIST			1	583,7	60,7	<b>&lt; 0,001</b>
EC × DIST			2	583,7	2,2	0,109
Toutes/16+ cm		EC	2	18,1	2,2	0,145
		DIST	1	495,2	6,4	<b>0,012</b>
		EC × DIST	2	495,6	0,1	0,904
BOJ/10-14 cm		EC	2	17,6	1,8	0,197
		DIST	1	465,0	45,5	<b>&lt; 0,001</b>
		EC × DIST	2	465,4	1,7	0,191
		EC	2	18,0	1,9	0,175
BOJ/16+ cm	DIST	1	356,7	6,4	<b>0,012</b>	
	EC × DIST	2	356,7	0,6	0,547	

\* Toutes = toutes classes de DHP ou toutes essences confondues; BOJ = bouleau jaune.

† TRT = tous les traitements, y compris le témoin; C\_DHP = classe de DHP; EC = traitements d'éclaircie commerciale; DIST = distance par rapport au sentier dans les traitements d'EC.

‡ DL num. = degrés de liberté au numérateur; DL den. = degrés de liberté au dénominateur.

**Tableau 6.** Accroissement annuel périodique en diamètre et en volume marchand brut pour chaque traitement, selon l'essence et la classe de DHP.

Essence*	Classe de DHP	Accroissement annuel périodique en DHP, pour chaque traitement <sup>†</sup> (moyenne ± erreur type, en mm·an <sup>-1</sup> )				Accroissement annuel périodique en VMB, pour chaque traitement <sup>†</sup> (moyenne ± erreur type, en dm <sup>3</sup> ·an <sup>-1</sup> )			
		Témoin	EC faible	EC modérée	EC forte	Témoin	EC faible	EC modérée	EC forte
BOJ	10-12 cm	2,0 ± 0,1	3,2 ± 0,2	3,3 ± 0,2	4,2 ± 0,3	2,7 ± 0,2	4,2 ± 0,3	4,3 ± 0,3	5,6 ± 0,4
	14-16 cm	3,3 ± 0,1	4,0 ± 0,2	4,5 ± 0,2	4,8 ± 0,4	6,2 ± 0,3	7,5 ± 0,3	9,2 ± 0,8	8,9 ± 0,7
	18+ cm	5,0 ± 0,2	5,1 ± 0,2	5,5 ± 0,2	5,8 ± 0,2	13,9 ± 0,6	14,2 ± 0,7	14,9 ± 0,6	16,1 ± 0,7
Toutes	10-12 cm	1,9 ± 0,1	3,1 ± 0,2	3,2 ± 0,2	3,8 ± 0,2	2,6 ± 0,1	4,1 ± 0,2	4,1 ± 0,2	5,1 ± 0,3
	14-16 cm	3,1 ± 0,1	3,6 ± 0,2	4,2 ± 0,2	4,4 ± 0,3	6,1 ± 0,3	6,9 ± 0,3	8,2 ± 0,4	8,1 ± 0,6
	18+ cm	4,4 ± 0,2	4,8 ± 0,2	5,2 ± 0,2	5,4 ± 0,2	13,7 ± 0,5	14,7 ± 0,6	15,3 ± 0,7	15,6 ± 0,7
Martelés	Toutes	3,1 ± 0,1	3,8 ± 0,1	4,2 ± 0,1	4,5 ± 0,1	7,4 ± 0,3	8,3 ± 0,3	9,0 ± 0,4	9,2 ± 0,4
	Toutes	4,6 ± 0,2	5,7 ± 0,3	5,3 ± 0,2	5,6 ± 0,2	11,8 ± 0,8	14,7 ± 0,9	12,8 ± 0,7	12,7 ± 0,6
Non martelés	Toutes	2,9 ± 0,1	3,4 ± 0,1	3,8 ± 0,1	3,6 ± 0,2	6,6 ± 0,3	7,6 ± 0,3	7,7 ± 0,4	6,8 ± 0,4

\* Toutes = toutes essences confondues; BOJ = bouleau jaune.

† EC = éclaircie commerciale.

**Tableau 7.** Accroissement annuel périodique (AAP) en diamètre (DHP) et en surface terrière (ST), par essence et classe de DHP, selon la distance par rapport aux sentiers de récolte.

Essence*	Classe de DHP	Distance de l'arbre par rapport au centre du sentier	n <sup>†</sup>	AAP en DHP (moyenne ± erreur type, en mm·an <sup>-1</sup> )	AAP en ST (moyenne ± erreur type, en cm <sup>2</sup> ·an <sup>-1</sup> )
Toutes	10-14 cm	> 5 m	378	3,0 ± 0,1	6,1 ± 0,2
		≤ 5 m	221	4,4 ± 0,2	9,3 ± 0,4
	16+ cm	> 5 m	302	4,6 ± 0,1	15,0 ± 0,5
		≤ 5 m	209	5,1 ± 0,1	17,2 ± 0,6
	Toutes	> 5 m	680	3,7 ± 0,1	10,1 ± 0,3
		≤ 5 m	430	4,7 ± 0,1	13,2 ± 0,4
BOJ	10-14 cm	> 5 m	291	3,2 ± 0,1	6,5 ± 0,2
		≤ 5 m	186	4,5 ± 0,2	9,7 ± 0,4
	16+ cm	> 5 m	214	4,8 ± 0,1	15,7 ± 0,5
		≤ 5 m	160	5,5 ± 0,2	18,0 ± 0,6

\* Toutes = toutes essences confondues; BOJ = bouleau jaune.

† n = nombre d'arbres considérés dans l'analyse.

tableau 6), et ce, pour toutes les intensités d'EC ainsi que pour le témoin ( $p < 0,001$ ). Il n'y avait pas de différence significative entre les traitements. L'accroissement des arbres était plus grand dans les EC que dans le témoin, mais l'écart n'était pas significatif.

### 3.3.3 Arbres en bordure des sentiers

L'accroissement des arbres situés à moins de 5 m du centre d'un sentier était significativement différent de celui des arbres situés à 5 m ou plus, et ce, autant pour le bouleau jaune que pour toutes les essences regroupées, les deux classes de DHP et toutes les intensités d'EC ( $p \leq 0,012$ ; tableau 5). Toutes essences confondues, cet écart d'accroissement s'élève à 1,4 mm pour les arbres de la classe de DHP de 10-14 cm, et à 0,5 mm pour les arbres de DHP de 16 cm et plus (tableau 7). Pour le bouleau jaune, les écarts d'accroissement sont similaires, soit un écart de 1,3 mm pour la classe 10-14 cm et de 0,7 mm pour la classe de 16 cm et plus.

## 4. Discussion

### 4.1. Effet à l'échelle du peuplement

Les EC réalisées à la suite d'un martelage positif ont permis d'accroître la proportion de la ST occupée par les essences désirées, principalement le bouleau jaune, au détriment du peuplier faux-tremble et des feuillus non commerciaux. La proportion de la ST représentée par les arbres classés de vigueur 1 a légèrement diminué dans les unités éclaircies au cours de la période de 5 ans, tandis qu'elle a augmenté dans les unités témoins. Les unités traitées se sont légèrement dégradées après l'éclaircie, possiblement à cause de l'affaiblissement de certains arbres blessés lors de la coupe. L'augmentation de la vigueur des arbres dans les unités témoins est principalement attribuable à la mort d'arbres feuillus d'espèces non commerciales qui étaient exclus du classement de la vigueur. Néanmoins, la proportion de la ST occupée par les arbres d'avenir dans tous les traitements a augmenté légèrement dans les 5 ans suivant le traitement, ce qui, pour le rendement à long terme, pourrait être plus important que la diminution de la proportion d'arbres vigoureux. Après 5 ans, la plus grande proportion d'arbres d'avenir a été observée dans l'EC forte. Les améliorations constatées dans la qualité du peuplement sont cohérentes avec les conclusions formulées par Roberge (1975) et Bédard et al. (2018) à la suite d'EC réalisées en Estrie dans des peuplements à dominance d'érable à sucre.

L'accroissement net constaté dans les EC n'était pas significativement différent de celui mesuré dans le témoin. Malgré une réduction significative de la mortalité dans les traitements d'EC forte et modérée et une augmentation du recrutement dans l'EC modérée, la diminution importante de l'accroissement des survivants à la suite des éclaircies, comparativement au témoin, a limité l'accroissement net des unités éclaircies. La première hypothèse émise dans le cadre de cette étude, soit celle d'un gain de production nette découlant d'une éclaircie, ne peut donc être confirmée. Ces résultats contrastent avec les conclusions des travaux cités en introduction qui avaient démontré une augmentation significative de l'accroissement net à la suite des EC (Erdmann et Oberg 1973, Leak et Yamasaki 2012, Pothier 1996). Notre dispositif se distingue des autres par l'âge, le site, l'emplacement géographique et la composition en essences. Le site étudié par Bédard *et al.* (2018) comportait quant à lui une proportion notable de la ST en bouleaux jaunes (de 21,7 à 31,7 %). On y avait mesuré sur 5 ans un accroissement net variant de 0,63 à 0,71 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup> selon l'intensité de l'EC, soit des valeurs supérieures à celles observées ici (0,48 à 0,55 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>). Dans l'étude de Bédard *et al.* (2018), l'accroissement net chez le témoin était pourtant de 0,39 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>, soit pratiquement la même valeur que dans le présent dispositif (0,40 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>; figure 3a). Cependant, dans notre dispositif, la réduction de l'accroissement des survivants consécutive aux EC a été plus importante que dans l'étude de Bédard *et al.* (2018), et la diminution de la mortalité consécutive aux traitements a été moindre. Cette différence dans l'accroissement des survivants pourrait s'expliquer par la récolte de peupliers situés en position dominante du couvert et dont l'accroissement en DHP est grand à cet âge. Marquis et Ernst (1991) ont observé que le prélèvement des arbres dominants pouvait entraîner une réduction de l'accroissement net dans le peuplement. Seules les valeurs de recrutement étaient plus élevées dans notre dispositif que dans celui de Bédard *et al.* (2018). Cet écart pourrait s'expliquer par une meilleure disponibilité de la lumière en sous-étage, en raison de différences dans la composition en essences. La quantité de lumière qui atteint les étages inférieurs est généralement moindre dans les peuplements dominés par des essences plus tolérantes à l'ombre que dans ceux composés d'essences moins tolérantes. En effet, le houppier d'un érable à sucre intercepte une proportion plus grande du rayonnement incident que celui d'un bouleau jaune (Lefrançois *et al.* 2008, Messier et Bellefleur 1988). Les valeurs d'accroissement net que nous avons obtenues demeurent plus grandes que

celles constatées par Pothier (1996) sur une période de 20 ans dans une érablière du même secteur. Entre autres, un accroissement net de 0,05 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup> y avait été mesuré dans le témoin sans intervention. Les peuplements étaient toutefois âgés de 50 ans, et la ST et le DHP moyen y étaient plus grands.

## 4.2. Effet à l'échelle de l'arbre

Un effet significatif du traitement sur l'accroissement moyen en DHP des arbres résiduels a été constaté seulement dans le cas de l'EC forte et pour les arbres d'un DHP de 9,1 à 17,0 cm. Notre deuxième hypothèse s'avère donc confirmée seulement dans ces conditions précises. Ces résultats confirment que le bouleau jaune peut réagir à l'EC si l'ouverture est suffisante. Une réaction du bouleau jaune à l'éclaircie avait déjà été constatée dans le nord du Michigan par Erdmann et Peterson (1972), au cours des trois années suivant le traitement. Leur dispositif était implanté dans un peuplement de structure équiennne âgé de 40 ans à dominance de bouleau jaune. La densité, la ST et le DHP moyen avant traitement y étaient comparables à ce que nous avons mesuré. Le plus grand accroissement en DHP y avait été observé après le dégagement de plus forte intensité, soit l'abattage de tous les concurrents dont le houppier se trouvait à moins de 4,5 m de celui de l'arbre sélectionné. Le gain en croissance y était proportionnel à l'intensité du prélèvement comme nous l'avons observé aussi, même si dans notre cas, les écarts entre les trois intensités n'étaient pas significatifs. Par contre, l'accroissement maximal mesuré par Erdmann et Peterson (1972) atteignait près de 8 mm au cours d'une seule année, ce qui est supérieur à la valeur maximale de 5,7 mm·an<sup>-1</sup> que nous avons obtenue. Dans notre dispositif, bien que les données révèlent une tendance en ce sens, il nous est donc impossible de confirmer la troisième hypothèse, soit celle voulant que l'accroissement augmente avec l'intensité de l'éclaircie. C'est peut-être en raison du fait que la méthode de dégagement était la même pour toutes les EC, qui consistait à récolter les deux plus gros compétiteurs de l'arbre martelé positivement. Ainsi, l'augmentation de l'intensité de l'EC provenait davantage d'une augmentation du nombre d'arbres dégagés que du dégagement accru de certains arbres. Néanmoins, les arbres semblaient plus espacés dans l'EC forte (figure 4). Cet aspect devra être analysé plus en profondeur à la suite du mesurage prévu 10 ans après l'EC. Il aurait été intéressant de tester l'effet de plusieurs intensités de dégagement autour des arbres d'avenir. Toutefois, la contrainte de récolte opérationnelle et d'abattage mécanisé nous en a empêché. En effet, il est difficile



**Figure 4.** Photos prises dans chaque traitement, 5 ans après l'éclaircie : a) témoin sans intervention; b) éclaircie faible; c) éclaircie modérée; d) éclaircie forte (photos : F. Guillemette).

d'abattre des arbres situés de l'autre côté de l'arbre à dégager (par rapport à l'abatteuse) sans risquer d'occasionner des dommages importants aux arbres adjacents.

Nous dressons un constat semblable à celui de Erdmann et Peterson (1972), comme quoi la réaction à l'éclaircie est plus importante chez les arbres intermédiaires que codominants et dominants. En effet, les gains de croissance mesurés dans les EC par rapport au témoin étaient substantiellement plus faibles chez les arbres de DHP de 18 cm et plus, de même que chez les arbres martelés positivement, que chez les arbres des plus petites classes de DHP. De plus, les différences avec le témoin n'étaient pas statistiquement significatives pour ces plus grands arbres. Cet écart pourrait s'expliquer soit par la

nature de la concurrence subie, soit par la capacité de réaction des arbres dégagés. Premièrement, il est possible qu'avant traitement, les plus gros arbres, généralement en position dominante ou codominante, aient encore eu un accès suffisant à la lumière et qu'ils n'aient subi qu'une concurrence limitée. D'ailleurs, ces compétiteurs étaient principalement des arbres d'essences peu tolérantes à l'ombre, lesquelles laissent passer une plus grande partie de la lumière, que les essences plus tolérantes à l'ombre. L'élimination d'arbres voisins n'aurait donc eu qu'un effet limité. Comme l'ont suggéré Zarnovican et Trencia (1987), ces arbres se seraient vraisemblablement différenciés dès le début de la succession et maintiendraient leur croissance depuis. Par contraste, leurs voisins, parfois opprimés et qui tendaient à sacrifier la croissance en diamètre

pour tenter de maintenir leur croissance en hauteur, ont pu allouer plus de ressources à la croissance diamétrale après avoir bénéficié du dégagement entraîné par l'EC. Deuxièmement, il est possible qu'à 41 ans, la capacité des bouleaux jaunes dominants et codominants à réagir promptement à l'éclaircie n'ait pas été aussi forte que souhaitée. En effet, bien que de fortes réactions à l'éclaircie aient été observées à 16, 35 et 40 ans (Erdmann et Peterson 1972, Erdmann *et al.* 1975a, Ouimet *et al.* 2018), la réaction a été plutôt minimale à 65 ans (Erdmann *et al.* 1975b). Ainsi, le bouleau jaune pourrait perdre sa capacité à réagir promptement à l'éclaircie entre 40 et 65 ans. De plus, contrairement aux études dont G.G. Erdmann est le premier auteur, nous avons étudié les effets d'une éclaircie commerciale, c'est-à-dire que les bois abattus ont été récoltés avec de la machinerie. Ainsi, le dégagement des arbres sélectionnés n'était pas complet, et la machinerie a circulé en octobre sur les racines des arbres. Or, ces passages pourraient avoir nui à la croissance racinaire des arbres affectés (Malo et Messier 2011), de même qu'à leur capacité à accroître leur DHP. Dans le site étudié par Ouimet *et al.* (2018), la récolte a été effectuée en hiver; le couvert de neige pourrait alors avoir protégé les racines des passages de la machinerie.

Néanmoins, nos résultats ont permis de confirmer que, malgré une réaction moindre des arbres de plus forts diamètres à l'EC, ceux-ci ont tout de même contribué le plus à la croissance à l'échelle du peuplement, tant en diamètre qu'en volume. D'autres auteurs ont fait des observations similaires (Bédard *et al.* 2018, Erdmann et Peterson 1972). Ce constat s'appliquerait également aux peuplements beaucoup plus jeunes, comme en témoignent les résultats de travaux réalisés sur l'éclaircie précommerciale (EPC) dans des peuplements de feuillus nordiques de 7 à 25 ans aux États-Unis. Même si, en valeur absolue, la croissance des arbres dominants est plus grande que celle des arbres des étages inférieurs, le gain de croissance en pourcentage suit généralement une tendance inverse (Marquis 1969, Miller 2000, Ward 1995).

L'effet significatif constaté pour les arbres de plus petits diamètres serait donc attribuable au fait que la diminution de la compétition entraîne un meilleur accès à la lumière. Cet effet est particulièrement visible chez les arbres situés à proximité d'un sentier, ce qui confirme la quatrième hypothèse émise dans le cadre de cette étude. Conformément aux conclusions de Bédard *et al.* (2018), la différence significative observée entre l'accroissement des arbres situés à moins de 5 m du centre d'un sentier et ceux

situés plus loin serait entièrement attribuable à ce dégagement. L'effet observé s'est révélé significatif pour toutes les classes de DHP, ce qui n'était pas le cas pour le dispositif de Bédard *et al.* (2018), dans lequel l'effet n'avait été constaté que sur les plus petits arbres. Néanmoins, nous avons observé un gain d'accroissement moins grand chez les plus gros arbres, ce qui confirme l'influence de l'étage occupé avant le traitement. Par ailleurs, un gain de croissance en DHP pourrait être observé en raison de la rétention, lors de l'éclaircie, des arbres les plus vigoureux, dont l'accroissement est supérieur. Cette hypothèse est appuyée par le fait que l'accroissement des arbres martelés positivement était significativement plus grand que celui des arbres non martelés, et ce, même pour les témoins. Dans le cas présent, l'EC réalisée à la suite d'un martelage positif a donc permis de conserver les arbres avec un potentiel de croissance supérieur.

L'éclaircie n'ayant été pratiquée que depuis 5 ans, les prochains suivis seront cruciaux pour mesurer l'ampleur de l'effet des EC puisque les bénéfices les plus marqués pourraient se manifester seulement au cours des prochaines années. Le dégagement pourrait permettre aux arbres martelés positivement de développer leur houppier, notamment en densité. En effet, Erdmann et Peterson (1972) avaient observé une augmentation de la densité du houppier chez une proportion notable des bouleaux jaunes dégagés dans la période de 3 ans suivant une éclaircie commerciale, ce qui s'était traduit par des gains en DHP. Bien que l'évolution de la densité des houppiers n'ait pas été documentée dans le cadre de cette note, l'augmentation de la capacité photosynthétique de ces arbres pourrait leur permettre de maintenir leur croissance pendant une plus longue période qu'en l'absence de traitement, ce qui éviterait ainsi un déclin au cours des prochaines années. Les effets à plus long terme sur le recrutement seront aussi à surveiller. En effet, Pothier (1996) avait constaté qu'un impact visible de l'EC sur le nombre de gaules à l'hectare se manifestait seulement après 5 ans, ce qui pourrait éventuellement affecter l'accroissement net dans notre étude.

### 4.3. Implications pour l'aménagement

Dans un scénario de sylviculture intensive, l'éclaircie commerciale est normalement réalisée après une éclaircie précommerciale. Sur la base de ces résultats à court terme (5 ans) et de la littérature scientifique consultée, il semble que l'éclaircie précommerciale soit celle qui permette la plus forte réaction de croissance en DHP des bouleaux jaunes

dominants dans les jeunes peuplements de structure équiennne. Celle-ci permet d'intervenir entre 15 et 35 ans (voir Tremblay *et al.* 2013), c'est-à-dire à un âge où les arbres peuvent réagir promptement et sont plus faciles à dégager sur tout leur pourtour par une opération manuelle. Toutefois, il n'est pas certain que l'éclaircie précommerciale soit rentable à terme, puisque ce traitement implique des coûts, sans générer de revenu par la vente de bois (Sendak et Leak 2008). Pour l'EC réalisée plus tard dans le scénario, les bénéfices de croissance du peuplement et des arbres d'avenir semblent plus variables, et dépendent de la composition et de l'âge du peuplement. Dans la bétulaie jaune à l'étude, les bouleaux jaunes d'avenir semblaient peu souffrir de la concurrence des espèces intolérantes ou peu tolérantes à l'ombre. De plus, l'utilisation d'une abatteuse permettait difficilement de dégager complètement les houppiers des arbres sélectionnés. Conséquemment, la réaction de croissance a été modeste, particulièrement dans les EC d'intensité faible ou modérée. Par comparaison, la réaction à l'EC a été plus forte dans un peuplement dominé par des espèces plus tolérantes à l'ombre (Bédard *et al.* 2018). Néanmoins, les résultats obtenus ne constituent pas une contre-indication à la pratique de l'EC dans une bétulaie jaune de 40 ans. L'intervention doit surtout viser à améliorer l'importance relative des arbres d'avenir dans le peuplement, car il ne faut pas s'attendre à obtenir de fortes réactions de croissance. Il aurait été possible d'attendre quelques années avant de pratiquer l'EC de manière à obtenir un plus grand diamètre moyen de récolte, et ainsi un meilleur revenu. Toutefois, le risque d'obtenir une réaction de croissance encore plus faible semble augmenter avec l'âge du peuplement. La poursuite de l'étude permettra de vérifier comment évoluent les bénéfices de l'EC dans le temps.

## 5. Conclusion

Nous avons testé 3 intensités d'éclaircie commerciale à Duchesnay dans une bétulaie jaune âgée de 41 ans. Les résultats après 5 ans ont montré que ces éclaircies (récolte de 47 à 76 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>) ont surtout permis d'améliorer la composition du peuplement en bouleau jaune et en arbres d'avenir à la suite de la récolte prioritaire des peupliers et d'espèces peu désirées. Les éclaircies n'ont donné lieu qu'à de faibles gains de croissance par rapport à un témoin sans intervention. En effet, l'accroissement des témoins était encore très bon (4,2 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>; figure 3b), en particulier pour les arbres de plus gros diamètre et ceux d'avenir. L'EC aurait pu être retardée de quelques années sans compromettre la qualité et la vigueur du peuplement, mais avec le risque d'obtenir une réaction de croissance encore plus faible que celle observée. Les arbres de plus petit diamètre situés en bordure des sentiers sont ceux dont la croissance a le mieux réagi après les éclaircies. Le suivi du dispositif au cours des prochaines années devrait permettre de vérifier si ces effets se poursuivront, et particulièrement, si le dégagement favorisera l'accroissement des arbres d'avenir en position dominante.

## Remerciements

Nous tenons à remercier l'équipe technique de la Direction de la recherche forestière, composée de Pierre Laurent, Jocelyn Hamel, Jean-François Leblond, William Michaud, Sabrina Fecteau et Carlo Gros-Louis pour l'établissement et le mesurage du dispositif. De plus, nous remercions la SÉPAQ Station touristique Duchesnay et la compagnie Domtar pour leur collaboration à la réalisation de la récolte. Nous remercions aussi Marie-Claude Lambert pour son aide lors des analyses statistiques, Isabelle Auger pour son aide avec l'utilisation du modèle de croissance Artemis-2014 et Christian Godbout pour ses commentaires sur une version préliminaire du manuscrit. Nous tenons également à remercier Jean Noël et Véronique Poirier pour le traitement des données géomatiques. Finalement, nous remercions Marcel Prévost pour son travail comme responsable de la révision scientifique, les deux réviseurs anonymes qui ont commenté le manuscrit, de même que Claude-Andrée Berthiaume, Alexandre Dallaire-Théroux, Nathalie Langlois, Maripierre Jalbert et Denise Tousignant pour l'édition et la mise en page de ce document. Ce projet a été financé par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, dans le cadre du projet n° 142332023.

## Références bibliographiques

- Auger, I., 2016. *Une nouvelle relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 27 essences commerciales du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 146. 32 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Note146.pdf>
- Bates, D., M. Mäechler, B. Bolker et S. Walker, 2015. *Fitting linear mixed-effects models using lme4*. J. Stat. Softw. 67(1): 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bédard, S., M.M. Gauthier, F. Guillemette et R. Ouimet, 2018. *Effets après 5 ans de l'éclaircie commerciale et de l'amendement du sol sur la production de jeunes érablières en Estrie*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 149. 18 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Note149.pdf>
- Blouin, J. et J.-P. Berger, 2003. *Guide de reconnaissance des types écologiques des régions écologiques 4d — Hautes collines de Charlevoix et du Saguenay et 4e — Plaine du lac Saint-Jean et du Saguenay*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers, Division de la classification écologique et productivité des stations. 202 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/guide-ecologique-4de.pdf>
- Boulet, B., 2005. *Défauts et indices de la carie des arbres : guide d'interprétation*. Les Publications du Québec, Sainte-Foy, Québec. 291 p.
- Boulet, B., 2015. *Le portrait de la forêt feuillue et mixte à feuillus durs au Québec : survol historique*. Bureau du forestier en chef. Document d'information. 87 p. [https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2015/02/Portrait-de-la-foret-feuillue\\_Boulet\\_Bilan1.pdf](https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2015/02/Portrait-de-la-foret-feuillue_Boulet_Bilan1.pdf)
- [CRIQ] Centre de recherche industrielle du Québec, 2002. *Profil des produits forestiers première transformation : bois de sciage de feuillus durs*. Rapport présenté au ministère des Ressources Naturelles par le Centre de recherche industrielle du Québec. 63 p. [https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/bois\\_sciage\\_feuillus\\_durs.pdf](https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/bois_sciage_feuillus_durs.pdf)
- Erdmann, G.G. et R.R. Oberg, 1973. *Fifteen-year results from six cutting methods in second-growth northern hardwoods*. U.S.D.A. Forest Service, North Central Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Research Paper NC-100. 15 p. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/10621>
- Erdmann, G.G. et R.M.J. Peterson, 1972. *Crown release increases diameter growth and bole sprouting of pole-size yellow birch*. U.S.D.A. Forest Service, North Central Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Research Note NC-130. 4 p. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/11308>
- Erdmann, G.G., R.M. Godman et R.R. Oberg, 1975a. *Crown release accelerates diameter growth and crown development of yellow birch saplings*. U.S.D.A., Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Research Paper NC-117 11 p. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/10638>
- Erdmann, G.G., Godman, R.M. et G.A. Mattson, 1975b. *Effects of crown release and fertilizer on small saw log-sized yellow birch*. U.S.D.A., Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Research Paper NC-119. 11 p. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/10640>
- Fortin, M. et L. Langevin, 2010. *ARTÉMIS-2009 : un modèle de croissance basé sur une approche par tiges individuelles pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 156. 68 p. <http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire156.pdf>
- Fortin, M., F. Guillemette et S. Bédard, 2009. *Predicting volumes by log grades in standing sugar maple and yellow birch trees in southern Quebec, Canada*. Can. J. For. Res. 39(10): 1928-1938. <https://doi.org/10.1139/X09-108>
- Fortin, M., J. DeBlois, S. Bernier et G. Blais, 2007. *Mise au point d'un tarif de cubage général pour les forêts québécoises : une approche pour mieux évaluer l'incertitude associée aux prévisions*. For. Chron. 83(5): 754-765. <https://doi.org/10.5558/tfc83754-5>
- Fortin, M., S. Bédard, J. DeBlois et S. Meunier, 2008. *Predicting individual tree mortality in northern hardwood stands under uneven-aged management in southern Quebec, Canada*. Ann. For. Sci. 65(2): 205. <https://doi.org/10.1051/forest:2007088>

- Guillemette, F., 2016. *Diamètres à maturité pour l'érablé à sucre et le bouleau jaune au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 145. 16 p. <http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Guillemette-Francois/Note145.pdf>
- Lafèche, V., C. Larouche et F. Guillemette, 2013. «Chapitre 15 — L'éclaircie commerciale.» Dans : Ministère des Ressources naturelles (éd.). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 — Les concepts et l'application de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. Les Publications du Québec. Québec, QC. p. 300-327.
- Leak, W.B. et M. Yamasaki, 2012. *80 Years of thinning research on northern hardwoods in the Bartlett Experimental Forest*, New Hampshire. U.S.D.A. Forest Service, Northern Research Station. Newtown Square, PA (États-Unis). Research Paper n° NRS-20. 8 p. <https://doi.org/10.2737/NRS-RP-20>
- Leak, W.B., M. Yamasaki et R. Holleran, 2014. *Silvicultural guide for northern hardwoods in the northeast*. U.S.D.A. Forest Service, Northern Research Station. Newtown Square, PA (États-Unis). General Technical Report n° NRS-132. 46 p. <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-132>
- Lefrançois, M.-L., M. Beaudet et C. Messier, 2008. *Crown openness as influenced by tree and site characteristics for yellow birch, sugar maple, and eastern hemlock*. Can. J. For. Res. 38(3): 488-497. <https://doi.org/10.1139/X07-177>
- Lenth, R., H. Singmann, J. Love, P. Buerkner et M. Herve, 2018. *Emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means*. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans> (consulté en décembre 2018).
- Majcen, Z., Y. Richard, M. Ménard et Y. Grenier, 1990. *Choix des tiges à marquer pour le jardinage d'érablières inéquiennes. Guide technique*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction de la recherche et du développement. Mémoire de recherche forestière n° 96. 114 p. [mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire96.pdf](http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire96.pdf)
- Malo, C. et C. Messier, 2011. *Impact of primary and secondary machinery tracks on fine root growth of sugar maple after selection cutting*. Can. J. For. Res. 41(4): 892-897. <https://doi.org/10.1139/x10-245>
- Marquis, D.A., 1969. *Thinning in young northern hardwoods: 5-year results*. U.S.D.A. Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Upper Darby, PA (États-Unis). Research Paper NE-139. 22 p. <https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/6731>
- Marquis, D.A. et R.L. Ernst, 1991. *The effects of stand structure after thinning on the growth of an allegheny hardwood stand*. For. Sci. 37(4): 1182-1200. [https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/1991/ne\\_1991\\_marquis\\_001.pdf](https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/1991/ne_1991_marquis_001.pdf)
- Messier, C. et P. Bellefleur, 1988. *Light quantity and quality on the forest floor of pioneer and climax stages in a birch-beech-sugar maple stand*. Can. J. For. Res. 18: 615-622. <https://doi.org/10.1139/x88-090>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2014. *Classification des tiges d'essences feuillues — Normes techniques. 2<sup>e</sup> édition*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 108 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/classif-tiges-essence-feuillues-6.pdf>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2019. *Placettes-échantillons permanentes : normes techniques. 5<sup>e</sup> inventaire*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 206 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/norme-5e-inventaire-peppdf.pdf>
- Miller, G.W., 2000. *Effect of crown growing space on the development of young hardwood crop trees*. North. J. Appl. For. 17(1): 25-35. <https://doi.org/10.1093/njaf/17.1.25>
- Ouimet, R., F. Guillemette, S. Bédard et M.-M. Gauthier, 2018. *Effets après 5 ans de l'amendement en matière résiduelle fertilisante sur le sol, le statut nutritif et l'accroissement des arbres dans de jeunes érablières éclaircies en Estrie*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 150. 18 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Note150.pdf>

- Pothier, D., 1996. *Accroissement d'une érablière à la suite de coupes d'éclaircie : résultats de 20 ans*. Can. J. For. Res. 26(4): 543-549. <https://doi.org/10.1139/x26-062>
- Power, H., 2015. *Guide d'utilisation du simulateur de croissance forestière Artémis-2014 sur Capsis*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. 39 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Power-Hugues/Guide-Artemis-Capsis.pdf>
- R Core Team, 2018. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Logiciel. <https://www.R-project.org/>
- Roberge, M.R., 1975. *Effect of thinning on the production of high-quality wood in a Quebec northern hardwood stand*. Can. J. For. Res. 5(1): 139-145. <https://doi.org/10.1139/x75-019>
- Robitaille, L., G. Sheedy et Y. Richard, 1990. *Effet de l'éclaircie précommerciale et de la fertilisation sur un gaulis de 10 ans à dominance de bouleau jaune*. For. Chron. 66(4): 487-493. <https://doi.org/10.5558/tfc66487-5>
- Saucier, J.-P., J.-F. Bergeron, P. Grondin et A. Robitaille, 1998. *Les régions écologiques du Québec méridional (3<sup>e</sup> version) : un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles*. Supplément de L'Aubelle n° 124 (février-mars 1998), supplément. 12 p.
- Sendak, P.E. et W.B. Leak, 2008. *Early crop-tree release and species cleaning in young northern hardwoods: A financial analysis*. U.S.D.A. Forest Service, Northern Research Station. Newtown Square, PA (États-Unis). Research Paper NRS-6. 13 p. <https://doi.org/10.2737/NRS-RP-6>
- Smith, D.M., B.C. Larson, M.J. Kelly et P.M.S. Ashton, 1997. *The practice of silviculture : Applied forest ecology*, 9th edition. Wiley. New York, NY (États-Unis). 556 p.
- Tremblay, S., F. Guillemette et M. Barrette, 2013. «Chapitre 14 — L'éclaircie précommerciale», Dans : Ministère des Ressources naturelles (éd.). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 — Les concepts et l'application de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. Les Publications du Québec. Québec, QC. p. 272-299.
- Ward, J.S., 1995. *Intensity of precommercial crop-tree release increases diameter and crown growth in upland hardwoods*. Résumé d'une conférence paru dans : Proceedings of the 10th Central Hardwood Forest Conference. 5 au 8 mars 1995. Morgantown, WV (États-Unis). p. 388-398. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/12806>
- Zarnovican, R. et J. Trencia, 1987. *Croissance de l'érable à sucre et du hêtre à grandes feuilles selon la position sociale dans le peuplement*. Ann. Sci. For. 44(2): 211-226. <https://doi.org/10.1051/forest:19870205>





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

On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Citation recommandée :

Guillemette, F., A. Morin-Bernard et S. Bédard, 2020. *Effets après 5 ans de l'éclaircie commerciale mécanisée dans une bétulaie jaune âgée de 41 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 154. 20 p.

ISSN 0834-4833

ISBN (pdf) : 978-2-550-86627-5

G.F.D.C.: SD 396.5

L.C.: 242--015.5(714)

Dépôt légal 2020

Bibliothèque nationale du Québec

© 2020 Gouvernement du Québec

**Forêts, Faune  
et Parcs**

**Québec** 