

Coupe progressive dans un peuplement mixte boréal : effets après 5 ans de la coupe finale sur le développement des drageons de tremble et des conifères dégagés

par Marcel Prévost^{1*} et Lise Charette¹

RÉSUMÉ

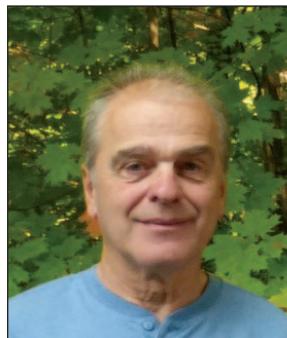
Nous avons utilisé la coupe progressive en deux phases afin de dégager la régénération résineuse préétablie et de limiter le drageonnement du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) dans un peuplement mixte stratifié de trembles et de conifères. Dans le présent article, nous présentons les effets de la coupe finale, appliquée 12 ans après la coupe d'établissement, sur le développement de la régénération préétablie et des drageons de tremble après 5 ans. Le drageonnement s'est révélé inversement proportionnel à l'intensité de la coupe d'établissement, avec 19 000, 14 900 et 6 800 tiges/ha 2 ans après la coupe finale, respectivement, dans les prélèvements initiaux de 35, 50 et 65 % de la surface terrière. Cependant, dès l'année 5, l'effet du traitement sur la densité des tiges n'était plus significatif, en raison du taux élevé de mortalité du tremble dans les coupes à 35 et à 50 %. La densité des tiges de conifères dépassant les 100 cm était alors comparable à celle des tiges de tremble dans les coupes à 35 et à 50 %, mais les conifères dominaient la coupe à 65 %. Le taux de mortalité sur pied était plus élevé pour les feuillus (22–28 %) que pour les conifères (4–9 %) préétablis, à l'exception du témoin non coupé (14 et 9 %, respectivement). Cependant, le chablis était respectivement de 4 et 8 %, en moyenne, dans les trois coupes partielles, et ce, sans lien au traitement. Les petites tiges marchandes de conifères (diamètre à hauteur de poitrine – DHP de 9,1–15,0 cm) qui avaient été retenues ont été les plus touchées par le chablis. Toutefois, les pertes globales ont été jugées acceptables, compte tenu de la croissance en DHP et en hauteur des tiges ayant survécu. Cette étude confirme que la coupe progressive en deux phases basée sur la régénération préétablie devrait être envisagée pour limiter l'enfeuillage en forêt mixte boréale.

Mots-clés : aménagement écosystémique; enfeuillage; mélange stratifié d'essences; régénération préétablie de conifères; petites tiges marchandes

ABSTRACT

We used the two-step shelterwood cutting to release conifer advance growth and limit the development of trembling aspen (*Populus tremuloides*) suckers in a stratified mixed aspen – conifer stand. This study presents the effects of the final cut, applied 12 years after the establishment cut, on the 5-year response of advance regeneration and aspen sucker development. Suckering was inversely proportional to the intensity of the establishment cut, with 19 000, 14 900 and 6 800 stems/ha two years after the final cut, respectively in the initial removal of 35%, 50% and 65% basal area. By year 5, however, the treatment effect on stem density was no longer significant due to high aspen mortality in the 35% and 50% cuts. At this time, the density of conifer stems taller than 100 cm was comparable to that of aspen stems in the 35% and 50% cuts, while conifers dominated the 65% cut. Standing mortality was higher for hardwood (22–28%) than for conifer (4–9%) advance growth, except in the uncut control (14% and 9%, respectively), while windthrow averaged 4% and 8%, respectively, in the three partial cuts without being related to treatment. Small merchantable conifer stems (diameter at breast height – DBH 9.1–15.0 cm) that were retained were most affected by windthrow, but overall losses were found acceptable considering DBH and height growth of the surviving stems. This study confirms that the two-step shelterwood cutting that secures conifer advance regeneration should be considered to limit hardwood conversion in the boreal mixedwood forest.

Keywords: ecosystem-based forest management; hardwood expansion; stratified species mixture; conifer advance growth; small merchantable stems.



Marcel Prévost



Lise Charette

¹Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, Direction de la recherche forestière, 2700, rue Einstein, Québec, QC G1P 3W8 Canada

*Auteur de correspondance : marcel.prevost@mffp.gouv.qc.ca

Introduction

La problématique de l'enfeuillement, qui est le remplacement des conifères par les feuillus dans le paysage, est bien connue en forêt mixte boréale canadienne (Greene *et al.* 2002; Grondin *et al.* 2003; Laquerre *et al.* 2009). Les feuillus intolérants à l'ombre, comme le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) et le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.), peuvent occuper les parterres de coupe au détriment des conifères, comme le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) et l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Par exemple, dans les peuplements qui contiennent du tremble, même en faibles proportions, les difficultés d'aménagement viennent de sa capacité de drageonnement et de sa croissance initiale rapide alimentée par le système racinaire parental, puisqu'elles lui confèrent un avantage marqué sur les conifères (Greene *et al.* 1999). Le maintien d'une composante résineuse est souhaitable afin de préserver la biodiversité du peuplement. De plus, les peuplements mixtes peuvent avoir une plus grande productivité (Man et Lieffers 1999; Edgar et Burk 2001; MacPherson *et al.* 2001; Kabzems *et al.* 2007), une meilleure résilience face aux insectes et aux maladies (Su *et al.* 1996; Jactel *et al.* 2005) et une plus grande diversité de produits forestiers (MacDonald 1995). Ainsi, une approche sylvicole judicieuse pour les mélanges de trembles matures et de conifères devrait viser à influencer l'établissement de la nouvelle cohorte en limitant le développement du tremble et en favorisant les espèces résineuses. Quelques expériences sylvicoles ont déjà montré que l'enlèvement partiel du couvert pouvait limiter le développement du tremble et accélérer l'établissement et la croissance des essences tolérantes à l'ombre dans des mélanges de trembles et de conifères (p. ex., Prévost et Pothier 2003; Man *et al.* 2008; Groot *et al.* 2009).

Le système de coupe progressive en deux phases peut être utilisé pour créer des conditions favorables à l'établissement d'une nouvelle cohorte sous un couvert partiel (Matthews 1989; Nyland 2002). Dans ce système, la coupe d'établissement vise le plus souvent à promouvoir l'ensemencement naturel ou peut aussi viser à dégager une strate de régénération préétablie (Smith *et al.* 1997). La coupe finale est habituellement appliquée de 5 à 15 ans plus tard pour enlever le couvert et dégager complètement la régénération préétablie. La valeur de la coupe d'établissement repose principalement sur l'établissement d'un nouveau peuplement d'essences désirées avant la coupe finale, mais la croissance et le taux de mortalité du couvert résiduel doivent aussi être pris en compte (p. ex., Prévost *et al.* 2010; Urgenson *et al.* 2013). De plus, la réaction de la régénération préétablie à la coupe finale doit être estimée pour réaliser une évaluation complète du système de coupe progressive. Tandis que la coupe d'établissement crée un abri idéal pour l'acclimatation de la régénération préétablie et l'établissement de nouveaux semis, la coupe finale est souvent nécessaire pour optimiser la croissance (Smith *et al.* 1997).

Nous avons fait l'essai de ce système afin d'accélérer la succession naturelle dans un peuplement stratifié de trembles et de conifères contenant une dense régénération préétablie de conifères, au Québec, Canada. Pratiquée en 2001, la coupe d'établissement a permis de protéger la régénération de conifères et de limiter le développement des drageons de tremble

(Prévost et DeBlois 2014). Comme prévu, durant la phase d'établissement, l'interception de la lumière par le couvert résiduel et la régénération préétablie retenue s'est révélée nuisible au tremble, une espèce intolérante à l'ombre. En plus de leur fonction sylvicole de projeter de l'ombre sur les drageons de tremble émergents, les tiges résiduelles ont connu une bonne croissance comme autre résultat positif (Prévost et Dumais 2014). La coupe d'établissement a favorisé la récolte de trembles en état de mortalité imminente de même que la survie et le recrutement des conifères à la classe marchande (diamètre à hauteur de poitrine – DHP $\geq 9,1$ cm). De plus, la rétention des petites tiges marchandes (9,1–15,0 cm de DHP) de conifères a contribué substantiellement au gain en surface terrière (ST) durant la phase d'établissement.

La coupe finale a été appliquée à l'automne 2013, 12 ans après la coupe d'établissement. La régénération de conifères était alors d'environ 8 m de hauteur, dont quelques individus ayant atteint les 10 m (Prévost et DeBlois 2014); un dégagement complet apparaissait donc opportun. Il était prévu que ces gaules de conifères réagissent à l'enlèvement du couvert et limitent le développement du tremble dans le nouveau peuplement. Cet article présente les effets durant les cinq premières années après la coupe finale sur le développement de la deuxième cohorte de drageons de tremble en relation avec la réaction des conifères préétablis. Nous avons émis l'hypothèse selon laquelle : (i) le drageonnement du tremble est inversement proportionnel à l'intensité de la première coupe; (ii) l'ombre projetée par la régénération préétablie retenue limite le développement des drageons de tremble; et (iii) le sapin baumier montre une meilleure réaction de croissance que l'épinette (*P. glauca* ou *P. mariana*) à la coupe finale (p. ex., Prévost *et al.* 2016).

Matériel et méthodes

Site d'étude et dispositif expérimental

Le peuplement à l'étude était localisé dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune (région 4d) dans les hautes collines de Charlevoix et du Saguenay (Saucier *et al.* 2009), à environ 160 km au nord-est de la Ville de Québec, au Québec, Canada (47° 55' N, 70° 03' O). La ST marchande initiale de 26 m²/ha était composée à 53 % de peuplier faux-tremble, à 28 % de bouleau à papier, à 11 % de sapin baumier, à 3 % d'épinette blanche, à 2 % d'épinette noire et à 2 % d'érable rouge (*Acer rubrum* L.). Le tremble mature âgé de 80 à 90 ans dominait le couvert principal, tandis que les conifères âgés de 40 à 50 ans occupaient généralement l'étage intermédiaire. La densité de la régénération préétablie de conifères $\geq 1,3$ m de hauteur et $\leq 9,0$ cm de DHP était de 1400 tiges/ha et principalement du sapin baumier.

L'expérience était constituée de quatre blocs aléatoires complets, chacun contenant cinq traitements sur des unités expérimentales de 50 m \times 50 m : un témoin non coupé (0 %), trois intensités de coupe partielle (prélèvements uniformes de 35, 50 et 65 % de la ST) et une coupe avec protection de la régénération préétablie enlevant 100 % des feuillus marchands et les conifères ayant un DHP $\geq 15,1$ cm. Pour la fraction résineuse (16 % de la ST), cette coupe à 100 % correspond dans l'ensemble aux traitements CPPTM (Coupe avec protection des petites tiges marchandes) au Québec (Ruel *et al.* 2013) et HARP (Harvesting with Regeneration Protec-

tion) en Ontario (Groot *et al.* 2005). Tous les petits conifères marchands (9,1–15,0 cm de DHP) ont aussi été conservés dans les trois coupes partielles, tandis que les tiges à enlever ont été sélectionnées dans l'ordre suivant : 1) tremble (qui était presque mature); 2) bouleau ou érable (le moins vigoureux des deux); 3) sapin mature, pour éviter les pertes par chablis; et 4) épinette (mature ou déperissant seulement). Cette coupe d'établissement a été appliquée à la fin de l'été 2001, en utilisant une scie à chaîne pour l'abattage. Les arbres ont été ébranchés et tronçonnés sur le site, pour être transportés aux jetées à l'aide d'un débardeur sur chenilles F4 Dion, à partir de sentiers équidistants de 50 m. La coupe finale (ou coupe de succession) a été pratiquée dans les trois coupes partielles à l'automne 2013, soit 12 ans après la première coupe, en protégeant les petits conifères marchands et en utilisant la même procédure d'exploitation. Le peuplement et le dispositif expérimental sont décrits en détail dans Prévost et DeBlois (2014).

Suivi de la végétation

Chaque unité expérimentale contenait une parcelle centrale de 20 m × 20 m (400 m²) et seize quadrats de 2 m × 2 m (4 m²) pour réaliser le suivi de la végétation. Après la première coupe de 2001, toutes les tiges résiduelles d'espèces commerciales ≥1,3 m de hauteur ont été numérotées dans la parcelle de 400 m². L'espèce, le DHP, la hauteur totale, la hauteur du houppier et quatre rayons de cime (N, E, S, O) ont alors été notés. Ces tiges ont été suivies 1, 2, 3, 5, 7 et 10 ans après la coupe durant la phase d'établissement (Prévost et DeBlois 2014). Les tiges qui ont survécu à la coupe finale de 2013 ont été mesurées en 2014, 2015, 2016 et 2018 (1, 2, 3 et 5 ans après coupe). L'espèce, le DHP, la hauteur totale et la hauteur du houppier ont été notés. Aux mêmes années, les seize quadrats de 4 m² ont été utilisés pour effectuer le suivi de la régénération après coupe. Les espèces commerciales (sapin baumier, épinette noire, épinette blanche, peuplier faux-tremble, bouleau à papier, érable rouge) et les principales espèces non commerciales (noisetier à long bec [*Corylus cornuta* Marsh.], érable à épis [*Acer spicatum* Lam.], érable de Pennsylvanie [*Acer pensylvanicum* L.], sorbier d'Amérique [*Sorbus americana* Marsh.] et saule [*Salix* spp.]) ont été dénombrées par classe de hauteur (1–5, 6–30, 31–60, 61–100, 101–200, 201–300, >300 cm jusqu'à 9,0 cm de DHP).

Analyses statistiques

La densité de régénération mesurée en 2011, 2 ans avant la coupe finale (2013) et 1, 2, 3 et 5 ans après la coupe (2014, 2015, 2016 et 2018) a été analysée séparément par espèce pour le sapin baumier, l'épinette (épinettes blanche et noire regroupées), le peuplier faux-tremble, le bouleau à papier, l'érable rouge, l'érable à épis, l'érable de Pennsylvanie et le noisetier à long bec. Des modèles linéaires mixtes avec mesures répétées ont été utilisés avec une matrice de variance-covariance, afin de prendre en compte la corrélation entre les mesures prises sur les mêmes unités expérimentales. Les critères de qualité de l'ajustement du modèle et de parcimonie du nombre de paramètres ont déterminé le choix de cette matrice, tout en tenant compte des intervalles de temps inégaux. L'intensité de la coupe d'établissement, l'année de mesure et leur interaction ont été incluses dans le

modèle comme facteurs à effet fixe, tandis que le bloc a été considéré comme un effet aléatoire. Pour les interactions significatives entre les facteurs principaux, les niveaux d'un facteur ont été comparés à un niveau fixé de l'autre facteur. Toutes les données de régénération ont été transformées (\sqrt{x}) pour améliorer l'homogénéité de la variance. En ce qui concerne les espèces commerciales, la densité des gaules ≥1,3 m de hauteur notée immédiatement après la coupe d'établissement a été testée comme covariable, mais a été rejetée dans tous les cas.

Les effets de l'intensité de la coupe et de l'espèce (peuplier faux-tremble et conifères) sur la densité de régénération selon les classes de hauteur (A : 6–100 cm, B : 101–200 cm, C : 201–300 cm et D : >300 cm) ont été évalués 1, 2, 3 et 5 ans après la coupe finale, en utilisant une analyse de la variance classique à quatre voies avec l'intensité de la coupe d'établissement, l'espèce et la classe de hauteur comme effets fixes et le bloc comme effet aléatoire. Pour cette analyse, nous avons réalisé des tests d'effets simples (Winer 1971), en utilisant l'interaction triple pour faire des comparaisons d'intérêt à l'intérieur d'un troisième facteur. Nous avons choisi cette approche, peu importe que l'interaction triple ait été significative (années 1, 2 et 3) ou non (année 5), étant donné que tous les effets principaux étaient significatifs (Iacobucci 2001). La transformation racine cubique a été utilisée et les valeurs sont présentées dans leur forme originale.

La hauteur et le DHP des conifères préétablis ont été analysés avec la même analyse classique à quatre voies, 0 et 5 ans après la coupe finale, à l'exception de la classe de hauteur qui a été remplacée par la classe initiale de DHP (gaules : DHP <9,1 cm, marchandes : DHP ≥9,1 cm), en se basant sur la dernière valeur mesurée en 2011, 2 ans avant la coupe. Nous avons présumé que les tiges avec un DHP ≥8,0 cm en 2011 devraient avoir atteint la taille marchande (DHP ≥9,1 cm) en 2 ans (2013). Pour ces deux variables (hauteur et DHP), la hauteur de la tige mesurée immédiatement après la coupe d'établissement a été utilisée comme covariable, afin de tenir compte des différences possibles avant le traitement. Cette covariable a été ajustée au préalable, afin de tenir compte des différentes gammes de valeurs dans les deux classes de DHP (Milliken et Johnson 2002).

Les données sur les taux de mortalité des tiges préétablis ont été analysées séparément pour la mortalité sur pied et le chablis, et ce, pour les années 0 et 5 après la coupe finale, en comparant deux groupes d'espèces (feuillus = bouleau à papier, érables rouge et à sucre; conifères = sapin baumier, épinettes noire et blanche). Nous avons effectué une analyse de la variance à trois voies avec l'intensité de la coupe d'établissement et le groupe d'espèces comme effets fixes et le bloc comme effet aléatoire. Cette analyse comprenait toutes les tiges établies avant la première coupe et toujours vivantes en 2011, 2 ans avant la coupe finale. Le taux de mortalité a été exprimé en % (100 × nombre de tiges mortes à l'an 0 ou 5 / nombre de tiges vivantes à l'an -2).

Toutes les analyses ont été effectuées sur les valeurs par unité expérimentale à l'aide de la procédure MIXED de SAS (v. 9.4, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina) pour la densité de régénération, la hauteur et le DHP de la régénération préétablie de conifères et à l'aide de la procédure GLIMMIX pour les données sur les taux de mortalité, cette dernière uti-

Tableau 1. Analyse de la variance et probabilités associées ($P > F$) pour la densité de régénération (tiges/ha, >5 cm de hauteur) en fonction de l'intensité de la coupe d'établissement (prélèvements de 0, 35, 50, 65 et 100 % de la surface terrière) et du temps par rapport à la coupe finale (2 ans avant et 1, 2, 3 et 5 ans après)

Source de variation	dl	Sapin baumier	Épinette	Peuplier faux-tremble	Bouleau à papier	Érable rouge	Érable à épis	Érable de Pennsylvanie	Noisetier à long bec
Intensité de la coupe (IC)	4	0,241	0,490	<0,001	0,119	0,230	0,531	0,286	0,012
Temps (T)	4	<0,001	0,005	<0,001	0,002	<0,001	<0,001	0,002	0,001
IC × T	16	0,422	0,800	<0,001	0,005	0,265	0,197	0,342	0,001

Note : dl = degrés de liberté du numérateur. Degrés de liberté du dénominateur selon Kenward-Roger : IC = 11,5 à 18,7; T = 12,0 à 59,7; IC × T = 17,9 à 59,4. Matrice de variance-covariance : spatiale de forme puissance (sapin baumier, épinette, peuplier faux-tremble, érable rouge, érable à épis), composantes de la variance (noisetier à long bec) et sans structure (bouleau à papier, érable de Pennsylvanie). Les données ont été transformées pour toutes les espèces (\sqrt{x}). Les valeurs de p significatives sont présentées en **caractère gras**.

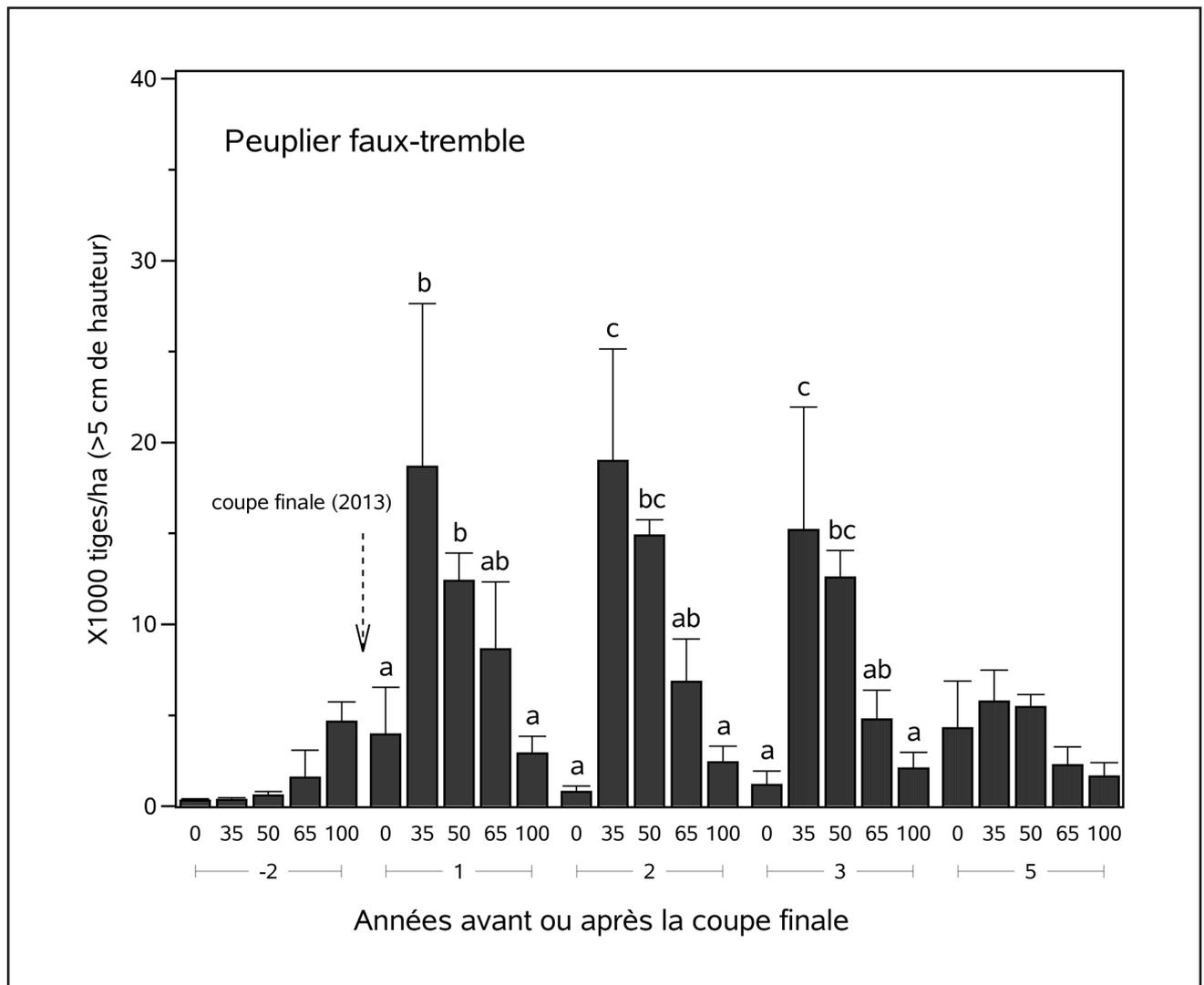


Fig. 1. Densité des drageons de tremble (tiges/ha, >5 cm de hauteur) en fonction de l'intensité de la coupe d'établissement (prélèvements de 0, 35, 50, 65 et 100 % de la surface terrière), 2 ans avant et 1, 2, 3 et 5 ans après la coupe finale de 2013. Pour chaque année, les moyennes associées à une lettre différente sont différentes statistiquement ($p < 0,05$, valeurs de p ajustées par simulation). Les barres d'erreur représentent l'erreur type des moyennes par traitement ($n = 4$).

lisant la fonction de lien logit et une distribution binomiale. La méthode de Kenward-Roger a été utilisée pour estimer les degrés de liberté du dénominateur. Le niveau de signification statistique a été basé sur $p < 0,05$ pour toutes les analyses et tous les tests. Dans tous les cas pour lesquels un facteur était significatif ou une interaction était significative, la méthode de Westfall a été utilisée pour évaluer les différences (Westfall 1997). Le taux d'erreur de 0,05 a été appliqué à chaque niveau fixé des facteurs principaux, selon une approche par familles séparées de tests (Westfall *et al.* 2011). L'homogénéité des variances et la normalité ont été vérifiées sur les résidus en utilisant des méthodes graphiques usuelles, en plus des tests de Brown et Forsythe (homogénéité) et de Shapiro-Wilk (normalité).

Résultats

Dynamique de régénération

L'intensité de la coupe d'établissement et le temps par rapport à la coupe finale ont interagi quant à la densité du peuplier faux-tremble, du bouleau à papier et du noisetier à long bec >5 cm de hauteur ($IC \times T$, $p \leq 0,005$, Tableau 1). La densité du tremble n'était pas différente entre les intensités de coupe 2 ans avant la coupe finale (310–4650 tiges/ha, Fig. 1). Cependant, une augmentation de la densité a été observée 1 an après la coupe finale dans les coupes à 35, 50 et 65 % (tous les $p < 0,001$, résultats des tests de comparaisons multiples non présentés dans le tableau). Ainsi, aux années 1, 2 et 3 après coupe, la densité du tremble était plus élevée dans les coupes à 35 % (respectivement 18700, 19000 et 15200 tiges/ha) et à

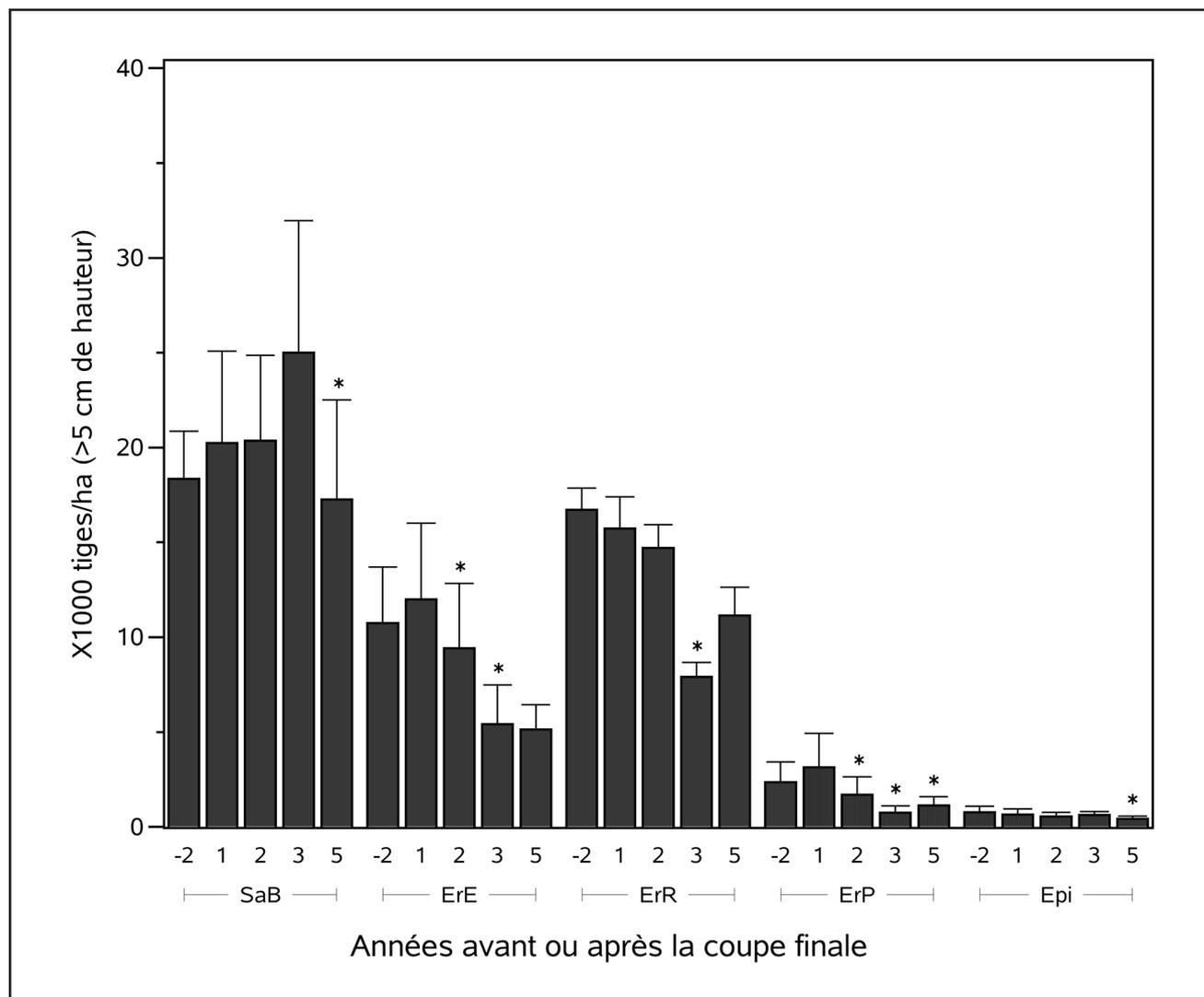


Fig. 2. Densité globale de la régénération du sapin baumier (SaB), de l'érable à épis (ErE), de l'érable rouge (ErR), de l'érable de Pennsylvanie (ErP) et de l'épinette (Epi) (tiges/ha, >5 cm de hauteur) 2 ans avant et 1, 2, 3 et 5 ans après la coupe finale de 2013. Pour chaque espèce, une moyenne associée à un * indique un effet temps significatif lié à l'année précédente de mesure ($p < 0,05$, valeurs de p ajustées par simulation). Les barres d'erreur représentent l'erreur type des moyennes par traitement ($n = 4$).

50 % (12400, 14900 et 12600) que dans la coupe à 100 % (2900, 2400 et 2100) et le témoin (3900, 800 et 1200, $p \leq 0,037$). De plus, la densité était plus élevée dans la coupe à 35 % que dans celle à 65 %, aux années 2 et 3 (respectivement 6800 et 4800 tiges/ha, $p \leq 0,052$). À l'année 5, l'effet du traitement n'était plus significatif, puisque la densité du tremble avait fortement diminué entre les années 3 et 5 dans

les coupes à 35 et 50 % ($p \leq 0,042$). En ce qui concerne le bouleau à papier, l'interaction IC \times T était liée à des changements de densité dans la coupe à 35 %, associés à une augmentation à l'année 1 après coupe (de 200 à 9900 tiges/ha, non présenté) et à une diminution entre les années 3 et 5 (de 1700 à 300, $p \leq 0,044$). Quant au noisetier à long bec, la densité était plus élevée dans la coupe à 100 % (17700 tiges/ha, non présenté) que dans la coupe à 65 % (6000) avant la coupe finale ($p = 0,019$) et à l'année 1 après coupe (15800 vs. 5800, $p = 0,052$). De plus, la densité du noisetier à long bec était plus élevée dans la coupe à 35 % (15600 tiges/ha) que dans la coupe à 65 % et le témoin, à l'année 5 (respectivement 5100 et 6000, $p \leq 0,027$).

Un effet temps a été trouvé quant à la densité du sapin baumier, de l'épinette, de l'érable rouge, de l'érable à épis et de l'érable de Pennsylvanie de plus de 5 cm ($p \leq 0,005$, Tableau 1, Fig. 2). La densité globale du sapin baumier a eu tendance à augmenter entre les années 2 et 3 après coupe (de 20300 à 25000 tiges/ha, $p = 0,055$) et a diminué significativement entre les années 3 et 5 (à 17300, $p < 0,001$). À une plus petite échelle, la densité de l'épinette a diminué de 600 à 400 tiges/ha entre les années 3 et 5 ($p = 0,047$). Concernant l'érable à épis et l'érable de Pennsylvanie, la densité a diminué graduellement entre les années 1 (respectivement 12000 et 3100 tiges/ha), 2 (9400 et 1700) et 3 (5400 et 700, $p \leq 0,018$) après coupe. Une dimi-

Tableau 2. Analyse de la variance et probabilités associées ($P > F$) pour la densité de régénération (tiges/ha) en fonction de l'intensité de la coupe d'établissement (prélèvements de 0, 35, 50, 65 et 100 % de la surface terrière), de l'espèce (peuplier faux-tremble, conifères) et de la classe de hauteur (A = 6-100 cm, B = 101-200 cm, C = 201-300 cm, D = >300 cm) 1, 2, 3 et 5 ans après la coupe finale.

Source de variation	dl	Année 1	Année 2	Année 3	Année 5
Intensité de la coupe (IC)	4	0,063	<0,001	<0,001	0,002
Espèce (Es)	1	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
IC \times Es	4	0,006	<0,001	<0,001	<0,001
Classe de hauteur (CH)	3	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
IC \times CH	12	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Es \times CH	3	0,362	<0,001	<0,001	<0,001
IC \times Es \times CH	12	<0,001	0,002	0,003	0,067

Note : dl = degrés de liberté du numérateur. Degrés de liberté du dénominateur selon Kenward-Roger : IC = 12 à 120; tous les autres facteurs et interactions = 105 à 120. Les analyses ont été réalisées sur la racine cubique de la densité de régénération. Les valeurs de p significatives sont présentées en caractère gras.

Tableau 3. Densité (tiges/ha) de la régénération de peuplier faux-tremble et de conifères (97 % de sapin baumier) par classe de hauteur (A = 6-100 cm, B = 101-200 cm, C = 201-300 cm, D = >300 cm) en fonction de l'intensité de la coupe d'établissement (% de la surface terrière) aux années 1, 2, 3 et 5 après la coupe finale

Classe de hauteur	0%		35%		50%		65%		100%	
	Tremble	Conifères	Tremble	Conifères	Tremble	Conifères	Tremble	Conifères	Tremble	Conifères
<i>Année 1</i>										
A	3945	17 031	17 187	27 539	11 992	10 078	7578	16 094	0	12 070
B	0	586	1445	1328	352	1172	156	2305	78	4531
C	0	195*	0	469*	0	508	117	937	195	1641
D	0	781	39	1172	39	742	781	1875	2617	3359
<i>Année 2</i>										
A	781	12 969	7578	31 055	8008	13 555	3750	14 570	39	11 016
B	0	508	8984	1562	5898	1211	2305	2383	78	4766
C	0	234*	2148	469	937	469	117	898	195	1172*
D	0	703	273	1289*	39	742	664	1758	2109	3125
<i>Année 3</i>										
A	1172	18 906	5117	36 523	5625	16 953	1719	23 008	0	11 406
B	0	547	6875	1094	5742	1289	2070	2500	0	4687
C	0	195*	2500	586*	937	469	273	1016	39	1523
D	0	703	703	1250	273	625	703	1797	2031	3047
<i>Année 5</i>										
A	4023	13 242	1563	26 276	1883	9385	940	11 930	78	7187
B	273	664	1980	1238	2138	1506	643	2081	0	3984
C	0	156	644	508	606	460	195	1021	0	1172
D	0	703	1558	1269	829	782	469	1961	1562	2891

Note : Les moyennes présentées en caractère gras indiquent des différences significatives ($p < 0,05$) entre le tremble et les conifères pour une classe de hauteur donnée à l'intérieur d'une intensité de coupe. * indique qu'une tendance claire à démontrer une différence a été observée ($p \leq 0,066$).

Tableau 4. (A) Analyse de la variance (ANOVA) en fonction de l'intensité de la coupe d'établissement (prélèvements de 0, 35, 50, 65 et 100 % de la surface terrière) et du groupe d'espèces (feuillus [F] ou conifères [C]) immédiatement après (année 0) et 5 ans après la coupe finale et (B) Taux de mortalité sur pied et de chablis

(A) ANOVA, valeurs de <i>p</i>		Mortalité sur pied		Chablis	
Source de variation	<i>dl</i>	Année 0	Année 5	Année 0	Année 5
Intensité de la coupe (IC)	4	0,318	0,941	0,394	0,387
Groupe d'espèces (Es)	1	<0,001	<0,001	0,824	0,837
IC × Es	4	0,251	0,006	0,629	0,850

Intensité de la coupe	Mortalité sur pied (%)				Chablis (%)			
	Année 0		Année 5		Année 0		Année 5	
	F	C	F	C	F	C	F	C
0 %	5	2	14	9	1	1	1	1
35 %	9	5	22	8	4	4	4	5
50 %	18	3	28	9	7	12	7	12
65 %	15	1	26	4	1	5	1	7
100 %	8	1	25	9	1	0	1	0

Note : *dl* = degrés de liberté du numérateur. Degrés de liberté du dénominateur selon Kenward-Roger : IC = 11,8 à 14,9; Es et IC × Es = 30,0. Les valeurs de *p* significatives sont présentées en **caractère gras**. Groupes d'espèces : feuillus = bouleau à papier, érables rouge et à sucre; conifères = sapin baumier, épinettes noire et blanche

Tableau 5. Analyse de la variance et probabilités associées (*P* > *F*) pour le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur totale des conifères préétablis en fonction de l'intensité de la coupe d'établissement (prélèvements de 0, 35, 50, 65 et 100 % de la surface terrière), de l'espèce (sapin baumier ou épinette) et de la classe de DHP (gaules [DHP < 9,1 cm] ou petites tiges marchandes [DHP = 9,1 à 15,0 cm]) immédiatement après la coupe finale (année 0) et 5 ans après le traitement

Source de variation	<i>dl</i>	DHP		Hauteur totale	
		Année 0	Année 5	Année 0	Année 5
Intensité de la coupe (IC)	4	<0,001	0,310	<0,001	<0,001
Espèce (Es)	1	0,005	0,014	0,166	0,292
IC × Es	4	0,467	0,632	0,167	0,276
Classe de DHP (CDHP)	1	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
IC × CDHP	4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Es × CDHP	1	0,809	0,890	0,076	0,617
IC × Es × CDHP	4	0,791	0,727	0,854	0,790
Covariable	1	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Note : *dl* = degrés de liberté du numérateur. Degrés de liberté du dénominateur selon Kenward-Roger : IC = 10,7 à 11,7; Es, IC × Es, CDHP, IC × CDHP, Es × CDHP et IC × Es × CDHP = 40,3 à 41,9; covariable = 53,0 à 55,7. Les valeurs de *p* significatives sont présentées en **caractère gras**. L'épinette inclut les épinettes noire et blanche

nution de 14 700 à 7900 tiges/ha a aussi été observée dans les années 2–3 pour l'érable rouge ($p < 0,001$). Finalement, une augmentation a été détectée dans les années 3–5 pour les érables rouge ($p = 0,065$) et de Pennsylvanie ($p = 0,002$).

Classes de hauteur du tremble vs. des conifères

L'intensité de la coupe d'établissement, l'espèce et la classe de hauteur ont toutes eu une interaction relativement à la densité des tiges (IC × Es × CH, $p \leq 0,003$, Tableau 2) au cours des trois premières années après la coupe finale. La densité des conifères était généralement plus élevée que celle du peuplier faux-tremble (Tableau 3) dans le témoin (années 1–3 : toutes les classes; année 5 : A, D; $p \leq 0,061$) et dans les coupes à 65 % (année 1 : toutes les classes; années 2 et 3 : A, D; année

5 : A, C, D; $p \leq 0,049$) et 100 % (toutes les années : A, B, C; $p \leq 0,054$) (200–23 000 vs. 0–7600 tiges/ha). Durant l'étude, la densité des conifères était aussi plus élevée dans quelques classes des coupes à 35 % (année 1 : C, D; année 2 : A, D; années 3 et 5 : A; $p \leq 0,065$) et 50 % (année 1 : C, D; année 2 : D; années 3 et 5 : A; $p \leq 0,017$) (500–36 500 vs. 0–7600 tiges/ha). Toutefois, aux années 2 et 3, la densité du tremble était plus élevée que celle des conifères dans la classe B des coupes à 35 et 50 % (5700–9000 vs. 1100–1600 tiges/ha, $p \leq 0,015$). Une tendance similaire a été trouvée dans la classe C de la coupe à 35 % à l'année 3 (2500 vs. 600 tiges/ha, $p = 0,066$). À l'année 5, les classes B, C et D des coupes à 35 et 50 % contenaient une densité similaire de tremble (600–2100 tiges/ha) et de conifères (500–1500).

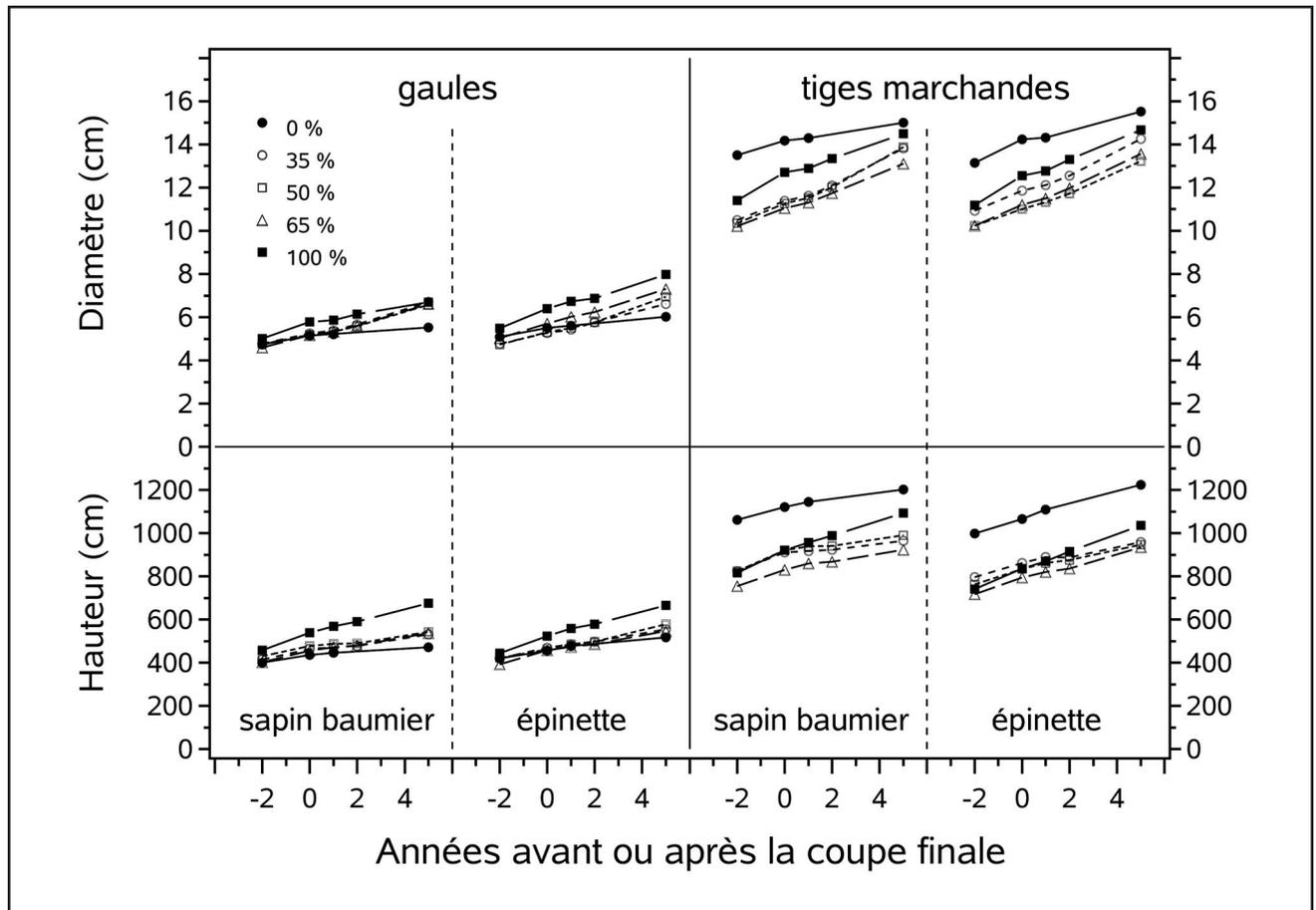


Fig. 3. DHP et hauteur totale en fonction de l'espèce et de l'intensité de la coupe d'établissement (prélèvements de 0, 35, 50, 65 et 100 % de la surface terrière), 2 ans avant et 1, 2, 3 et 5 ans après la coupe finale de 2013.

Mortalité de la régénération préétablie

Immédiatement après la coupe finale (année 0), le taux de mortalité sur pied était globalement plus élevé pour les feuillus (11 %) que pour les conifères (2 %) préétablis (Es, $p < 0,001$, Tableau 4). À l'année 5 après coupe, c'était le cas de tous les traitements (22–28 % vs. 4–9 %), à l'exception du témoin (14 % vs. 9 %) (IC \times Es, $p = 0,006$). Le taux de chablis n'était pas lié au traitement, au groupe d'espèces ou à l'année et affichait une moyenne respective de 4 et 8 % pour les feuillus et les conifères, dans les trois coupes partielles à l'année 5.

Hauteur et DHP des conifères par rapport à la classe de DHP

Aux deux années de mesure, l'intensité de la coupe et la classe de DHP ont interagi quant au DHP et à la hauteur totale des tiges préétablies de conifères, le sapin baumier et l'épinette combinés (IC \times CDHP, tous les $p < 0,001$, Tableau 5, Fig. 3). Dans la classe des gaules, le DHP moyen était similaire pour tous les traitements aux années 0 (5,3–6,3 cm) et 5 (5,8–7,6 cm). Dans la classe marchande, le DHP était le plus élevé dans le témoin, intermédiaire dans la coupe à 100 % et le plus bas dans les coupes partielles (respectivement 14,2, 12,4 et 11,0–11,6 cm, $p \leq 0,049$) à l'année 0. Il était plus élevé dans le témoin que dans les trois coupes partielles (15,3 vs. 13,3–14,0 cm, $p \leq 0,016$) à l'année 5. La hauteur des gaules de coni-

fères n'était pas liée au traitement (446–534 cm) à l'année 0, mais elle était plus élevée dans la coupe à 100 % (683 cm) par rapport aux coupes à 0, 35 et 65 % (495–542 cm, $p \leq 0,027$) à l'année 5. La hauteur des conifères marchands était plus élevée dans le témoin que dans tous les autres traitements pour les années 0 (1094 vs. 812–886 cm) et 5 (1213 vs. 929–1050 cm, tous les $p < 0,001$). Elle était plus élevée dans la coupe à 100 % (1050 cm) que dans les coupes à 35 et 65 % (respectivement 962 et 929 cm, $p \leq 0,037$) à l'année 5. Finalement, pour tous les traitements et toutes les classes de DHP combinés, le DHP de l'épinette était légèrement plus élevé que le DHP du sapin baumier aux années 0 (Moyenne ajustée = 9,0 vs. 8,6 cm) et 5 (10,7 vs. 10,2 cm) (Es, $p \leq 0,014$, Tableau 5, Fig. 3).

Discussion

La densité de la régénération de tremble était relativement basse 10 ans après la coupe d'établissement (année -2) et, comme prévu, la coupe finale a déclenché le drageonnement du tremble (Fig. 1). Cet effet a été proportionnel au nombre de tiges de tremble initialement laissées sur pied et récoltées 12 ans plus tard, c'est-à-dire inversement proportionnel à l'intensité de la coupe d'établissement. Ce résultat confirme notre première hypothèse. Dans l'ensemble, la densité de dra-

geons de la première année était plus basse que la densité de 15 000–29 000 tiges/ha observée après la première coupe (Prévost et DeBlois 2014). Notre prélèvement initial de 35 % de la ST a entraîné des drageonnements comparables à la suite de la première coupe (15 400 tiges/ha) et de la coupe finale (18 700). Toutefois, la récolte prioritaire du tremble a accéléré le drageonnement dans les plus forts prélèvements en ST, avec deux à trois fois plus de drageons après la première coupe qu'après la coupe finale dans les coupes à 50 % (23 400 vs. 12 400 tiges/ha) et 65 % (29 200 vs. 8600). Ainsi, la première coupe avait retiré une bonne partie du potentiel de drageonnement du tremble dans ces scénarios en deux étapes. Dans ce contexte, l'approche de coupe progressive en deux phases offre la possibilité d'influencer la distribution de cette reproduction végétative entre la coupe d'établissement et la coupe finale, contrairement à la coupe totale qui atteint tous les systèmes racinaires de tremble en même temps.

L'analyse de la densité des tiges par classes de hauteur a montré que les conifères surclassaient le tremble en nombre dans toutes les classes du témoin et jusqu'à 300 cm de hauteur dans la coupe à 100 % (Tableau 3). Dans les scénarios en deux étapes, la coupe finale a influencé la dynamique de régénération dans les prélèvements initiaux de 35 et 50 % de la ST, tandis que l'effet a été moins prononcé dans le prélèvement de 65 % de la ST. Dès l'année 2, le tremble surclassait les conifères dans la classe 100–200 cm des coupes à 35 et 50 % et dans la classe 200–300 cm de la coupe à 35 %. Comme pour la coupe d'établissement (Prévost et DeBlois 2014), le facteur déterminant était le déséquilibre hormonal dans le système racinaire (Schier 1973). Cependant, cet effet a été transitoire, puisque les densités de tremble et de conifères plus grands que 100 cm étaient similaires dès l'année 5, indiquant un recrutement limité du tremble aux plus hautes classes. Les conifères dominaient alors les trois plus hautes classes dans la coupe à 65 %, contrairement aux coupes à 35 et 50 %. Ainsi, la première coupe prélevant 65 % de la ST a permis le meilleur contrôle du tremble 5 ans après la coupe finale. Le recrutement futur du tremble dans les plus hautes classes des deux plus bas prélèvements en ST indiquera le meilleur scénario en ce qui a trait à la composition en espèces de la nouvelle cohorte. En comparaison, le tremble constituait environ le tiers des tiges les plus hautes dans la coupe à 100 % appliquée 17 ans plus tôt (Tableau 3). L'utilisation de l'approche de la CPPTM en présence d'une dense régénération de conifères a aidé à maintenir une bonne proportion de conifères dans la nouvelle cohorte, ce qui devrait persister à long terme.

Le tremble est très intolérant à l'ombre et nécessite la pleine lumière pour bien se développer (Perala 1990). La survie des drageons a été particulièrement restreinte entre les années 3 et 5 après l'enlèvement final du couvert, avec des taux de mortalité de 50–60 % en 2 ans (Fig. 1). Bien que l'auto-éclaircie puisse y avoir contribué, ce taux élevé de mortalité confirme notre deuxième hypothèse selon laquelle la haute régénération de conifères a un effet d'ombrage néfaste. La rétention des petits conifères marchands a certainement contribué à limiter la disponibilité de la lumière pour les plus grandes tiges de tremble, particulièrement en raison de leur croissance en hauteur soutenue à la suite de la coupe finale (Fig. 3). Cette constatation appuie cette pratique comme stratégie de base pour limiter l'enfeuilletement.

Après 5 ans, tous les traitements contenaient des densités

comparables de tremble, incluant le témoin, où un drageonnement significatif est survenu aux années 3–5 (Fig. 1). Ce drageonnement a été décrit par Schier et Smith (1979) comme un phénomène habituel et normal dans les clones de tremble non coupés. Dans la présente étude, la plupart des trembles résiduels étaient des arbres près de la maturité ou surannés (Pothier *et al.* 2004). Des observations sur le terrain ont révélé que la mortalité sur pied et le chablis de quelques tiges de tremble avaient causé le drageonnement observé dans le témoin. Ceci confirme que la première coupe a été un succès pour la récolte des trembles déperissants (Prévost et Dumais 2014), comme observé dans un peuplement comparable des basses Appalaches (Prévost *et al.* 2010).

L'utilisation de la coupe partielle dans cette étude visant à conserver la régénération préétablie de conifères soulève la question des risques de chablis (p. ex., MacDonald et Thompson 2003; Ruel *et al.* 2003). Par exemple, la dispersion des arbres résiduels, l'enracinement superficiel et l'exposition topographique peuvent entraîner des dommages significatifs par le vent (Ruel *et al.* 2000; Lavoie *et al.* 2012; Mitchell 2013). Toutefois, dans le mélange d'espèces à l'étude, presque toute la mortalité durant la phase d'établissement est survenue graduellement sur des arbres sur pied, principalement par la senescence du tremble dans la coupe à 35 % et par le dépérissement du bouleau à papier dans la coupe à 65 % (Prévost et Dumais 2014). La mortalité sur pied a aussi été graduelle pour les deux groupes d'espèces après la coupe finale (Tableau 4) et distribuée uniformément sur le site. Cette forme de mortalité a été responsable de 90 % des pertes de feuillus, l'érable rouge étant l'espèce préétablie la plus affectée principalement durant les années 2–3 (Fig. 2). L'exposition soudaine à des conditions de plein découvert peut avoir causé un stress physiologique et entraîné la mortalité (Bladon *et al.* 2006; Busby *et al.* 2006; Lavoie *et al.* 2012). Il importe de mentionner que l'érable rouge était de faible qualité et peu vigoureux, étant à sa limite nord près du 48^e parallèle, où l'expérience a été menée. Comme signalé après la phase d'établissement (Prévost et Dumais 2014), des conditions écologiques limites peuvent avoir réduit la capacité de réaction des gaules d'érable rouge au dégagement final. Les données suggèrent aussi que les conditions extrêmes liées au découvert peuvent avoir contribué à la faible survie du bouleau à papier, qui s'est établi rapidement après la coupe finale, tandis que le noisetier à long bec s'est emparé d'une part de l'espace de croissance par reproduction végétative (Tappeiner 1971).

Contrairement aux feuillus, les conifères ont été touchés autant par la mortalité sur pied que par le chablis dans les trois intensités de coupe partielle (Tableau 4). Tandis que la mortalité sur pied a été graduelle, la majorité du chablis est survenu rapidement après la coupe finale, entre la fin de l'automne 2013 et juin 2014, et ce, dans deux groupes d'unités expérimentales voisines. Puisque ces unités étaient localisées en haut de pente de sentiers de débardage menant aux deux jetées, nous croyons que le vent a été canalisé à partir des espaces ouverts adjacents (voir Ruel *et al.* 2003). Ainsi, l'exposition topographique et le réseau de sentiers ont interagi pour les dommages causés par le vent dans cette étude menée dans les hautes collines de Charlevoix. Plus précisément, le synchronisme entre des vents extrêmes et la coupe finale a probablement été le facteur déterminant pour le chablis (voir Mitchell 2013).

Notre constatation que le chablis peut affecter une partie de la régénération préétablie dégagée après la coupe finale du système de coupe progressive mérite d'être approfondie. Comme observé dans d'autres études (p. ex., Thorpe *et al.* 2008; MacIsaac et Krygier 2009), la majorité du chablis est survenu dans les premières années après la coupe finale, et après 5 ans la période critique devrait être passée. Selon Riopel *et al.* (2010), les pertes potentielles sont une contrainte majeure à l'application opérationnelle de la CPPTM dans les forêts de conifères. Ces auteurs ont suggéré de considérer la faible valeur marchande des tiges perdues ($DHP \leq 15,0$ cm) et le gain potentiel à long terme des tiges survivantes pour évaluer l'acceptabilité de ces pertes. Bien que les petits conifères marchands aient été les plus touchés dans cette étude, le taux global sous 10 % apparaît acceptable (Tableau 4), compte tenu des gains de croissance en DHP et en hauteur observés sur les tiges vivantes (Fig. 3). Nous concluons que la rétention des petits conifères marchands contribuera certainement à raccourcir la période de révolution dans ce peuplement.

Le sapin baumier est connu pour avoir une plus grande capacité de réaction au dégagement que l'épinette (Davis 1989). Toutefois, l'évolution de la hauteur et du DHP des conifères après la coupe finale n'a pas confirmé notre troisième hypothèse relativement à une plus forte réponse de croissance pour le sapin comparé à l'épinette (Fig. 3). À l'inverse, il y a une indication claire que l'épinette a été capable de rivaliser avec le sapin baumier, bien que l'avantage de 5 % du DHP pour l'épinette ait été marginal en termes biologiques. Il s'agit d'un résultat intéressant, puisque le maintien de la composante d'épinettes des peuplements mixtes boréaux est un enjeu important. De plus, l'analyse de la hauteur des conifères pour deux classes de DHP confirme la capacité des petites tiges marchandes de s'emparer de l'espace de croissance et de maintenir une position dominante à la suite de la coupe finale (Pothier *et al.* 1995).

Incidences pour l'aménagement

Dans le cadre élargi de cette étude, il a déjà été démontré que la coupe d'établissement du système de coupe progressive en deux phases peut limiter la régénération du tremble dans un peuplement mixte dominé par le tremble et présentant une dense régénération de conifères. Cependant, afin d'évaluer la valeur globale du système de coupe progressive en deux phases basée sur la régénération préétablie, il était nécessaire d'estimer les effets de la coupe finale. Bien qu'une période de 5 ans puisse être courte pour tirer des conclusions solides, il est possible d'établir des lignes directrices pertinentes. La coupe d'établissement a limité le développement du tremble jusqu'à un prélèvement de 65 % de la ST. Les résultats indiquent que, en dépit d'un certain dépérissement du bouleau à papier durant la phase d'établissement, cette forte intensité de coupe a enlevé une grande partie du potentiel de drageonnement avant la coupe finale, tout en augmentant la croissance des conifères et, en retour, a mené au meilleur contrôle du tremble durant les premières années après la coupe finale. Ainsi, il serait recommandé d'enlever jusqu'aux deux tiers de la ST et autant de trembles que possible lors de la coupe d'établissement, afin de maintenir une plus grande proportion de conifères dans le nouveau peuplement. Des observations à long terme indiqueront comment l'intensité de récolte à chaque étape peut influencer la dynamique, la composition et

le développement structural du peuplement. En ce qui a trait à la coupe à 100 %, les conifères constituaient les deux tiers de la densité des tiges dans la classe la plus haute après 17 ans, et cette proportion devrait persister dans le futur. Cela soutient une conclusion antérieure (Prévost et DeBlois 2014) selon laquelle des petites coupes totales par trouées pourraient être une solution de rechange pour le maintien d'une proportion de conifères en présence d'une dense régénération préétablie.

La protection de la régénération préétablie de conifères durant les coupes d'établissement et finale était très importante afin de conférer un avantage concurrentiel sur les drageons de tremble. La rétention des petits conifères marchands a contribué au dépérissement du tremble et à l'occupation rapide du site par les conifères. Bien que quelques-unes des plus grosses tiges aient été renversées lors d'un vent extrême après la coupe finale, les pertes globales sont demeurées acceptables. Néanmoins, il pourrait être approprié de récolter toutes les tiges marchandes durant la coupe finale sur des sites présentant un risque élevé de chablis.

Remerciements

Nous remercions Daniel Dumais et Patricia Raymond pour la révision d'une version préliminaire de ce manuscrit, Carole Coursolle pour son aide à la révision de l'anglais, ainsi qu'Aimée LeBreton et Denise Tousignant pour la révision linguistique de la traduction en français. Le rédacteur adjoint et deux réviseurs anonymes sont également remerciés pour leurs commentaires utiles. Les auteurs sont aussi redevables à la Coop Quatre Temps, à Abitibi-Consolidated Inc. (Produits forestiers résolu) et au personnel régional du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFPQ) pour leur excellente collaboration à différents stades de cette étude. Des remerciements sincères s'adressent également à Jean-Pierre Lapointe, Maurice Gagnon, Julie Forgues, Carlo Gros-Louis, Daniel Guimond, Serge Williams, Pascal Lainé, Étienne Du Berger et Christian Villeneuve et aux nombreux étudiants d'été pour leur excellent travail de terrain au cours des années. Cette étude fait partie du projet 142332016 de la Direction de la recherche forestière, MFFPQ.

Références

- Bladon, K.D., U. Silins, S.M. Landhäuser et V.J. Lieffers. 2006. Differential transpiration by three boreal tree species in response to increased evaporative demand after variable retention harvesting. *Agric. For. Met.* 138: 104–119.
- Busby, P.E., P. Alder, T.L. Warren et F.J. Swanson. 2006. Fate of live trees retained in forest cutting units, western Cascade Range, Oregon. *Can. J. For. Res.* 36: 2550–2560.
- Davis, W.C. 1989. The role of released advance growth in the development of spruce-fir stands in eastern Maine. PhD Diss., Yale Univ., New Haven, CT.
- Edgar, C.B. et T.E. Burk. 2001. Productivity of aspen forests in northeastern Minnesota, U.S.A., as related to stand composition and canopy structure. *Can. J. For. Res.* 31: 1019–1029.
- Greene, D.F., J.C. Zasada, L. Sirois, D. Kneeshaw, H. Morin, I. Charron et M.-J. Simard. 1999. A review of the regeneration dynamics of North American boreal forest tree species. *Can. J. For. Res.* 29: 824–839.
- Greene, D.F., D.D. Kneeshaw, C. Messier, V. Lieffers, D. Cormier, R. Doucet, K.D. Coates, A. Groot, G. Grover et C. Calogeropoulos. 2002. Modelling silvicultural alternatives for conifer regeneration in boreal mixedwood stands (aspen/white spruce/balsam fir). *For. Chron.* 78: 281–295.

- Grondin, P., L. Bélanger, V. Roy, J. Noël et D. Hotte. 2003.** Envaississement des parterres de coupe par les feuillus de lumière (enfeuillage). Dans P. Grondin et A. Cimon (Coord.). Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière. pp. 131–174. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière et Direction de l'environnement forestier.
- Groot, A., R. Man et J. Wood. 2009.** Spatial and temporal patterns of *Populus tremuloides* regeneration in small forest openings in northern Ontario. *For. Chron.* 85: 548–557.
- Groot, A., J.-M. Lussier, A.K. Mitchell et D.A. MacIsaac. 2005.** A silvicultural systems perspective on changing Canadian forestry practices. *For. Chron.* 81: 50–55.
- Iacobucci, D. 2001.** Journal of Consumer Psychology's Special Issue on Methodological and Statistical Concerns of the Experimental Behavioral Researcher. *J. Consum. Psychol.* 10: 5–35.
- Jactel, H., E. Brockerhoff et P. Duelli. 2005.** A test of the biodiversity-stability theory: meta-analysis of tree species diversity effects on insects pest infestations, and re-examination of responsible factors. *Ecol. Stud.* 176: 235–262.
- Kabzems, R., A.L. Nemeć et C. Farnden. 2007.** Growing trembling aspen and white spruce intimate mixtures: Early results (13–17 years) and future projections. *BC J. Ecosys. Manage.* 8: 1–14.
- Laquerre, S., A. Leduc et B.D. Harvey. 2009.** Augmentation du couvert en peuplier faux-tremble dans les pessières noires du nord-ouest du Québec après coupe totale. *Ecoscience* 16: 483–491.
- Lavoie, S., J.-C. Ruel, Y. Bergeron et B.D. Harvey. 2012.** Windthrow after group and dispersed tree retention in eastern Canada. *For. Ecol. Manage.* 269: 158–167.
- MacDonald, G.B. 1995.** The case for boreal mixedwood management: An Ontario perspective. *For. Chron.* 71: 725–734.
- MacDonald, G.B. et D.J. Thompson. 2003.** Responses of planted conifers and natural hardwood regeneration to harvesting, scalping, and weeding on a boreal mixedwood site. *For. Ecol. Manage.* 182: 213–230.
- MacIsaac, D.A. et R. Krygier. 2009.** Development and long-term evaluation of harvesting patterns to reduce windthrow risk of understory spruce in aspen – white spruce mixedwood stands in Alberta, Canada. *Forestry*, 82: 323–342.
- MacPherson, D.M., V.J. Liefers et P.V. Blenis. 2001.** Productivity of aspen stands with and without a spruce understory in Alberta's boreal mixedwood forests. *For. Chron.* 77: 351–356.
- Man, R. et V.J. Liefers. 1999.** Are mixtures of aspen and white spruce more productive than single species stands? *For. Chron.* 75: 505–513.
- Man, R., G.J. Kayahara, J.A. Rice et G.B. MacDonald. 2008.** Eleven-year responses of a boreal mixedwood stand to partial harvesting: Light, vegetation, and regeneration dynamics. *For. Ecol. Manage.* 255: 697–706.
- Matthews, J.D. 1989.** *Silvicultural Systems*. Clarendon Press, Oxford, UK.
- Milliken, G.A. et D.E. Johnson. 2002.** Analysis of messy data. Vol. 3: Analysis of covariance, Chapman and Hall/CRC Press, Boca Raton, FL.
- Mitchell, S.J. 2013.** Wind as a natural disturbance agent in forests: A synthesis. *Forestry* 86: 147–157.
- Nyland, R.D. 2002.** *Silviculture: Concepts and Applications*. 2nd ed. Waveland Press, Inc., Long Grove, IL.
- Perala, D.A. 1990.** Quaking aspen – *Populus tremuloides* Michx. In: R.M. Burns and B.H. Honkala (éds.). *Silvics of North America*. pp. 555–569. USDA For. Serv. Agric. Handb. No. 654, vol. 2. Hardwoods. Washington, DC.
- Pothier, D., R. Doucet et J. Boily. 1995.** The effect of advance regeneration height on future yield of black spruce. *Can. J. For. Res.* 25: 536–544.
- Pothier, D., F. Raulier et M. Riopel. 2004.** Ageing and decline of trembling aspen stands in Quebec. *Can. J. For. Res.* 34: 1251–1258.
- Prévost, M. et D. Pothier. 2003.** Partial cuts in a trembling aspen – conifer stand: effects on microenvironmental conditions and regeneration dynamics. *Can. J. For. Res.* 33: 1–15.
- Prévost, M. et J. DeBlois. 2014.** Shelterwood cutting to release coniferous advance growth and limit aspen sucker development in a boreal mixedwood stand. *For. Ecol. Manage.* 323: 148–157.
- Prévost, M. et D. Dumais. 2014.** Shelterwood cutting in a boreal mixedwood stand: 10-year effects of the establishment cut on growth and mortality of merchantable residual trees. *For. Ecol. Manage.* 330: 94–104.
- Prévost, M., D. Dumais et D. Pothier. 2010.** Growth and mortality following partial cutting in a trembling aspen – conifer stand: results after 10 years. *Can. J. For. Res.* 40: 894–903.
- Prévost, M., D. Dumais et J. DeBlois. 2016.** Morphological response of conifer advance growth to canopy opening in mixedwood stands, in Quebec, Canada. *Trees* 30: 1735–1747.
- Riopel, M., J. Bégin et J.-C. Ruel. 2010.** Probabilités de pertes de tiges individuelles, cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes, dans des forêts résineuses du Québec. *Can. J. For. Res.* 40: 1458–1472.
- Ruel, J.-C., P. Raymond et M. Pineau. 2003.** Windthrow after shelterwood cutting in balsam fir stands. *North. J. For. Res.* 20: 5–13.
- Ruel, J.-C., D. Fortin et D. Pothier. 2013.** Partial cutting in old-growth boreal stands: An integrated experiment. *For. Chron.* 89: 360–369.
- Ruel, J.-C., C.P. Quine, S. Meunier et J. Suarez. 2000.** Estimating windthrow risk in balsam fir stands with the *ForestGales* model. *For. Chron.* 76: 329–335.
- Saucier, J.-P., P. Grondin, A. Robitaille, J. Gosselin, C. Morneau, P.J.H. Richard, J. Brisson, L. Sirois, A. Leduc, H. Morin, É. Thiffault, S. Gauthier, C. Lavoie et S. Payette. 2009.** *Écologie forestière*. Dans *Ordre des ingénieurs forestiers du Québec* (éd.). *Manuel de foresterie*, 2^e éd. pp. 165–315. Ouvrage collectif, Éditions Multimondes, Québec, QC.
- Schier, G.A. 1973.** Origin and development of aspen root suckers. *Can. J. For. Res.* 3: 45–53.
- Schier, G.A. et A.D. Smith. 1979.** Sucker regeneration in a Utah aspen clone after clearcutting, partial cutting, scarification and girdling. *USDA For. Serv. Res. Note INT-253*.
- Smith, D.M., B.C. Larson, M.J. Kelty et P.M.S. Ashton. 1997.** *The Practice of Silviculture: Applied Forest Ecology*. 9th ed. John Wiley & Sons Inc. New York, NY.
- Su, Q., T.D. Needham et D.A. MacLean. 1996.** The influence of hardwood content on balsam fir defoliation by spruce budworm. *Can. J. For. Res.* 26: 1620–1628.
- Tappeiner, J.C. 1971.** Invasion and development of beaked hazel in red pine stands in northern Minnesota. *Ecol.* 52: 514–519.
- Thorpe, H.C., S.C. Thomas et J.P. Caspersen. 2008.** Tree mortality following partial harvests is determined by skidding proximity. *Ecol. Appl.* 18: 1652–1663.
- Urgenson, L.S., C.B. Halpern et P.D. Anderson. 2013.** Level and pattern of overstory retention influence rates and forms of tree mortality in mature, coniferous forests of the Pacific Northwest, USA. *For. Ecol. Manage.* 308: 116–127.
- Westfall, P.H. 1997.** Multiple Testing of General Contrasts Using Logical Constraints and Correlations. *J. Am. Stat. Ass.* 92: 299–306.
- Westfall, P.H., R.D. Tobias et R.D. Wolfinger. 2011.** *Multiple Comparisons and Multiple Tests Using SAS* (2nd ed.). SAS[®] Press, Cary, NC.
- Winer, B.J. 1971.** *Statistical principles in experimental design* 2nd ed. New York, McGraw-Hill.