



## Acclimatation de la basse régénération d'épinette et de sapin dans des trouées sylvicoles de différentes superficies en forêt mixte tempérée : développement après 15 ans

Daniel Dumais, ing.f., M. Sc.\* et Marcel Prévost, ing.f., Ph. D.

### Résumé

La régénération préétablie de sapin baumier (*Abies balsamea*) et d'épinette rouge (*Picea rubens*), une essence en raréfaction, joue un rôle essentiel dans le renouvellement des bétulaies jaunes résineuses du Québec. Le peu d'information disponible sur leur développement relatif fait qu'il est difficile d'anticiper les effets des interventions sylvicoles sur ces 2 essences, qui se concurrencent souvent. Nous avons utilisé un dispositif expérimental mis en place en 2003 dans une bétulaie jaune résineuse des Appalaches pour étudier la survie, l'acclimatation, l'état de santé et le développement de la basse régénération préétablie de ces 2 essences (hauteur initiale de 0,3 m à 1,3 m) dans des trouées de différentes superficies (petite = < 100 m<sup>2</sup>; moyenne = 100–300 m<sup>2</sup>; grande = 700 m<sup>2</sup>). Après 5 ans, nos données écophysiologicals avaient démontré que les moyennes trouées facilitaient l'acclimatation de l'épinette rouge préétablie aux conditions d'ouverture du couvert. Dans ce traitement, contrairement aux 2 autres, l'épinette arrivait à concurrencer le sapin. Dix ans plus tard, nous avons pris de nouvelles données pour vérifier si ces effets perduraient à moyen terme. Après 15 ans, les 2 essences ont atteint une hauteur maximale de 3,5 m, mais en accord avec les croissances observées, cela n'a été le cas que dans les moyennes trouées pour l'épinette et dans les grandes trouées pour le sapin. Dans leur ensemble, les résultats démontrent que des trouées de 100 à 300 m<sup>2</sup> sont bénéfiques à la survie, à l'acclimatation, à la croissance et au maintien du statut compétitif de la basse régénération préétablie d'épinette rouge pendant au moins 15 ans après l'ouverture du couvert. Toutefois, la baisse de la croissance en diamètre laisse penser qu'un manque de lumière persiste. Un second traitement sylvicole pourrait s'avérer nécessaire pour maintenir le développement de cette régénération préétablie.

Mots-clés : compétition, croissance, épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.), régénération préétablie, sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), sylviculture

### Abstract

Advance regeneration of balsam fir (*Abies balsamea*) and red spruce (*Picea rubens*), a species in decline, plays a major role in the renewal of yellow birch (*Betula alleghaniensis*)–conifer stands. Because little information is available on their relative development, it is difficult to predict the effects of silvicultural treatments on these two species, which are often in competition. Therefore, we used an experimental design established in 2003 in a yellow birch–conifer stand of the Appalachian Mountains near Québec City to study the survival, acclimation, health and development of short advance regeneration of red spruce and balsam fir (initial height: 0.3 m to 1.3 m) in gaps of different sizes (small = < 100 m<sup>2</sup>; medium = 100–300 m<sup>2</sup>; large = 700 m<sup>2</sup>). Our ecophysiological monitoring showed that after 5 years, medium gaps favored the acclimation of advance red spruce to more open canopy conditions. This treatment allowed spruce to compete with fir, an effect that was not observed in small and large gaps. Ten years later, we took new data to verify if these short-term effects persisted in the medium term. After 15 years, both species reached a maximal height of 3.5 m, but in accordance with observed growth, spruce did so only in medium gaps, and fir, in large gaps. Overall, results show that gaps of 100–300 m<sup>2</sup> in area are beneficial to the survival, acclimation and growth of short red spruce advance regeneration, and that they maintain the species' competing status for at least 15 years after canopy opening. However, a decrease in diameter growth suggests that light levels remain insufficient. Thus, a supplementary silvicultural treatment could be necessary to maintain the development of this advance conifer regeneration.

Keywords: advance regeneration, balsam fir (*Abies balsamea* [L.] Mill.), competition, growth, red spruce (*Picea rubens* Sarg.), silviculture

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

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

## 1. Introduction

La sylviculture des peuplements mélangés de la forêt mixte tempérée du Québec présente de nombreux défis. Par exemple, le maintien de la proportion qu'occupent les différentes essences de conifères dans le peuplement est une tâche difficile (Larouche *et al.* 2015, Prévost *et al.* 2003, 2010), notamment en raison de la forte concurrence qu'exercent les nombreuses espèces végétales associées à cet écosystème (Archambault *et al.* 1998, Lafèche *et al.* 2000, Prévost *et al.* 2003). Cet enjeu de composition est pourtant crucial pour assurer le maintien des approvisionnements à long terme, conserver la dynamique naturelle, aménager ce type de forêt de façon durable, préserver la biodiversité et favoriser la résilience des peuplements aux perturbations naturelles ou anthropiques ainsi qu'aux changements globaux. De plus, dans les peuplements mixtes, le maintien des conifères permet d'offrir une gamme diversifiée de produits forestiers pour mieux composer avec les fluctuations imprévisibles des marchés.

La stratégie de régénération naturelle des conifères de la forêt mixte tempérée consiste principalement à établir une banque de semis et de gaules sous le couvert forestier (MRN 2013a). Il s'agit souvent de sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), d'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.), d'épinette blanche (*Picea glauca* Moench Voss) et de thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.), des essences qui tolèrent l'ombre (Niinemets et Valladares 2006). Cette régénération préétablie, qui peut prendre des décennies à se mettre en place, a un avantage compétitif par rapport aux jeunes semis qui s'installent à la suite d'une intervention sylvicole modifiant la densité du couvert forestier. En effet, les nouveaux semis, généralement petits, doivent composer avec l'envahissement plus ou moins important de la végétation concurrente qui survient communément après l'ouverture du couvert en forêt mixte (p. ex. : Prévost 2008, Prévost *et al.* 2010). En réduisant l'accès à la lumière, à l'eau et aux nutriments du sol, cette végétation diminue substantiellement le taux de survie des plantules de conifères, particulièrement celles d'épinettes, dont les réserves de carbone et d'éléments nutritifs sont minimales (Page et Cameron 2006). Puisque leur croissance racinaire est lente (Klein *et al.* 1991), les plantules d'épinettes se développent beaucoup moins vite que celles de sapin (p. ex. : Pothier et Prévost 2008). Ainsi, dans le cas de l'épinette rouge, l'établissement de semis après une intervention sylvicole est un processus long et complexe (Dumais et Prévost 2015a), si bien que la plantation d'enrichissement pourrait être nécessaire pour pallier un manque de régénération pour cette essence (Dumais *et al.* 2019a, 2019b, 2020a, 2020b).

Coûteuse, cette pratique ne peut être déployée à grande échelle et constitue une solution de dernier recours pour la réhabilitation ou la restauration du peuplement. Le capital que représente la régénération résineuse préétablie est donc un atout précieux que le sylviculteur devrait exploiter judicieusement, et ce, afin de préserver plus facilement et à moindre coût la proportion qu'occupent les différentes essences de conifères en forêt mixte.

Dans une **première étude** (Dumais et Prévost 2008a, 2008b), des données écophysiologicals que nous avons prises sur la régénération préétablie des bétulaies jaunes résineuses ont démontré qu'à court terme, des coupes partielles uniformes (CPU) prélevant 40 à 60 % de la surface terrière du peuplement favorisaient la survie, l'acclimatation\* et la reprise de croissance de la basse régénération préétablie (hauteur initiale de 0,3 m à 1,3 m inclusivement) d'épinette rouge et de sapin. Ce résultat contrastait avec le faible taux de survie observé à la suite d'une coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS, 70 × 70 m; Dumais et Prévost 2008a, 2008b). Toutefois, les densités de couvert forestier associées aux CPU (surfaces terrières résiduelles de 13 à 21 m<sup>2</sup>/ha) tendaient à favoriser davantage le sapin; à moyen terme, sa hauteur surpassait alors celle de l'épinette rouge (résultats de 15 ans; Dumais et Prévost 2015b). Par rapport à l'épinette, les gains en hauteur du sapin étaient de 40 à 120 cm. Même pour la haute régénération (hauteur initiale de 1,3 m à 4,0 m inclusivement), le sapin a atteint une hauteur de 40 % supérieure à celle de l'épinette rouge (Prévost *et al.* 2016), ce qui confirme l'avantage du sapin dans ces conditions d'ouverture partielle et uniforme du couvert (Moore *et al.* 2007). Enfin, une évaluation de l'état de santé après 20 ans a permis de constater que 20 à 40 % des épinettes rouges qui étaient suivies montraient des signes de dépérissement associé à un manque de lumière, vraisemblablement engendré par le développement rapide de la végétation concurrente et la fermeture du couvert forestier en raison du développement des arbres résiduels (Dumais et Prévost 2020).

Pour explorer d'autres avenues et en s'inspirant de la dynamique naturelle des perturbations à petite échelle de la forêt mixte tempérée (chablis, sénescence; Kneeshaw et Prévost 2007), nous avons mené une **seconde étude** sur la régénération préétablie des bétulaies jaunes résineuses. Cette fois, nous avons créé des trouées sylvicoles de différentes superficies (petites = < 100 m<sup>2</sup>;

\* Dans la présente note, l'acclimatation réfère à l'ajustement fonctionnel, ponctuel et réversible (d'ordre physiologique et/ou morphologique) d'un végétal afin de survivre et de se développer sous de nouvelles conditions environnementales.

moyennes = 100–300 m<sup>2</sup>; grandes = 700 m<sup>2</sup>; Prévost et Charette 2015, 2016). Une attention particulière a été portée lors de l'abattage manuel (directionnel) des arbres afin d'éviter le plus possible d'endommager la régénération préétablie. Cinq ans après le traitement, la meilleure acclimatation et les meilleurs taux de croissance en hauteur et en diamètre de l'épinette rouge préétablie (hauteur initiale de 0,3 m à 1,3 m inclusivement) ont été mesurés dans les moyennes trouées (Dumais et Prévost 2014a, 2014b) où, étonnamment, l'espèce a réussi à concurrencer le sapin. Dans les petites et les grandes trouées, c'est plutôt le sapin qui a dominé. Autrement dit, dans les petites trouées, la lumière insuffisante limitait la photosynthèse de l'épinette rouge, alors que dans les grandes trouées, la lumière forte par moments et les températures généralement élevées de l'air et du sol l'empêchaient de bien s'acclimater et de croître aussi rapidement que le sapin (Dumais et Prévost 2014a, 2014b). Ces résultats, qui contrastent avec ceux de la première étude (approche par CPU), méritaient toutefois d'être confirmés à moyen terme.

La présente note de recherche constitue donc la suite directe de cette seconde étude. Nous y présentons l'évolution, sur une période de 15 ans, de l'état de santé, de la survie, de la croissance en hauteur et de la croissance en diamètre des arbres-échantillons d'épinette rouge et de sapin préétablis dans des trouées sylvicoles de différentes superficies. La prise de ces nouvelles données a principalement comme objectif de vérifier si les effets physiologiques et la croissance résultante observés dans les premières années suivant l'ouverture du couvert sont représentatifs du développement à moyen terme. Nous voulons ainsi savoir si les moyennes trouées de 100–300 m<sup>2</sup> sont toujours favorables à l'épinette rouge 15 ans après l'ouverture du couvert. De façon plus générale, ces nouvelles données permettront aussi de caractériser la croissance à moyen terme de la régénération préétablie d'épinette rouge et de sapin et de comparer l'approche sylvicole par trouées avec celle par CPU (première étude). En nous basant sur nos observations antérieures, nous faisons les prédictions suivantes :

- 1) L'épinette rouge devrait, après 15 ans, avoir maintenu son statut compétitif\*\* par rapport au sapin dans les trouées de 100–300 m<sup>2</sup>, sans toutefois avoir dépassé celui-ci en hauteur;
- 2) L'épinette rouge devrait, après 15 ans, avoir amélioré son statut compétitif par rapport au sapin dans les trouées de 700 m<sup>2</sup>, sans toutefois avoir dépassé celui-ci en hauteur;

\*\* Dans la présente note, le statut compétitif d'une espèce réfère à sa capacité à concurrencer une autre espèce.

- 3) La croissance en hauteur de l'épinette rouge devrait être plus rapide dans les trouées de 100–300 m<sup>2</sup> que ce qui avait été rapporté dans les CPU de la première étude (Dumais et Prévost 2015b);
- 4) La croissance en hauteur de l'épinette rouge et du sapin évoluant dans les trouées < 100 m<sup>2</sup> devrait s'apparenter à celle observée dans les CPU de la première étude, puisqu'il s'agit d'approches similaires de récolte par pieds d'arbres;
- 5) La croissance en hauteur du sapin évoluant dans les trouées de 700 m<sup>2</sup> devrait être moindre que celle observée dans la CPRS de la première étude;
- 6) Les variations de croissance en diamètre de l'épinette rouge et du sapin devraient s'apparenter à celles de la croissance en hauteur, en ce qui concerne l'effet de la superficie des trouées et d'évolution temporelle.

Les résultats comparatifs à moyen terme présentés dans cette note de recherche apporteront de l'information supplémentaire qui sera utile à des fins de modélisation, de planification forestière et de sylviculture adaptée.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Aire d'étude, dispositif expérimental et microenvironnement

L'étude a été conduite dans une bétulaie jaune résineuse des Appalaches (46° 50' N, 70° 33' O, altitude : 400 m) d'environ 12 ha, sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, à environ 50 km à l'est de Québec. Ce secteur fait partie de la région écologique 3d (Basses-Appalaches) du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.; Saucier *et al.* 2009). La topographie y est plane, et le sol est un podzol humo-ferrique. Le climat est de type continental subpolaire et subhumide. Les moyennes annuelles de température et de précipitations sont de 3,9 °C (–12,8 °C en janvier et 18,5 °C en juillet) et de 1167 mm, dont 23 % sous forme de neige (MDDELCC 2015). Avant la coupe, le peuplement avait une surface terrière (ST) de 31 m<sup>2</sup>/ha, composée à 37 % de bouleau jaune, 23 % d'épinette rouge, 22 % de sapin baumier, 15 % d'érable rouge (*Acer rubrum* L.) et 2 % d'essences compagnes, principalement du bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marshall), et de l'érable de Pennsylvanie (*Acer pensylvanicum* L.; Prévost et Charette 2015). Les structures d'âge et de diamètre du peuplement étaient irrégulières inéquiennes et les arbres dominants avaient une hauteur moyenne de 20 m. La régénération résineuse

préétablie (> 1 m de hauteur) était composée d'épinette rouge (300 tiges/ha) et de sapin (500 tiges/ha).

Le dispositif expérimental, établi en 2003, est composé de 3 blocs aléatoires complets (répétitions) contenant chacun 4 traitements sylvicoles, appliqués sur des unités expérimentales (UE) mesurant 80 m × 80 m (figure 1) :

- 1) Un **témoin** sans intervention;
- 2) Une coupe partielle par pieds d'arbres (CPA) créant des trouées de superficie < 100 m<sup>2</sup> (ci-après nommées **petites trouées**) et prélevant au total 42 % de la ST, laissant une ST résiduelle totale d'environ 18 m<sup>2</sup>/ha;
- 3) Un traitement hybride avec CPA et coupe par petits groupes d'arbres créant 3 à 5 trouées de forme irrégulière et de superficie de 100–300 m<sup>2</sup> (**moyennes trouées**) et prélevant au total 35 % de la ST, laissant une ST résiduelle totale d'environ 20 m<sup>2</sup>/ha;
- 4) Un traitement hybride avec CPA et coupe par trouées créant dans chaque UE une trouée circulaire (30 m de diamètre) de 700 m<sup>2</sup> (**grandes trouées**) et prélevant 40 % de la ST, laissant une ST résiduelle d'environ 19 m<sup>2</sup>/ha dans le pourtour de la trouée (Prévost et Charette 2015, 2016).

Les UE avaient donc une ST résiduelle entre les trouées d'au moins 14 m<sup>2</sup>/ha. Les opérations de coupe ont été faites manuellement (scie à chaîne). Les arbres coupés ont été ébranchés sur le site et transportés en entier en bordure du chemin forestier à l'aide d'une débusqueuse à câbles Timberjack 230E (Prévost et Charette 2015). Sur le plan sylvicole, l'approche hybride utilisée permettait, entre autres, d'augmenter la vigueur du peuplement résiduel en retirant d'entre les trouées les arbres susceptibles de mourir (Nyland 2002), ce qui rentabilise aussi l'opération.

Durant les 6 premières années après la coupe, le rayonnement solaire moyen a été de 1,5 MJ/m<sup>2</sup>/j dans le témoin (traitement 1) et il a augmenté de 160 %, 230 % et 490 % dans les traitements 2, 3 et 4, respectivement (Prévost et Charette 2015). Dix ans après la coupe, le framboisier (*Rubus idaeus* L.) était la principale espèce concurrente à interférer avec la basse régénération résineuse. Son pourcentage de recouvrement était 2 fois plus élevé dans les grandes trouées (50 %) que dans les moyennes trouées (25 %; Prévost et Charette 2015).

## 2.2. Échantillonnage et mesures

Nous avons étudié le développement de la basse régénération préétablie résineuse dont la hauteur

initiale (2004, année après le traitement) était d'au moins 0,3 m et d'au plus 1,3 m (figure 2). Dans chaque UE, nous avons aléatoirement sélectionné et identifié 8 épinettes rouges et 8 sapins, pour un total de 192 arbres-échantillons (8 arbres × 2 essences × 4 traitements × 3 blocs), en nous assurant toutefois qu'ils étaient exempts d'insectes, de maladies, de broutement et de défauts morphologiques évidents. Dans le témoin et la CPA (petites trouées), ces arbres-échantillons ont été sélectionnés dans une placette centrale de 40 m × 40 m (figure 1). Dans le traitement hybride avec CPA et coupe par petits groupes d'arbres, ils ont été sélectionnés à l'intérieur des moyennes trouées. Dans le traitement hybride avec CPA et coupe par trouées, ils ont été sélectionnés à l'intérieur ou dans le pourtour immédiat (bordure nord) des grandes trouées.

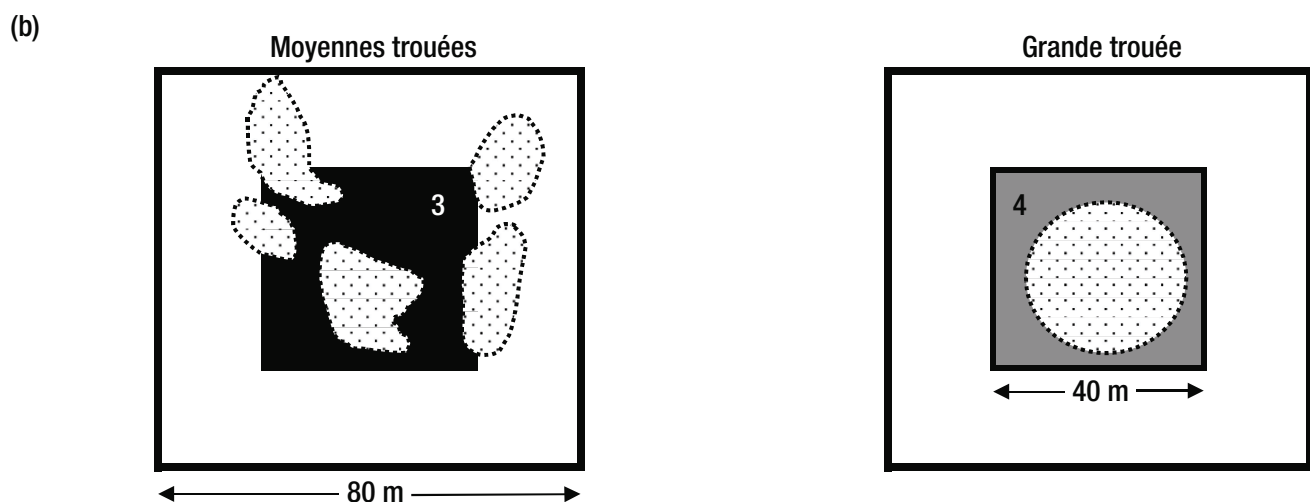
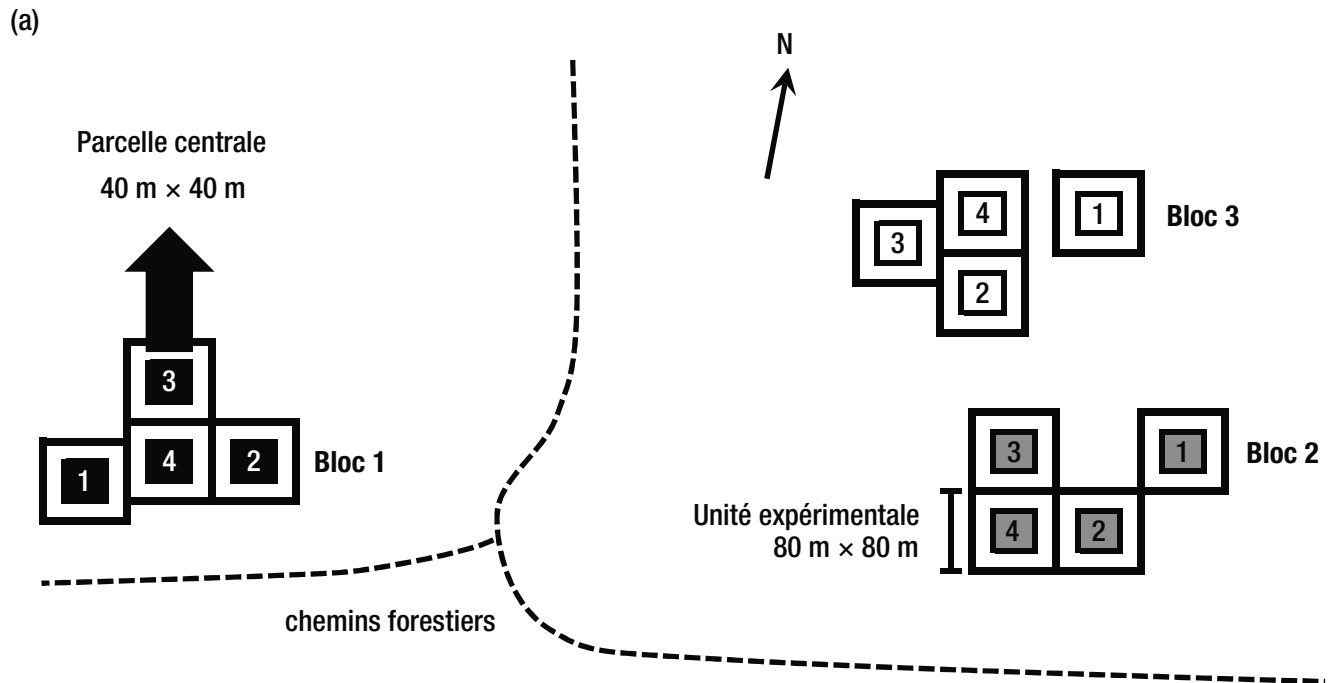
Pour chaque arbre-échantillon, nous avons mesuré la hauteur totale (cime vivante) et le diamètre à 5 cm au-dessus du sol (pour éviter le renflement du pied). Nous avons évalué visuellement l'état de santé de chaque arbre-échantillon 5, 10 et 15 ans après le traitement, selon 4 catégories : (1) plutôt sain, (2) fortement brouté, (3) dépérissant et (4) mort. Dans la catégorie 2, les arbres devaient montrer des signes évidents de broutement sur leur flèche terminale et sur la majorité de leurs branches. Dans la catégorie 3, les arbres devaient avoir perdu au moins 40 % de leur feuillage (aiguilles brunies, séchées ou tombées), par rapport aux arbres de la catégorie 1. Enfin, les arbres dont le feuillage était complètement jaune, brun, sec ou absent étaient classés dans la catégorie 4.

## 2.3. Traitement des données et analyses statistiques

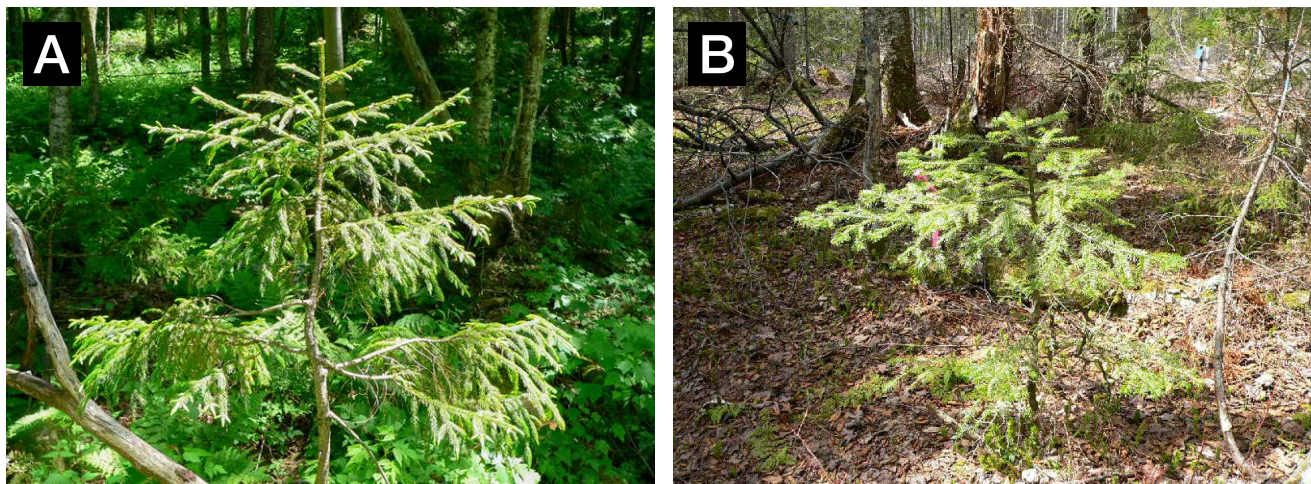
Pour chaque variable de croissance et l'état de santé (proportion occupée par chaque catégorie), la moyenne par unité expérimentale a été calculée pour tenir compte de la structure du dispositif expérimental (blocs, traitements). Les croissances annuelles moyennes en hauteur et en diamètre ont été calculées pour chaque période quinquennale (années 1–5, 6–10 et 11–15 après le traitement). Nous avons testé la relation entre la croissance en hauteur et la hauteur initiale ( $H_0$ , année 0) par régression afin de déterminer la pertinence d'inclure  $H_0$  comme covariable dans le modèle statistique (analyse de covariance), puis fait de même pour le diamètre. Les données de chaque période ont été soumises à une analyse de variance (ou de covariance, le cas échéant) en utilisant la procédure MIXED du logiciel SAS (version 9.4). La superficie des trouées (St : petite, moyenne ou grande), l'essence (E : épinette rouge

[EPR] ou sapin baumier [SAB]) et leur interaction ( $St \times E$ ) ont été considérées comme des effets fixes, alors que le bloc et ses interactions avec la superficie des trouées et l'essence ( $St \times Bloc$ ,  $E \times Bloc$  et  $St \times E \times Bloc$ ) ont été considérés comme des effets aléatoires. Des tests de comparaisons multiples ont été menés avec l'option SIMULATE (Westfall *et al.* 1999)

afin de préciser l'effet de la superficie des trouées. L'état de santé a été inclus dans le modèle en tant que variable qualitative à 4 modalités (catégories 1 à 4 décrites à la section 2.2). Pour l'ensemble des tests statistiques, un seuil de signification de  $\alpha = 0,05$  a été retenu. La normalité des résidus et l'homogénéité de la variance ont été vérifiées graphiquement.



**Figure 1.** a) Schéma du dispositif expérimental. Chacun des 3 blocs (répétitions) aléatoires comprend 4 traitements sylvicoles : (1) un témoin sans intervention, (2) une coupe partielle uniforme par pieds d'arbres (CPA) créant des petites trouées (superficie < 100 m<sup>2</sup>), (3) un traitement hybride avec CPA et coupe par petits groupes d'arbres, créant de 3 à 5 trouées moyennes de forme irrégulière (superficie de 100–300 m<sup>2</sup>), et (4) un traitement hybride avec CPA et coupe par trouées, créant dans chaque unité expérimentale une grande trouée circulaire (diamètre de 30 m; superficie de 700 m<sup>2</sup>). b) Exemples d'unités expérimentales montrant l'emplacement des trouées dans les traitements 3 (moyennes trouées) et 4 (grande trouée).



**Figure 2.** Exemples d'arbres-échantillons étudiés : a) épinette rouge et b) sapin baumier (Photos : D. Dumais, 2005).

### 3. Résultats

#### 3.1. Survie et état de santé

Le taux de survie de l'épinette rouge a été très élevé. Dans l'ensemble, près de 95 % des arbres-échantillons de cette espèce étaient toujours en vie 15 ans après le traitement. Une mortalité relativement faible de l'épinette rouge n'a été observée que dans les grandes trouées (figure 3). De plus, la plupart des épinettes rouges sont restées plutôt saines tout au long de la période d'étude. En effet, de faibles occurrences ( $\leq 10$  %) de broutement sévère et de dépérissement ont été observées au fil des années.

Étonnamment, le taux de survie du sapin baumier a été moindre, globalement, que celui de l'épinette rouge ( $p < 0,001$ ). De fait, près de 68 % des arbres-échantillons de sapin étaient toujours en vie après 15 ans. Néanmoins, la superficie des trouées n'a eu aucun effet significatif sur le taux de mortalité du sapin ( $p = 0,795$ ), qui avoisine 30 % dans tous les traitements (figure 3c). Avec une occurrence accrue de broutement sévère, le sapin a vu son état de santé se détériorer à partir de l'année 10. À cette date, la superficie des trouées a eu un effet significatif sur le broutement ( $p < 0,001$ ). Effectivement, plus d'arbres-échantillons ont été sévèrement broutés dans les petites trouées (80 %; figure 3b) que dans les moyennes (50 %) ou les grandes (30 %), alors que dans le témoin, les arbres fortement broutés étaient rares (10 %). Enfin, à l'année 15, l'occurrence de fort broutement sur le sapin a été statistiquement la même (autour de 35 %; figure 3c) dans le témoin, les petites et les moyennes trouées ( $p = 0,952$ ), mais plus faible (15 %) dans les grandes trouées ( $p = 0,004$ ).

#### 1.1. Hauteur et diamètre initiaux

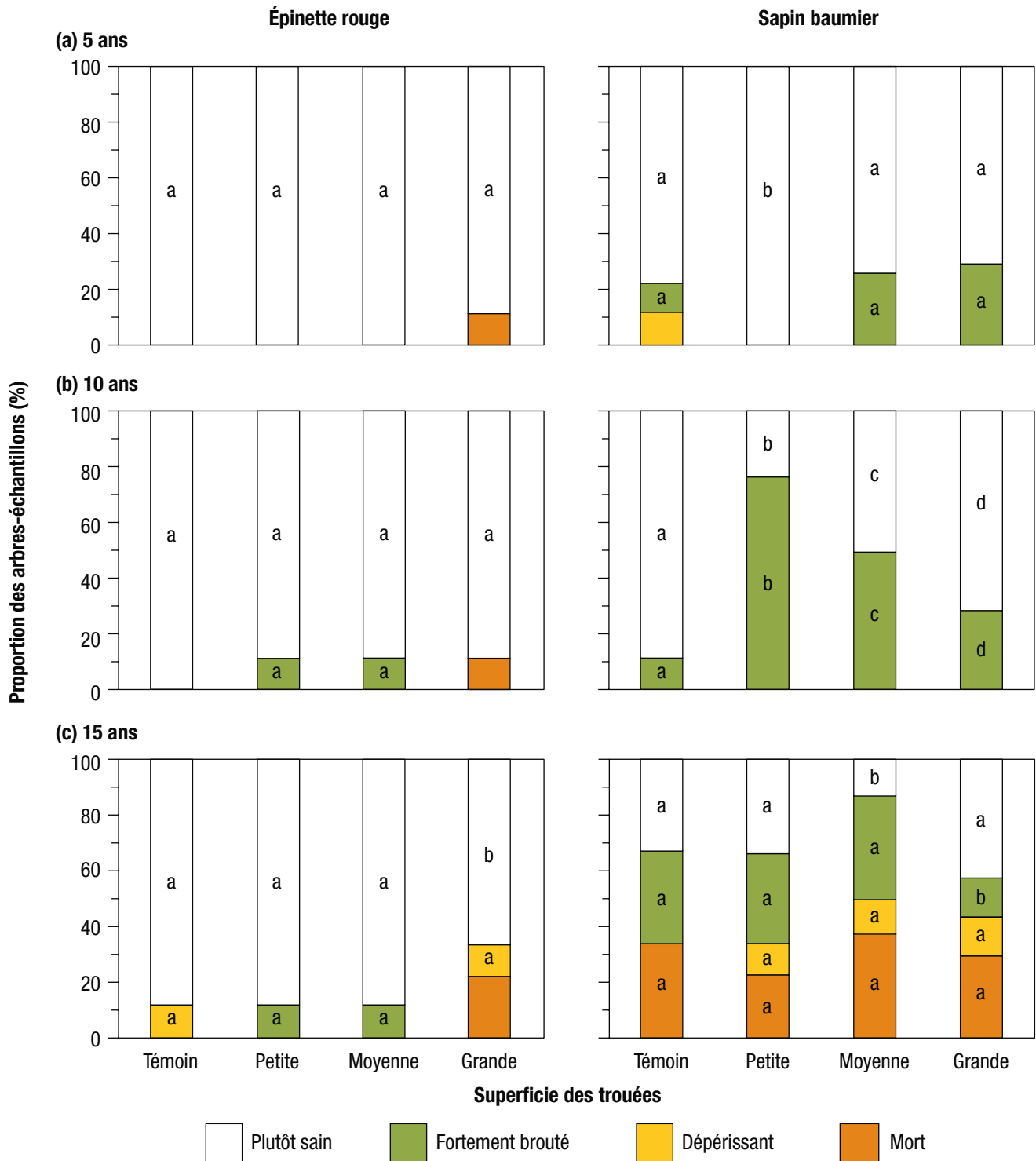
La hauteur initiale ( $H_0$ ) et le diamètre initial ( $D_0$ ) (en moyenne 0,7 m et 1,1 cm, respectivement) des arbres-échantillons n'ont pas varié significativement selon la superficie des trouées ( $p \geq 0,127$ ; tableaux 1 et 2). La  $H_0$  n'a pas non plus varié en fonction de l'essence ( $p = 0,139$ ; tableau 1), alors que le  $D_0$  de l'épinette rouge (1,3 cm) était légèrement plus gros que celui du sapin baumier (1,0 cm;  $p = 0,025$ ; tableau 2).

Les analyses de régression n'ont révélé aucune relation significative entre la croissance en hauteur et la  $H_0$  ni entre la croissance en diamètre et le  $D_0$ . Ainsi, la  $H_0$  et le  $D_0$  n'ont pas été inclus comme covariables dans les modèles statistiques (tableaux 1 et 2).

#### 1.2. Croissance en hauteur

Pour chacune des périodes quinquennales après le traitement, l'interaction entre la superficie des trouées et l'essence a été significative pour la croissance en hauteur moyenne ( $\Delta H$ ;  $p \leq 0,028$  pour  $St \times E$ ; tableau 1). Dans le témoin, la croissance a été statistiquement la même (3 cm/année;  $p \geq 0,999$ ; figure 4a) pour les 2 essences tout au long de l'étude. Toutefois, la superficie des trouées a influencé différemment la croissance de chaque essence, et ce, selon la période.

Dans la première période, la croissance en hauteur de l'épinette rouge a été statistiquement la même dans le témoin, les petites et les grandes trouées (5 cm/année;  $p \geq 0,843$ ; tableau 1, figure 4a), mais plus grande dans les moyennes trouées (15 cm/année;  $p \leq 0,025$ ). Dans la seconde et la troisième période, la croissance a été plus forte dans les moyennes (19 cm/année) et les grandes trouées (12 cm/année)



**Figure 3.** État de santé de la basse régénération préétablie d'épinette rouge et de sapin baumier (hauteur initiale de 0,3 à 1,3 m de hauteur initiale) en fonction de la superficie des trouées sylvoicoles (petites trouées = moins de 100 m<sup>2</sup>; moyennes trouées = 100–300 m<sup>2</sup>; grande trouée = 700 m<sup>2</sup>) et du nombre d'années après le traitement (5, 10 et 15 ans). Pour un même graphique et une même catégorie (couleur), des petites lettres différentes (a, b, c, d) indiquent une différence significative entre les superficies de trouées. L'erreur type maximale est de ± 5 % pour l'épinette et de ± 12 % pour le sapin.

**Tableau 1.** Probabilités ( $p > F$ ) associées à l'effet des différentes superficies des trouées sylvicole (St : petite = moins de 100 m<sup>2</sup>; moyenne = 100–300 m<sup>2</sup>; grande = 700 m<sup>2</sup>) sur la hauteur initiale ( $H_0$ , année 0), la croissance annuelle moyenne périodique en hauteur ( $\Delta H_{1-5}$ ,  $\Delta H_{5-10}$ ,  $\Delta H_{11-15}$ ) et la hauteur à l'année 15 ( $H_{15}$ ) de la basse régénération préétablie d'épinette rouge (EPR) et de sapin baumier (SAB). Les effets significatifs ( $p \leq 0,05$ ) les plus pertinents (c'est-à-dire les interactions ayant priorité sur les effets simples) sont représentés en caractère gras.

Source de variation (effets fixes*)	dl†	$H_0$	$\Delta H_{1-5}$	$\Delta H_{5-10}$	$\Delta H_{11-15}$	$H_{15}$
Superficie des trouées (St)	3	0,127	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Témoin vs petite	1	–	0,035	0,395	0,082	0,160
Témoin vs moyenne	1	–	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Témoin vs grande	1	–	0,003	0,001	< 0,001	< 0,001
Petite vs moyenne	1	–	0,188	0,005	0,003	< 0,001
Petite vs grande	1	–	0,650	0,031	< 0,001	< 0,001
Moyenne vs grande	1	–	0,780	0,779	0,119	0,996
Essence (E)	1	0,139	0,009	0,232	0,048	0,718
St × E	3	0,461	<b>0,013</b>	<b>0,028</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>0,002</b>
Témoin : EPR vs SAB	1	–	1,000	0,999	1,000	1,000
Petite : EPR vs SAB	1	–	<b>0,046</b>	0,987	0,964	1,000
Moyenne : EPR vs SAB	1	–	0,964	<b>0,048</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>0,046</b>
Grande : EPR vs SAB	1	–	<b>0,029</b>	<b>0,033</b>	<b>0,043</b>	<b>0,005</b>
EPR : témoin vs petite	1	–	0,998	<b>0,050</b>	0,245	0,606
EPR : témoin vs moyenne	1	–	<b>0,009</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
EPR : témoin vs grande	1	–	0,843	<b>0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>0,016</b>
EPR : petite vs moyenne	1	–	<b>0,023</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
EPR : petite vs grande	1	–	0,992	0,461	<b>0,015</b>	0,395
EPR : moyenne vs grande	1	–	<b>0,025</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>0,028</b>	<b>0,010</b>
SAB : témoin vs petite	1	–	<b>0,003</b>	0,460	0,670	0,508
SAB : témoin vs moyenne	1	–	<b>0,013</b>	<b>&lt; 0,001</b>	0,339	<b>0,001</b>
SAB : témoin vs grande	1	–	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
SAB : petite vs moyenne	1	–	0,991	<b>0,014</b>	0,998	<b>0,046</b>
SAB : petite vs grande	1	–	0,902	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
SAB : moyenne vs grande	1	–	0,481	<b>0,016</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>0,007</b>

\* Les effets aléatoires sont les suivants : Bloc, St × Bloc, E × Bloc, St × E × Bloc.

† dl : degrés de liberté.

que dans le témoin (3 cm/année;  $p \leq 0,001$ ), et plus forte dans les moyennes que dans les petites (8 cm/année) et grandes trouées ( $p \leq 0,028$ ).

Dans les 5 premiers ans, la croissance en hauteur du sapin baumier a été plus forte dans les trouées (14 cm/année) que dans le témoin (4 cm/année;  $p \leq 0,013$ ; tableau 1, figure 4a), sans différence significative entre les superficies des trouées ( $p \geq 0,481$ ). Dans la seconde période, la croissance a été plus forte dans les moyennes (12 cm/année) et les grandes trouées (18 cm/année) que dans le témoin (3 cm/année;  $p < 0,001$ ), et plus forte dans les grandes que dans les petites (6 cm/année) et les moyennes trouées ( $p \leq 0,016$ ). Dans la dernière période, la croissance a été statistiquement la même dans le témoin, les petites et les moyennes trouées

(4 cm/année;  $p \geq 0,339$ ), mais plus forte dans les grandes trouées (18 cm/année;  $p < 0,001$ ).

En général, sur 15 ans, l'épinette a mieux poussé en hauteur que le sapin dans les moyennes trouées ( $p \leq 0,048$ ; tableau 1, figure 4a), alors que le sapin a mieux poussé que l'épinette dans les grandes trouées ( $p \leq 0,043$ ). Ces différents effets sur la croissance ont mené à des écarts significatifs dans la hauteur à l'année 15 (figure 4b). Les épinettes se trouvant dans les moyennes trouées étaient plus hautes (3,4 m) que celles se trouvant dans les petites (1,7 m) et grandes trouées (2,3 m;  $p \leq 0,010$ ; tableau 1), mais les valeurs dans ces 2 derniers traitements n'étaient pas statistiquement différentes l'une de l'autre ( $p = 0,395$ ). Quant aux sapins, ceux poussant dans les grandes trouées étaient plus grands (3,5 m) que ceux



**Tableau 2.** Probabilités ( $p > F$ ) associées à l'effet des différentes superficies des trouées sylvicole (St : petite = moins de 100 m<sup>2</sup>; moyenne = 100–300 m<sup>2</sup>; grande = 700 m<sup>2</sup>) sur le diamètre initial ( $D_0$ , année 0), la croissance annuelle moyenne périodique en diamètre ( $\Delta D_{1-5}$ ,  $\Delta D_{6-10}$ ,  $\Delta D_{11-15}$ ) et le diamètre à l'année 15 ( $D_{15}$ ) de la basse régénération préétablie d'épinette rouge (EPR) et de sapin baumier (SAB). Les effets significatifs ( $p \leq 0,05$ ) les plus pertinents (c'est-à-dire les interactions ayant priorité sur les effets simples) sont représentés en caractère gras.

Source de variation (effets fixes*)	dl <sup>†</sup>	$D_0$	$\Delta D_{1-5}$	$\Delta D_{6-10}$	$\Delta D_{11-15}$	$D_{15}$
Superficie des trouées (St)	3	0,366	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Témoin vs petite	1	–	< 0,001	0,002	0,291	0,046
Témoin vs moyenne	1	–	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Témoin vs grande	1	–	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Petite vs moyenne	1	–	0,007	< 0,001	0,001	< 0,001
Petite vs grande	1	–	0,045	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Moyenne vs grande	1	–	0,768	0,722	< 0,001	0,468
Essence (E)	1	<b>0,025</b>	0,091	0,935	0,037	0,435
St × E	3	0,931	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
Témoin : EPR vs SAB	1	–	0,999	0,997	0,538	0,996
Petite : EPR vs SAB	1	–	<b>0,004</b>	0,120	0,788	0,968
Moyenne : EPR vs SAB	1	–	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
Grande : EPR vs SAB	1	–	<b>0,002</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>0,001</b>
EPR : témoin vs petite	1	–	0,179	0,519	0,951	0,920
EPR : témoin vs moyenne	1	–	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
EPR : témoin vs grande	1	–	<b>0,005</b>	<b>&lt; 0,001</b>	0,073	<b>0,039</b>
EPR : petite vs moyenne	1	–	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
EPR : petite vs grande	1	–	0,577	0,026	0,416	0,303
EPR : moyenne vs grande	1	–	<b>0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>
SAB : témoin vs petite	1	–	<b>&lt; 0,001</b>	<b>0,010</b>	0,788	0,399
SAB : témoin vs moyenne	1	–	<b>0,020</b>	0,208	0,997	0,349
SAB : témoin vs grande	1	–	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
SAB : petite vs moyenne	1	–	0,099	0,713	0,985	0,998
SAB : petite vs grande	1	–	0,385	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>
SAB : moyenne vs grande	1	–	<b>0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>&lt; 0,001</b>

\* Les effets aléatoires sont les suivants : Bloc, St × Bloc, E × Bloc, St × E × Bloc.

† dl : degrés de liberté.

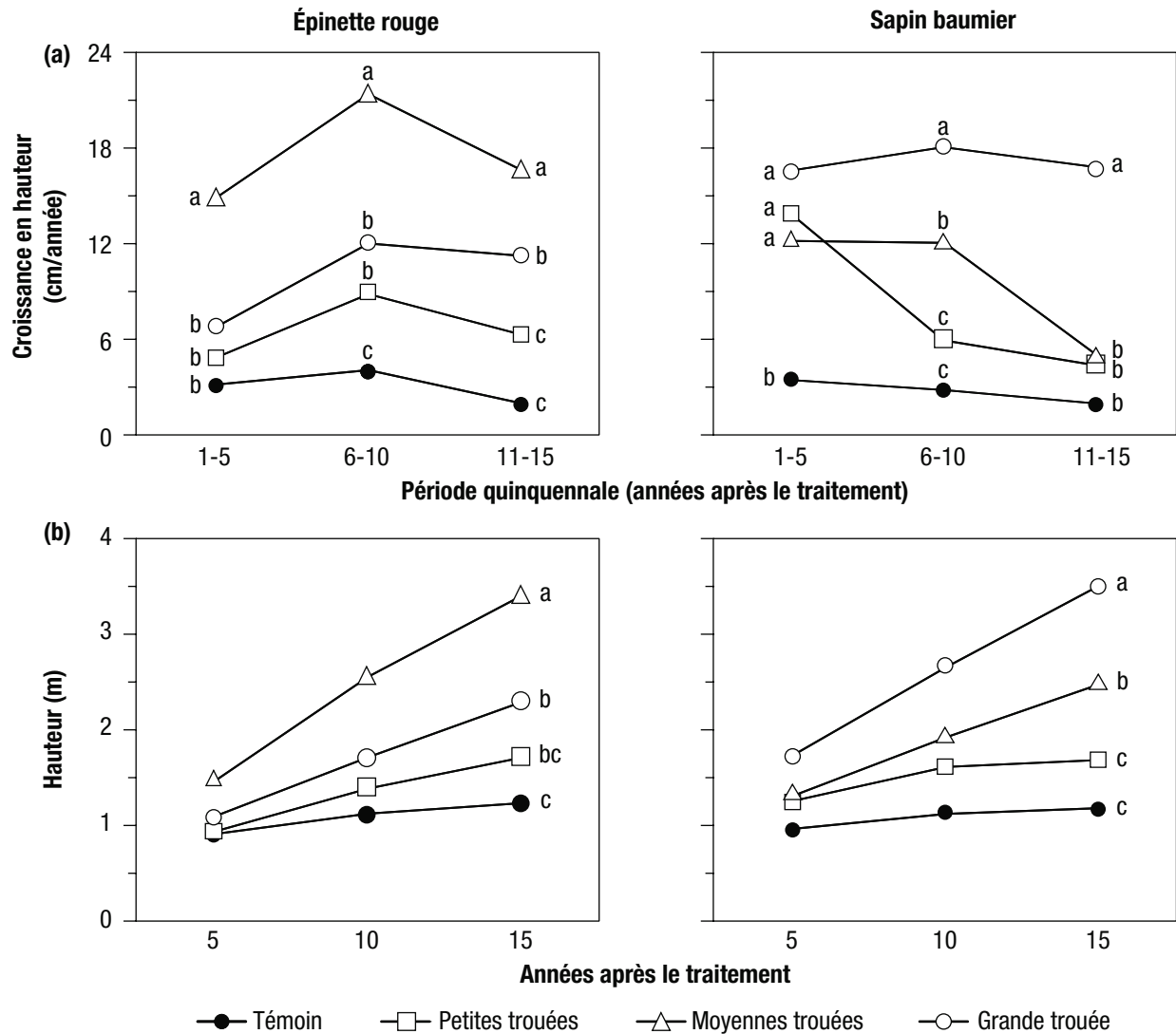
poussant dans les petites (1,7 m) et les moyennes trouées (2,5 m;  $p \leq 0,007$ ), tandis que les hauteurs dans ces 2 derniers traitements étaient différentes l'une de l'autre ( $p = 0,046$ ). Enfin, la hauteur maximale atteinte par chaque essence n'a pas été statistiquement différente (3,4 m pour l'épinette rouge par rapport à 3,5 m pour le sapin;  $p = 0,997$ ), mais, en accord avec les effets de croissance observés, l'épinette rouge a atteint cette hauteur dans les moyennes trouées, alors que le sapin l'a atteint dans les grandes trouées (figure 4b).

### 3.2. Croissance en diamètre

Pour chacune des périodes, l'interaction entre la superficie des trouées et l'essence a été significative pour la croissance en diamètre moyenne ( $\Delta D$ ,

$p < 0,001$  pour St × E; tableau 2). Dans le témoin, la croissance sur 15 ans a été statistiquement la même (env. 1 mm/année;  $p \geq 0,538$ ) pour les 2 essences (figure 5a). Toutefois, la superficie des trouées a influencé différemment la croissance de chaque essence, et ce, selon la période.

Au cours des 3 périodes, la croissance en diamètre de l'épinette rouge a été statistiquement la même dans le témoin et les petites trouées (env. 1 mm/année;  $p \geq 0,179$ ; tableau 2, figure 5a), mais généralement supérieure à celle du témoin dans les moyennes (env. 3 mm/année;  $p < 0,001$ ) et les grandes trouées (env. 2 mm/année;  $p \leq 0,005$ , excepté à la dernière période où  $p = 0,073$ ). Tout au long de l'étude, la croissance en diamètre de l'épinette rouge a toujours été meilleure dans les moyennes trouées



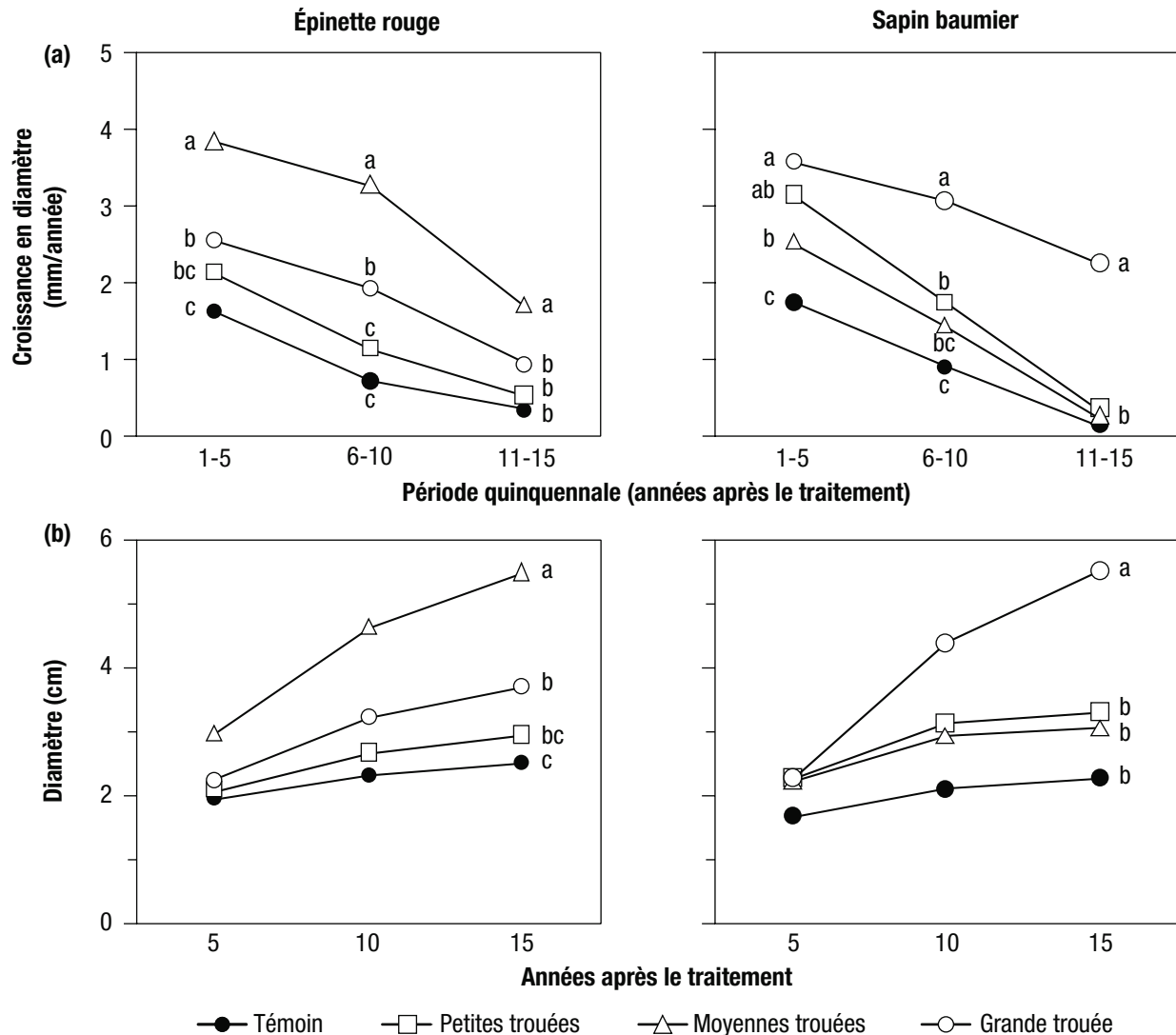
**Figure 4.** a) Croissance annuelle moyenne en hauteur de la basse régénération préétablie d'épinette rouge et de sapin baumier (hauteur initiale de 0,3 à 1,3 m) en fonction de la superficie des trouées sylvicoles (petites trouées = moins de 100 m<sup>2</sup>; moyennes trouées = 100–300 m<sup>2</sup>; grande trouée = 700 m<sup>2</sup>) et de la période quinquennale (années après le traitement). L'erreur type maximale est de ± 1,5 cm/année pour l'épinette et ± 2,8 cm/année pour le sapin. b) Hauteur de cette même régénération en fonction de la superficie des trouées et du nombre d'années (5, 10 et 15 ans) après le traitement. Pour un même graphique et une même période (années), des petites lettres différentes (a, b, c) indiquent une différence significative entre les traitements. L'erreur type maximale est de ± 0,37 m pour l'épinette et ± 0,49 m pour le sapin.

que dans tous les autres traitements ( $p \leq 0,002$ ). Sa croissance en diamètre dans les grandes trouées a été statistiquement équivalente à celle dans les petites trouées (env. 1,5 mm/année;  $p \geq 0,416$ ), à l'exception de la seconde période (2,0 mm/année pour les grandes trouées par rapport à 1,2 mm/année pour les petites trouées;  $p = 0,026$ ).

Dans les 5 premières années, la croissance en diamètre du sapin a été plus forte dans les trouées (3,1 mm/année) que dans le témoin (1,8 mm/année;  $p \leq 0,020$ ; tableau 2, figure 5a). Dans les 2 périodes

suivantes, la croissance a été plus forte dans les grandes trouées (2,7 mm/année en moyenne) que dans les petites et moyennes trouées, dans lesquelles les croissances ont été statistiquement les mêmes (1 mm/année en moyenne;  $p < 0,001$ ).

En général, sur 15 ans, l'épinette rouge a mieux poussé en diamètre que le sapin dans les moyennes trouées ( $p < 0,001$ ; tableau 2, figure 5a), alors que le sapin a mieux poussé que l'épinette rouge dans les grandes trouées ( $p \leq 0,002$ ). Pour les 2 essences, la croissance en diamètre a chuté avec le temps



**Figure 5.** (a) Croissance annuelle moyenne en diamètre de la basse régénération préétablie d'épinette rouge et de sapin baumier (hauteur initiale de 0,3 à 1,3 m) en fonction de la superficie des trouées sylvicoles (petites trouées = moins de 100 m<sup>2</sup>; moyennes trouées = 100–300 m<sup>2</sup>; grande trouée = 700 m<sup>2</sup>) et de la période quinquennale (années après le traitement). L'erreur type maximale est de  $\pm 0,6$  mm/année pour l'épinette et  $\pm 0,4$  mm/année pour le sapin. (b) Diamètre de cette même régénération en fonction de la superficie des trouées et du nombre d'années (5, 10 et 15 ans) après le traitement. Pour un même graphique et une même période (années), les petites lettres différentes (a, b, c) indiquent une différence significative entre les traitements. L'erreur type maximale est de  $\pm 0,7$  cm pour l'épinette et  $\pm 0,9$  cm pour le sapin.

(figure 5a). Les effets précédents ont mené à des écarts significatifs dans le diamètre à l'année 15 (figure 5b). Celui des épinettes rouges se trouvant dans les moyennes trouées était plus gros (5,5 mm) que celui des épinettes rouges se trouvant dans les petites (2,9 mm) et les grandes trouées (3,7 mm;  $p \leq 0,002$ ), alors que ceux observés dans ces 2 derniers traitements n'étaient statistiquement pas différents ( $p = 0,303$ ). Le diamètre des sapins poussant dans les grandes trouées était plus gros

(5,5 mm) que celui de ceux poussant dans les petites (3,3 mm) et les moyennes trouées (3,1 mm;  $p < 0,001$ ), les valeurs dans ces 2 derniers traitements étant statistiquement équivalentes ( $p = 0,998$ ). Enfin, comme pour la hauteur, le diamètre maximal atteint par chaque essence a été le même (5,5 mm), mais l'épinette rouge l'a atteint dans les moyennes trouées, alors que le sapin l'a atteint dans les grandes trouées (figure 5b).

## 4. Discussion

La régénération préétablie joue un rôle prépondérant pour maintenir la proportion de conifères au sein des bétulaies jaunes résineuses aménagées. Le peu d'information disponible sur leur développement à moyen terme après l'ouverture du couvert forestier fait qu'il est difficile de déterminer quelles sont les stratégies sylvicoles à adopter. Cela complique aussi l'anticipation et la modélisation de son recrutement futur dans les étages supérieurs du peuplement. Les résultats de 15 ans de suivi que nous présentons ici permettent de combler une partie de cette lacune. Ils dressent le portrait de la dynamique et des facteurs qui ont influencé la croissance en hauteur et en diamètre de la basse régénération préétablie d'épinette rouge et de sapin baumier dans des trouées sylvicoles d'une bétulaie jaune résineuse en forêt mixte tempérée. Par ailleurs, les superficies de trouées que nous avons testées (< 100 m<sup>2</sup> à 700 m<sup>2</sup>) sont compatibles avec la dynamique naturelle de régénération de ces conifères dans ce type de forêt (Kneeshaw et Prévost 2007); elles respectent ainsi les principes de l'aménagement écosystémique, contrairement à la CPRS (Hébert 2003, Laflèche *et al.* 2000, Prévost 2008, Raymond et Bédard 2017), par exemple.

### 4.1. Survie et état de santé

Le taux de survie de l'épinette rouge a été plutôt élevé dans la présente étude, malgré la sensibilité connue de cette essence aux perturbations du microenvironnement (Dumais et Prévost 2007). Seules les grandes trouées (700 m<sup>2</sup>) ont été associées à de la mortalité à moyen terme (figure 3c). Celle-ci provient vraisemblablement d'épinettes qui n'ont pu récupérer du stress physiologique engendré par les conditions environnementales extrêmes rencontrées dans ces grandes trouées (Dumais et Prévost 2014a, 2014b). Or, d'après nos résultats, ce dépérissement est graduel, et une quinzaine d'années peuvent s'écouler avant que l'on puisse détecter des pertes notables dans la régénération préétablie d'épinette rouge ayant été confrontée à ce genre de stress. Il n'y a toutefois pas eu de mortalité excessive d'épinettes dans ces grandes trouées, contrairement à ce que nous avons précédemment observé dans la CPRS (Dumais et Prévost 2008a, 2008b).

La survie moindre du sapin, alors que cette essence est généralement plus résiliente aux perturbations que l'épinette rouge (Dumais et Prévost 2008a, 2008b, 2014a, 2014b), semble découler avant tout du broutement sévère qu'il a subi tout au long de l'étude,

particulièrement à partir de la seconde période quinquennale (figure 3b). En raison de leur faible hauteur, nos arbres-échantillons étaient facilement accessibles au cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus* Zimm.) et à l'orignal (*Alces alces* L.), omniprésents sur le site d'étude. De plus, le fait que le cerf préfère le sapin à l'épinette est bien connu (Gill 1992, Sauvé et Côté 2007).

### 4.2. Croissance en hauteur

Conformément à notre **prédiction n° 1**, les moyennes trouées (100–300 m<sup>2</sup>) ont été, pendant 15 ans, le meilleur traitement pour favoriser la croissance en hauteur de l'épinette rouge préétablie. Rappelons qu'à court terme (5 ans), ces trouées étaient aussi celles qui avaient permis la meilleure acclimatation et la meilleure croissance de l'épinette rouge (Dumais et Prévost 2014a, 2014b). Nos données écophysiologicals initiales se sont donc répercutées à plus long terme et semblent avoir prédit la superficie des trouées à privilégier pour l'épinette rouge. Dans les grandes trouées, la reprise de croissance en hauteur sur 15 ans de bon nombre d'épinettes rouges (figure 4a) porte à croire qu'elles ont fini par s'acclimater aux conditions microclimatiques créées par ce type de trouées et tirer profit de la lumière disponible (**prédiction n° 2**). Toutefois, l'acclimatation plus rapide du sapin dans ces grandes trouées et sa croissance plus rapide par la suite, malgré un peu de broutement sévère, ont tout de même creusé l'écart de hauteur entre les 2 essences, lequel est passé de 0,6 m (année 5) à 1,2 m (année 15; figure 4b). Ainsi, sur la durée de l'étude, les grandes trouées sont restées plus avantageuses pour le sapin, comme nous l'avions prévu. Il est dès lors possible que l'ombre qui sera projetée dans le futur par le sapin, devenu plus grand que l'épinette rouge, accentue le retard de celle-ci à plus long terme. Dans les petites et les moyennes trouées, la croissance moindre du sapin (figure 4a) est vraisemblablement attribuable aux effets négatifs du broutement sévère de cette essence (figure 3). Ainsi, nous ne pouvons pas nous prononcer hors de tout doute sur la véritable croissance en hauteur du sapin dans les petites et les moyennes trouées, où l'incidence de broutement a été notable, et encore moins comparer les valeurs avec celles de l'épinette rouge qui n'a subi que très peu ou pas de broutement (figure 3). Néanmoins, nos observations sur le terrain nous font croire que sans l'impact du broutement, le sapin aurait maintenu son rythme de croissance dans les moyennes trouées, sans nécessairement dépasser en hauteur l'épinette rouge (figure 4b).

En lien avec les prédictions n<sup>os</sup> 3, 4 et 5, il est intéressant de comparer les résultats de croissance obtenus dans les trouées sylvicoles de la présente étude avec ceux obtenus dans notre première étude sous un régime de CPU (Dumais et Prévost 2015b), d'autant plus qu'il s'agit de données prises sur du matériel végétal comparable (mêmes essences, mêmes hauteurs initiales) et sur une période de temps équivalente (15 ans). Comme prévu (**prédiction n° 3**), l'approche par moyennes trouées a permis à l'épinette rouge préétablie de mieux croître, comparativement à nos précédentes CPU (18 cm/année comparativement à < 10 cm/année en moyenne, et 3,5 m contre < 1,5 m de hauteur après 15 ans; Dumais et Prévost 2015b). En accord avec la **prédiction n° 4**, les valeurs précédemment rapportées dans nos CPU pour l'épinette rouge sont effectivement plus près de ce que nous avons mesuré dans les petites trouées de la présente étude (7 cm/année). Pour ce qui est du sapin, il nous apparaissait logique que sa croissance en hauteur puisse ne pas être aussi forte dans les grandes trouées que ce que nous avons précédemment observé dans la CPRS (**prédiction n° 5**). En raison du broutement, nous ne pouvons toutefois pas le confirmer avec certitude (croissance moyenne de 20 cm/année comparativement à > 25 cm/année, et hauteur moyenne de 3,5 m contre 4,0 m après 15 ans, respectivement dans les grandes trouées et la CPRS). Ainsi, comme nous l'avions anticipé, la croissance en hauteur de tels sapins préétablis pourrait avoir été supérieure sous les conditions créées par la CPRS, possiblement à cause d'une plus grande disponibilité de lumière dans le temps (Prévost 2008).

Il est important de souligner que le portrait que nous avons dressé ici quant à la réaction de croissance en hauteur de la basse régénération préétablie d'épinette rouge et de sapin n'est pas directement transposable à la haute régénération (Prévost *et al.* 2016), plus susceptible, lorsqu'elle est présente, d'accéder rapidement aux étages supérieurs du peuplement. En effet, nos observations sur le terrain confirment que cette strate de régénération plus haute bénéficie de meilleures conditions de lumière. De plus, elle est peu ou pas affectée par le broutement et le développement de la végétation concurrente, ce qui la rend moins susceptible de dépérir (Dumais et Prévost 2020). Ainsi, la haute régénération résineuse préétablie apparaît tout aussi, sinon plus importante que la basse régénération, et elle mériterait d'être mieux protégée lors des interventions sylvicoles. En effet, les dommages d'exploitation sont plutôt fréquents sur ce type de régénération (Eliasson *et al.* 2003, Stokes *et al.* 2009, Surakka *et al.* 2011).

### 4.3. Croissance en diamètre

Comme nous l'avions supposé (**prédiction n° 6**), l'effet de la superficie des trouées sur la croissance en diamètre des 2 essences a sensiblement suivi les tendances observées pour la croissance en hauteur (figure 4a vs figure 5a). Ainsi, les moyennes trouées ont été plus bénéfiques à la croissance en diamètre de l'épinette rouge préétablie que les petites et grandes trouées, alors que ces dernières ont permis au sapin de mieux croître en diamètre. La diminution inattendue de la croissance en diamètre des 2 essences dans le temps est toutefois préoccupante; elle indique un manque croissant de lumière causé par le développement de la végétation concurrente en sous-étage et la fermeture progressive du couvert forestier (Dumais et Prévost 2020). D'ailleurs, dans une autre étude, nous avons également observé une diminution de la croissance en diamètre, dans ce cas après 8 ans, sur des semis d'épinette rouge plantés dans des trouées sylvicoles de 200–340 m<sup>2</sup> (Dumais *et al.* 2020a). Les arbres résiduels bordant une trouée ont tendance à élargir leur houppier vers l'intérieur de celle-ci pour bénéficier de meilleures conditions de lumière (Brisson 2001, Getzin et Weigand 2007, Muth et Bazzaz 2002), ce qui peut réduire la disponibilité de la lumière pour la basse régénération qui s'y trouve (Prévost et Raymond 2012). En règle générale, la croissance en diamètre des conifères est plus sensible au changement des conditions environnementales que celle en hauteur (Zedaker *et al.* 1987) ou en longueur, lorsqu'il s'agit des branches (Cregg *et al.* 1993).

Nous ne pouvons malheureusement pas faire de comparaison pertinente avec notre autre étude en ce qui a trait à la croissance en diamètre, puisque cette dernière n'a pas été mesurée lors des suivis précédents de la basse régénération dans nos CPU (Dumais et Prévost 2008a, 2008b, 2015b). Étant donné la réduction de croissance en hauteur observée sur 15 ans dans ces CPU (voir Dumais et Prévost 2015b), nous croyons que la croissance en diamètre de l'épinette rouge et du sapin a été plus forte dans les moyennes et grandes trouées de la présente étude. Cela dit, pour la troisième période quinquennale (années 11 à 15), la croissance en diamètre de l'épinette dans les moyennes trouées (1,7 mm/année) et celle du sapin dans les grandes trouées (2,2 mm/année; figure 5a) nous apparaissent relativement acceptables (voir p. ex. : Dumais *et al.* 2020a, Larouche *et al.* 2015).

## 5. Conclusion

Le suivi à moyen terme du développement de la basse régénération préétablie d'épinette rouge et de sapin baumier dans des trouées d'une bétulaie jaune résineuse a permis de confirmer plusieurs effets initiaux que nous avons observés une dizaine d'années auparavant. De la présente étude, il ressort que la basse régénération préétablie d'épinette rouge s'acclimate et croît le mieux en hauteur et en diamètre dans des trouées sylvicoles moyennes (superficie de 100–300 m<sup>2</sup>), et ce, pendant au moins 15 ans après l'ouverture du couvert forestier. Selon toute vraisemblance, cette grandeur de trouée lui permettrait entre autres de maintenir son statut compétitif par rapport au sapin baumier, contrairement aux trouées plus petites (< 100 m<sup>2</sup>) ou plus grandes (700 m<sup>2</sup>). Nous avons aussi pu constater que le broutement préférentiel du sapin par le cerf de Virginie et l'original peut en réduire la croissance, ce qui pourrait être avantageux pour l'épinette rouge à plus long terme. Le sapin a tout de même continué à dominer dans les grandes trouées, de sorte qu'il y a atteint sa hauteur la plus élevée après 15 ans (3,5 m), alors que l'épinette rouge a atteint cette même valeur dans les moyennes trouées.

Bien qu'elle soit intéressante pour étudier l'acclimatation et la croissance en hauteur, la gamme de superficies de trouées dans la présente étude ne semble pas favoriser à long terme la croissance en diamètre de la basse régénération préétablie des 2 essences étudiées. En effet, contrairement à la croissance en hauteur, celle en diamètre a diminué de façon marquée dès la seconde période d'observation (6-10 ans), ce qui est somme toute préoccupant. En effet, un déséquilibre entre ces 2 variables morphologiques peut, par exemple, diminuer la résistance et la stabilité des gaules de conifères soumises aux chutes de neige lourde, au verglas et aux violentes rafales, des événements météorologiques dont la fréquence risque d'augmenter avec les changements climatiques en cours (Lindsey et Campbell 2012).

Ainsi, comme nous l'avons recommandé lors de notre première étude examinant l'effet de CPU (Dumais et Prévost 2008a, 2008b, 2015b), le sylviculteur désirent optimiser le développement et accroître la résilience de la basse régénération préétablie d'épinette rouge et de sapin baumier devrait effectuer un suivi régulier et envisager, le cas échéant, des interventions sylvicoles supplémentaires afin d'augmenter la quantité de lumière disponible. À cet effet, la coupe progressive irrégulière par trouées agrandies (MRN 2013b, Raymond *et al.* 2009), connue depuis

longtemps en Europe (Spurr 1956), mais encore très peu ou pas utilisée au Québec, pourrait être prometteuse.

## 6. Remerciements

Nous tenons à remercier M<sup>me</sup> Julie Forgues (retraîtée), MM. Carlo Gros-Louis (retraîté), Daniel Guimond (retraîté), Serge Williams, Pascal Lainé (retraîté) et Étienne Du Berger de l'équipe technique du créneau de recherche sur la sylviculture des peuplements mixtes et de nombreux étudiants pour leur travail rigoureux lors de la récolte des données sur le terrain. Nos remerciements s'adressent aussi à M. Simon Bilodeau-Gauthier, qui a révisé la version préliminaire de ce document, à M. Rock Ouimet, qui a agi à titre de responsable de la révision scientifique, et aux 3 réviseurs anonymes qui ont permis d'améliorer et de bonifier le contenu de cette note de recherche. Enfin, nous sommes reconnaissants envers M<sup>me</sup> Maripierre Jalbert pour la mise en page et le graphisme et envers M<sup>me</sup> Denise Tousignant et M. Alexandre Dallaire-Théroux pour la révision complète et l'édition. Cette étude a été financée par la Direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (projets 1423320016 et 142332111).

## 7. Références bibliographiques

- Archambault, L., J. Morissette et M. Bernier-Cardou, 1998. *Forest succession over a 20-year period following clearcutting in balsam fir-yellow birch ecosystems of eastern Québec, Canada*. For. Ecol. Manage. 102(1): 61–74. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(97\)00109-6](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(97)00109-6)
- Brisson, J., 2001. *Neighborhood competition and crown asymmetry in Acer saccharum*. Can. J. For. Res. 31(12): 2151–2159. <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-12-2151>
- Cregg, B.M., R.O. Teskey et P.M. Dougherty, 1993. *Effect of shade stress on growth, morphology, and carbon dynamics of loblolly pine branches*. Trees 7: 208–213. <https://doi.org/10.1007/BF00202075>
- Dumais, D. et M. Prévost, 2007. *Management for red spruce conservation in Québec: The importance of some physiological and ecological characteristics — A review*. For. Chron. 83(3): 378–392. <https://doi.org/10.5558/tfc83378-3>
- Dumais, D. et M. Prévost, 2008a. *Ecophysiology and growth of advance red spruce and balsam fir regeneration after partial cutting in yellow birch-conifer stands*. Tree Physiol. 28(8): 1221–1229. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.8.1221>

- Dumais, D. et M. Prévost, 2008b. *Les coupes partielles sont-elles favorables à la régénération préétablie d'épinette rouge?* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 12, 2 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Avis12.pdf>
- Dumais, D. et M. Prévost, 2014a. *Physiology and growth of advance Picea rubens and Abies balsamea regeneration following different canopy openings.* Tree Physiol. 34(2): 194–204. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt114>
- Dumais, D. et M. Prévost, 2014b. *La grandeur des ouvertures dans le couvert forestier : un élément clé pour l'acclimatation de l'épinette rouge préétablie.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 57, 2 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Avis57.pdf>
- Dumais, D. et M. Prévost, 2015a. *Germination et établissement de semis naturels d'épinette rouge (Picea rubens) dans des trouées sylvicoles de différentes tailles.* For. Chron. 91(5): 573–583. <https://doi.org/10.5558/tfc2015-096>
- Dumais, D. et M. Prévost, 2015b. *Acclimatation de la basse régénération résineuse à la suite de coupes partielles en forêt mixte tempérée : Développement après 15 ans.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 141. 10 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Note141.pdf>
- Dumais, D. et M. Prévost, 2020. *Basse régénération préétablie d'épinette rouge : un constat peu rassurant...* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 139. 2 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/ARF139.pdf>
- Dumais, D., C. Larouche, P. Raymond, S. Bédard et M.-C. Lambert, 2019a. *Survival and growth dynamics of red spruce seedlings planted under different forest cover densities and types.* New For. 50(10): 573–592. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9680-2>
- Dumais, D., C. Larouche, P. Raymond, S. Bédard et M.-C. Lambert, 2019b. *Réintroduire l'épinette rouge à l'aide de semis plantés : le type de couvert forestier et sa densité après la coupe ont-ils une influence?* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 114, 2 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Avis114.pdf>
- Dumais, D., P. Raymond et M. Prévost, 2020a. *Eight-year ecophysiology and growth dynamics of Picea rubens seedlings planted in harvest gaps of partially cut stands.* For. Ecol. Manage. 478: 118514. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118514>
- Dumais, D., P. Raymond et M. Prévost, 2020b. *Des trouées sylvicoles pour favoriser la réussite de la plantation d'enrichissement en épinette rouge.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 154, 2 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/ARF154.pdf>
- Eliasson, L., H. Lageson et E. Valinger, 2003. *Influence of sapling height and temperature on damage to advance regeneration.* For. Ecol. Manage. 175(1-3): 217–222. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00180-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00180-9)
- Getzin, S. et K. Weigand, 2007. *Asymmetric tree growth at the stand level: Random crown patterns and the response to slope.* For. Ecol. Manage. 242(2-3): 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.009>
- Gill, R.M.A., 1992. *A review of damage by mammals in north temperate forests: 1. Deer.* Forestry 65(2): 145–169. <https://doi.org/10.1093/forestry/65.2.145>
- Hébert, R., 2003. *Are clearcuts appropriate for the mixed forest of Québec?* For. Chron. 79(3): 664–671. <https://doi.org/10.5558/tfc79664-3>
- Klein, R.M., T.D. Perkins, J. Tricou, A. Oates et K. Cutler, 1991. *Factors affecting red spruce regeneration in declining areas of Camels Hump Mountain, Vermont.* Am. J. Bot. 78(9): 1191–1198. <https://doi.org/10.2307/2444923>
- Kneeshaw, D.D. et M. Prévost, 2007. *Natural canopy gaps disturbances and their role in maintaining mixed-species forests of central Quebec, Canada.* Can. J. For. Res. 37(9): 1534–1544. <https://doi.org/10.1139/X07-112>

- Lafèche, V., J.-C. Ruel et L. Archambault, 2000. *Évaluation de la coupe avec protection de la régénération et des sols comme méthode de régénération de peuplements mélangés du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune de l'est du Québec, Canada*. For. Chron. 76(4): 653–663. <https://doi.org/10.5558/tfc76653-4>
- Larouche, C., M.-M. Gauthier, V. Roy et D. Blouin, 2015. *Conifer regeneration in managed temperate mixedwood stands: the balance between release and competition*. New For. 46(3): 409–425. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9468-6>
- Lindsey, E.R. et J.L. Campbell, 2012. *A novel ice storm manipulation experiment in a northern hardwood forest*. Can. J. For. Res. 42(10): 1810–1818. <https://doi.org/10.1139/x2012-120>
- [MDELCC] Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2015. *Normales climatiques du Québec 1981–2010. Station Honfleur*. Base de données et site Internet. [www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/normales](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/normales)
- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013a. *Le Guide sylvicole du Québec, Tome 1. Les fondements biologiques de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de B. Boulet et M. Huot. Les Publications du Québec. Québec, QC. 1044 p.
- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013b. *Le Guide sylvicole du Québec, Tome 2. Les concepts et l'application de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. Les Publications du Québec. Québec, QC. 744 p.
- Moore, A.R., R.S. Seymour et L.S. Kenefic, 2007. *Height development of shade-tolerant conifer saplings in multiaged Acadian forest stands*. Can. J. For. Res. 37(12): 2715–2723. <https://doi.org/10.1139/X07-110>
- Muth, C.C. et F.A. Bazzaz, 2002. *Tree canopy displacement at forest gap edges*. Can. J. For. Res. 32(2): 247–254. <https://doi.org/10.1139/x01-196>
- Niinemets, Ü. et F. Valladares, 2006. *Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs*. Ecol. Monogr. 76(4): 521–547. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2006\)076\[0521:TTSDAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2)
- Nyland, R.D., 2002. *Silviculture: Concept and Applications, 2<sup>e</sup> édition*. McGraw-Hill. New York, NY (États-Unis). 682 p.
- Page, L.M. et A.D. Cameron, 2006. *Regeneration dynamics of Sitka spruce in artificially created forest gaps*. For. Ecol. Manage. 221(1): 260–266. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.006>
- Pothier, D. et M. Prévost, 2008. *Regeneration development under shelterwoods in a lowland red spruce–balsam fir stand*. Can. J. For. Res. 38(1): 31–39. <https://doi.org/10.1139/X07-135>
- Prévost, M., 2008. *Effect of cutting intensity on microenvironmental conditions and regeneration dynamics in yellow birch–conifer stands*. Can. J. For. Res. 38(1): 317–330. <https://doi.org/10.1139/X07-135>
- Prévost, M. et L. Charette, 2015. *Selection cutting in a yellow birch–conifer stand, in Quebec, Canada: Comparing the single-tree and two hybrid methods using different sizes of canopy opening*. For. Ecol. Manage. 357: 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.003>
- Prévost, M. et L. Charette, 2016. *Jardinage par pieds d'arbres, par groupes d'arbres et avec des trouées systématiques dans une bétulaie jaune résineuse : quelle est la meilleure option?* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 77. 2 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Avis77.pdf>
- Prévost, M. et P. Raymond, 2012. *Effect of gap size, aspect and slope on available light and soil temperature after patch-selection cutting in yellow birch–conifer stands, Quebec, Canada*. For. Ecol. Manage. 274: 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.020>
- 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(5): 1735–1747. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1404-7>
- Prévost, M., P. Raymond et J.-M. Lussier, 2010. *Regeneration dynamics after patch cutting and scarification in yellow birch – conifer stands*. Can. J. For. Res. 40(2): 357–369. <https://doi.org/10.1139/X09-192>
- Prévost, M., V. Roy et P. Raymond, 2003. *Sylviculture et régénération des forêts mixtes du Québec (Canada) : une approche qui respecte la dynamique naturelle des peuplements*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 125. 8 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Note125.pdf>



- Raymond, P. et S. Bédard, 2017. *The irregular shelterwood system as an alternative to clear-cutting to achieve compositional and structural objectives in temperate mixedwood stands*. For. Ecol. Manage. 398: 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.042>
- Raymond, P., S. Bédard, V. Roy, C. Larouche et S. Tremblay, 2009. *The irregular shelterwood system: Review, classification, and potential application to forests affected by partial disturbances*. J. For. 107(8): 405–413.
- 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. « Chapitre 4 – Écologie forestière ». Dans : Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (édit.), *Manuel de foresterie, 2<sup>e</sup> édition*. Éditions MultiMondes. Montréal, QC. p. 165–315.
- Sauvé, D.G. et S.D. Côté, 2007. *Winter forage selection in white-tailed deer at high density: balsam fir is the best of a bad choice*. J. Wildl. Manage. 71(3): 911–914. <https://doi.org/10.2193/2006-056>
- Spurr, S.H., 1956. *German silvicultural systems*. For. Sci. 2(1): 75–80. <https://academic.oup.com/forests/article-abstract/2/1/75/4763800>
- Stokes, V., G. Kerr et D. Ireland, 2009. *Seedling height and the impact of harvesting operations on advance regeneration of conifer species in upland Britain*. Forestry 82(2): 185–198. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn053>
- Surakka, H., M. Sirén, J. Heikkinen et S. Valkonen, 2011. *Damage to saplings in mechanized selection cutting in uneven-aged Norway spruce stands*. Scand. J. For. Res. 26(3): 232–244. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.552518>
- Westfall, P.H., R.D. Tobias et R.D. Wolfinger, 1999. *Multiple comparisons and multiple tests using the SAS System*. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis). 416 p.
- Zedaker, S.M., H.E. Burkhart et A.R. Stage, 1987. « General principles and patterns of conifer growth and yield ». Dans : Walstad, D et P.J. Kuch (édit.), *Forest vegetation management for conifer production*. J. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY (États-Unis). p. 203–241.

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 :**

Dumais, D. et M. Prévost, 2021. *Acclimatation de la basse régénération d'épinette et de sapin dans des trouées sylvicoles de différentes superficies en forêt mixte tempérée : développement après 15 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 157. 18 p.

ISSN 0834-4833

ISBN (PDF) : 978-2-550-89793-4

G.F.D.C.: 231.31--015.5 (714)

L.C.: SD 297.S77 297.B2

Dépôt légal 2021

Bibliothèque nationale du Québec

© 2021 Gouvernement du Québec

**Forêts, Faune  
et Parcs**

**Québec** 