NOTE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 155

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Enracinement des boutures de différentes familles d'épinette blanche en réponse à la fertilisation en bore de pieds-mères en pépinière forestière

Mohammed S. Lamhamedi[1], ing.f., M. Sc., Ph. D., Mario Renaud, techn. forest. et Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.

Résumé

La fertilisation en bore des pieds-mères est déterminante pour assurer des concentrations foliaires en bore adéquates et favoriser l'enracinement des boutures produites. L'objectif de cette étude est de comparer l'enracinement et la qualité morphophysiologique des boutures d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) prélevées sur des pieds-mères issus de 10 familles biparentales ayant reçu différents traitements de fertilisation en bore (Témoin : 0 mg B/plant; Bore 1 : 0,095 mg B/plant; Bore 2 : 0,190 mg B/plant) au cours des deux années de culture précédentes (1+0 et 2+0).

À la fin des 12 semaines d'enracinement, plusieurs variables d'enracinement et de croissance (nombre de branches latérales débourrées, masse sèche totale et celle des racines et des parties aériennes, et accroissement de la masse sèche des parties aériennes) avaient une moyenne significativement plus élevée pour les boutures des deux traitements de fertilisation en bore que pour celles du traitement Témoin. En moyenne, les boutures du traitement Bore 2 avaient une masse racinaire 23,4 % plus grande que celles du Témoin. L'effet significatif de la famille sur le taux d'enracinement indique que celui-ci est sous contrôle génétique, et l'absence d'interaction significative famille × traitement pour cette variable montre que l'effet familial était le même pour tous les traitements de fertilisation en bore. À la fin de la phase d'enracinement, la concentration en bore des parties aériennes des boutures avait diminué de 19 %, 41 % et 43 %, respectivement, pour les traitements Témoin, Bore 1 et Bore 2, par rapport à la concentration initiale.

Ces résultats montrent que l'épinette blanche est exigeante en bore. Le calendrier de fertilisation en bore du traitement Bore 2 pourrait être appliqué pour la production de plants et de pieds-mères de différentes sources génétiques (vergers, familles et clones somatiques) de cette espèce, sans que des effets négatifs sur la croissance soient à craindre.

Mots clés : Épinette blanche, fertilisation en bore, variabilité génétique, bouturage croissance, nutrition minérale.

Abstract

*Fertilizing stockplants with boron is key to ensuring that foliar boron concentration in cuttings is adequate for their optimal rooting. The objective of this study was to compare rooting and morpho-physiological quality of white spruce (*Picea glauca *(Moench) Voss) cuttings harvested on stockplants from 10 biparental families grown under different boron fertilization regimes (Control: 0 mg B/plant; Boron 1: 0,095 mg B/plant; Boron 2: 0,190 mg B/plant) during the two previous years of growth (1+0 and 2+0).*

At the end of the 12-week rooting period, mean values for cuttings in both boron fertilization treatments were significantly greater than in the control for several rooting and growth variables (number of flushed lateral branches, total, aboveground and root dry mass, as well as increase in aboveground dry mass). On average, cuttings of the Boron 2 treatment had 23.4% more root dry mass than those of the control. A significant effect of family indicates that rooting percentage was under genetic control. Furthermore, the absence of a significant family × treatment interaction for this variable shows that the family effect was the same in all boron fertilisation treatments. At the end of the rooting stage, boron concentrations in aerial parts of cuttings had dropped by 19%, 41% and 43%, respectively, in the Control, Boron 1 and Boron 2 treatments, compared to initial concentrations.

These results show that white spruce is a boron-demanding species. A boron fertilization calendar could be used in seedling and stockplant production from various genetic sources (seed orchards, families or somatic clones) for this species, with no risk of negative effects on growth.

Keywords: boron fertilization, cutting growth, genetic variability, mineral nutrition, white spruce

[1] Correspondance : mohammed.lamhamedi@mffp.gouv.qc.ca

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

Québec

1. Introduction

À l'échelle mondiale, le bouturage de masse et le bouturage clonal sont largement préconisés pour multiplier les meilleurs familles et individus issus des croisements dirigés performants, en vue d'augmenter de façon significative la productivité forestière (Ahuja et Libby 1993, Minghe et Ritchie 1999, Ritchie 1991). En effet, à titre d'exemple, des études réalisées au Québec ont évalué la qualité morphophysiologique des boutures issues des familles (Gravel-Grenier *et al.* 2011, Tousignant et Rioux 2002) et des clones somatiques d'épinette blanche (Lamhamedi *et al.* 2017), ainsi que leur survie et leur performance en site de reboisement (Beaulieu et Bernier-Cardou 2006, Wahid *et al.* 2012, 2013).

L'initiation de l'enracinement des boutures et la croissance des racines figurent parmi les étapes essentielles pour la réussite du bouturage. Bien que la croissance des racines soit sous contrôle génétique chez les plants d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) issus de semences, de boutures d'un mélange de familles et de clones somatiques, (Gravel-Grenier *et al.* 2011, Khalil 1985, Lamhamedi *et al.* 2017), l'enracinement des boutures est gouverné par d'autres interactions complexes entre plusieurs facteurs reliés aux techniques culturales et aux caractéristiques des plants. Ces facteurs englobent notamment l'âge et la culture des pieds-mères, le traitement de jours courts, la composition du substrat, le contrôle des variables environnementales incluant le déficit de pression de vapeur saturante, l'irrigation, la fertilisation azotée, le récipient, le nombre de boutures par cavité, l'environnement lumineux et l'acclimatation des boutures (Landis *et al.* 1992, Tousignant et Rioux 2002). De plus, dans le cas de l'épinette blanche, des travaux de caractérisation morphophysiologique des semences, des pieds-mères et des boutures issus des croisements dirigés les plus utilisés en bouturage au Québec ont été effectués pour déterminer le calibre optimal de semences dédiées uniquement à la production de pieds-mères performants (cinétique de germination, croissance des pieds-mères, etc.) (Lamhamedi *et al.* 2005a).

Malgré les avancées réalisées pour optimiser les techniques culturales et les approches de sélection génétique propres à l'enracinement des boutures issues de familles biparentales (Gravel-Grenier *et al.* 2011) et de clones somatiques de l'épinette blanche (Lamhamedi *et al.* 2017), le défi consiste toujours à améliorer la qualité physiologique et l'enracinement des boutures. Un moyen d'y parvenir est de mettre davantage l'accent sur certaines techniques culturales clés de la filière de bouturage, notamment la fertilisation en bore. En effet, le bore (B) améliore significativement la qualité physiologique des boutures et plus particulièrement le développement des racines de différentes espèces vasculaires (Josten et Kutschera 1999, Middleton *et al.* 1978, Schwambach *et al.* 2005). En revanche, la carence en cet oligo-élément inhibe rapidement le développement des tissus méristématiques des apex des radicelles et de la pousse principale des parties aériennes (Camacho-Cristóbal *et al.* 2015, Dell et Huang 1997, Landis 2001). Cependant, nos connaissances restent encore très limitées quant aux effets des concentrations foliaires en oligo-éléments sur le bouturage de l'épinette blanche, notamment celle du B sur l'enracinement et la croissance des racines des boutures issues de différentes familles biparentales.

Nos récentes observations ont révélé que les pieds-mères d'épinette blanche (2+0) de différentes familles biparentales destinées au bouturage de masse à l'échelle opérationnelle montraient, à divers degrés, des symptômes caractéristiques d'une carence en B (Lamhamedi 2013, Lamhamedi et al. 2013b). Dans certains cas, une bonne proportion des pieds-mères montraient des symptômes (absence d'activité racinaire, absence de débourrement) jusqu'à la mi-juillet, une période de croissance habituellement très active. La persistance de ces symptômes de carence en B réduit la qualité morphophysiologique des pieds-mères et le rendement en boutures. Pour les espèces résineuses, les symptômes caractéristiques de la carence en B observés en pépinière (Landis 2001, Stone *et al.* 1982, van den Driessche 1989) sont semblables à ceux observés chez les arbres plus âgés (Beaudoin 2004, Legrand 2006, Lehto *et al.* 2010, Stone 1990, Stone et Will 1965, Wang *et al.* 2015) : présence d'aiguilles recroquevillées et incurvées, absence de débourrement du bourgeon principal, activité racinaire absente ou très réduite et absence de dominance apicale. D'autres symptômes se manifestent également par l'hétérogénéité du débourrement et de la croissance en hauteur, la présence de malformations de la cime des plants (tige principale et/ou branches tordues), la prolifération des bourgeons adventifs ou en rosette (« super bourgeonnement ») à l'extrémité de la pousse terminale de l'année courante, l'augmentation de la fréquence des fourches et des plants multitêtes, de même que l'absence d'aiguilles ou la présence d'aiguilles anormalement courtes à l'extrémité de la pousse de l'année courante.

Pour corriger ces carences et améliorer les processus physiologiques et la croissance des racines et des parties aériennes, certains auteurs proposent de recourir à la fertilisation en bore pour augmenter les réserves de cet élément afin de faciliter sa translocation vers les différents tissus méristématiques (Lehto *et al.* 2000, 2004, Sheng *et al.* 2009, Wang *et al.* 2015). Certains auteurs recommandent que les plants d'épinette blanche produits en pépinière aient une concentration en B du plant d'au moins 46 ppm (Hawkins 2011, van den Driessche 1989). Cependant, dans un scénario de bouturage opérationnel, on n'a encore jamais documenté les effets de la fertilisation en bore des pieds-mères d'épinette blanche pendant les deux premières saisons de croissance en pépinière (1+0 et 2+0) sur la croissance et le développement des boutures pendant la phase d'enracinement (B+0).

Ainsi, l'objectif général de cette étude consiste à comparer les effets de différents traitements de fertilisation en bore de pieds-mères d'épinette blanche issus de différentes familles biparentales sur l'enracinement et la qualité morphophysiologique de boutures prélevées au stade dormant (B+0). Les traitements de fertilisation en bore ont été effectués pendant la première année (1+0) et la deuxième année (2+0) de croissance des pieds-mères, avant la récolte des boutures, afin d'augmenter les réserves initiales (concentration et contenu) en bore de ces dernières. Aucune fertilisation en bore n'a été appliquée pendant la phase d'enracinement des boutures.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel génétique et production des pieds-mères

Les graines utilisées sont issues de familles biparentales sélectionnées dans le cadre du programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche du Québec. Plus précisément, ces familles ont été sélectionnées parmi les 173 familles issues de croisements dirigés, sur la base de leur valeur d'amélioration (prédiction de la performance des descendants) de la hauteur mesurée à 8 ans dans des tests mis en place sur le terrain en 1996 et en 1999 par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (Rainville et Beaulieu 2007). Ainsi, 10 familles biparentales ont été sélectionnées et retenues pour le bouturage de masse à une échelle opérationnelle.

Les graines ont été ensemencées le 2 mai 2014, dans des récipients 25-310 (IPL, Saint-Damien, Québec, Canada; 25 cavités, 310 cm^3/cavité; 206 plants/m^2) empotés avec un substrat composé de tourbe et de vermiculite (80 % : 20 %, v/v) ajusté à une masse volumique apparente moyenne de 0,10 $g \cdot cm^{-3}$. Le pH_{eau} du substrat initial avant l'ensemencement des graines était de 3,4. La caractérisation des substrats tourbeux selon les standards en production de plants au Québec a montré que les fibres grosses (retenues sur les tamis de 2 mm), grosses et moyennes (retenues sur les tamis de 2,00 mm et de 0,850 mm), courtes (retenues sur les tamis de 0,075 mm) et fines (non retenues sur les tamis de 0,075 mm) représentaient respectivement des proportions de 24,5 %, 43,3 %, 55,4 % et 1,3 %.

Les plants ont été produits selon les techniques culturales standard pour la production de plants d'épinette blanche (Lamhamedi et al. 2001, 2006). Pendant la première saison de croissance (1+0), les récipients étaient installés dans un des tunnels de production de la pépinière forestière publique de Grandes-Piles (latitude : 46° 43' 54" N.; longitude : 72° 42' 06" O.). Ce tunnel était couvert d'une toile de polyéthylène laiteux (blanc) de 4 mm d'épaisseur, dotée d'un facteur d'extinction de la lumière incidente de 50 à 55 % (Ginegar Plastic Products Ltd., *multilayer greenhouse cover film*, type UVA/White 45 %). Cette toile est rétractable sur les deux côtés du tunnel afin de faciliter l'aération et de mieux contrôler les températures de l'air à l'intérieur. Pendant la deuxième année de croissance (2+0), les plants ont été cultivés à l'extérieur sous les conditions environnementales naturelles.

L'irrigation et la fertilisation étaient appliquées à l'aide d'un robot (modèle Aquaboom, Industries Harnois, Saint-Thomas-de-Joliette, Québec) afin de minimiser la variabilité spatiale des teneurs en eau du substrat (Lamhamedi *et al.* 2006). Le coefficient d'uniformité du robot varie de 95 à 98 %. La teneur en eau du substrat était ajustée selon les stades de croissance des plants au cours de la première saison de croissance (1+0) (Lamhamedi *et al.* 2001), puis maintenue entre 40 et 45 % (volume/volume) durant la deuxième saison de croissance (2+0) (Lamhamedi *et al.* 2006). Avant chaque arrosage, la teneur en eau du substrat (%, v/v) était suivie à l'aide de la méthode gravimétrique (Lamhamedi *et al.* 2013a).

Le régime de fertilisation a été ajusté toutes les deux semaines pendant les deux saisons de croissance à l'aide du logiciel *Plantec* (Girard *et al.* 2001). Au cours de la première saison de croissance (1+0), chaque plant a reçu, du 9 juin au 14 octobre 2014, 51,65 mg d'azote (N : 24,55 mg N-NH_4, 23,09 mg N-NO_3, 4,0 mg N-urée), 28,78 mg de phosphore (P), 44,72 mg de potassium (K) et 0,38 mg de magnésium (Mg) ainsi qu'un apport en oligo-éléments (manganèse [Mn], cuivre [Cu], fer [Fe] et bore [B] : 0,058 mg). Au cours de la deuxième saison de croissance (2+0), chaque plant a reçu, du 30 avril au 9 octobre 2015, 335,0 mg de N (136,42 mg N-NH_4, 159,70 mg N-NO_3, 38,89 mg N-Urée), 61,15 mg de P, 156,96 mg de K, 10,13 de Ca et 0,71 mg de Mg en plus des oligo-éléments (y compris 0,16 mg de B).

2.2. Dispositif expérimental pour la fertilisation en bore des pieds-mères

Pendant les deux saisons de croissance des pieds-mères provenant de 10 familles, les 3 traitements de fertilisation en bore (Témoin, Bore 1 et Bore 2) ont été distribués aléatoirement à l'intérieur de chaque bloc d'un dispositif expérimental en 5 blocs aléatoires complets. L'unité expérimentale correspondait à 4 récipients contigus par famille/traitement/bloc. Les 10 familles étaient distribuées aléatoirement au sein de chaque bloc, qui comprenait donc 40 récipients associés à un même traitement. En tout, le dispositif comptait 15 000 plants (3 traitements × 10 familles × 4 récipients × 25 plants/récipients × 5 blocs). Afin d'éliminer les effets de bordure, des zones tampons (36 récipients/zone; 9 récipients × 4 rangées) ont été installées aussi bien entre les traitements qu'entre deux blocs consécutifs.

Après la germination et l'éclaircie, les pieds-mères des différentes familles ont été soumis à 3 traitements de fertilisation en bore (Témoin : 0 mg B/plant; Bore 1 : 0,095 mg B/plant; Bore 2 : 0,190 mg B/plant, et ce, à chaque application). Cette fertilisation en bore a été appliquée, à l'aide du robot, de façon séparée des autres fertilisations standard afin d'éviter la non-disponibilité de certains éléments minéraux grâce à la formation de certaines molécules complexes entre le B et certains ions, notamment le sodium (Na) et le calcium (Ca). La formation de ces molécules complexes rend les éléments minéraux non disponibles aux plants. À chaque application, les plants témoins ont reçu une quantité d'eau équivalant à celle reçue lors de la fertilisation en bore des deux autres traitements, afin que la teneur en eau du substrat soit uniforme dans tout le dispositif. En tout, les plants des traitements Témoin, Bore 1 et Bore 2 ont reçu respectivement un total de 0,06 mg B/plant, 0,91 mg B/plant et 1,77 mg B/plant pendant leur première année (9 applications; figure 1a) et un total de 0,16 mg B/plant, 1,44 mg B/plant et 2,64 mg B/plant pendant leur deuxième année de croissance (13 applications; figure 1b). Les quantités de bore très faibles reçues par les plants témoins proviennent de la fertilisation standard.

2.3. Collecte et hivernage des boutures dormantes

Au début novembre 2015, après deux ans de croissance des pieds-mères en pépinière, lorsque le rapport matière sèche/matière fraîche des boutures était supérieur à 31 % et que les plants avaient accumulé au moins 200 heures de froid à une température inférieure à 5 °C (Lamhamedi *et al.* 2005b), les boutures dormantes (longueur moyenne de 5 à 7 cm) ont été récoltées sur les branches latérales. Pour chaque combinaison famille-traitement, tous les pieds-mères des 5 blocs ont été utilisés afin d'avoir une représentativité de tous les individus de la population. Afin d'éviter que certains génotypes soient surreprésentés, le nombre maximal de boutures récoltées était limité à 10 par pied-mère (Lamhamedi *et al.* 2017). De plus, certains individus extrêmement branchus et buissonnants ont été exclus de l'échantillonnage.

Pour un même traitement de fertilisation en bore et une même famille, les boutures issues des 5 blocs ont été mélangées et mises dans des sacs en plastique à raison de 500 boutures par sac (figure 2a). Ces sacs ont été ensuite regroupés dans des bacs dûment identifiés (4 sacs/bac, pour un total de 2 000 boutures/bac), puis stockés en chambre réfrigérée (–2 °C à –4 °C) pendant tout l'hiver.

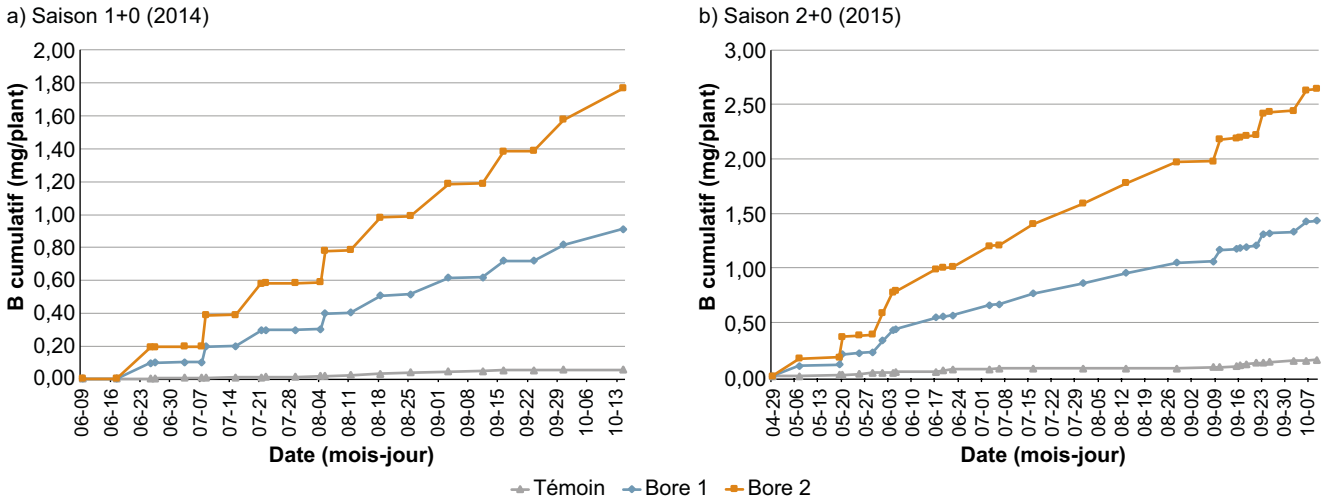

Figure 1. Calendrier de fertilisation en bore (quantité cumulative de B appliquée par plant, en mg) pour les trois traitements expérimentaux : a) lors de la saison de croissance 1+0 (2014), et b) lors de la saison de croissance 2+0 (2015) des pieds-mères d'épinette blanche en pépinière forestière.

2.4. Enracinement des boutures (stade B+0)

2.4.1 Dispositif expérimental et techniques culturales

Pour évaluer l'enracinement et la morphophysiologie des boutures des différentes familles ayant reçu les traitements de fertilisation en bore, un dispositif expérimental a été mis en place dans un tunnel adapté pour le bouturage opérationnel de l'épinette blanche (figures 2b et 2c). Ce tunnel avait une longueur de 83 m et pouvait contenir jusqu'à 626 000 boutures à raison de 10 récipients/rangée. Il était recouvert d'une double paroi (deux toiles) permettant un contrôle des conditions de lumière, de température, d'humidité relative de l'air et du déficit de pression de vapeur. La double paroi a un facteur d'opacité de 45 % (et donc, 55 % de lumière incidente parvient aux boutures à l'intérieur du tunnel). Une isolation thermique est créée par l'air soufflé en continu entre les deux parois à l'aide d'une pompe.

L'enceinte du bouturage était aussi dotée d'un système de brouillard constitué de buses en T et en croix (modèle Fogger, Naandanjain, Canada) dirigées dans le sens de l'allée centrale (pression : 50 psi = 3,4 bars, débit : 6 l/h). Pendant la phase d'enracinement, le brouillard était activé automatiquement lorsque le déficit de pression de vapeur (DPV) était supérieur à 1 kPa (Landis *et al.*1992) grâce à un système de contrôle (modèle Damatex, Damatex inc., Montréal, Canada) muni de sondes qui permettent de déterminer la température et l'humidité relative de l'air afin de calculer le DPV.

Le 18 mai 2016, après leur sortie de la chambre froide, les boutures dormantes de chacune des 10 familles ont été insérées dans les cavités de 4 récipients 200-20 (200 cavités, 20 cm^3/cavité) (figures 2d et 2e). Les récipients ont été installés dans un dispositif (figure 2f) en 4 blocs aléatoires complets (un récipient par traitement/famille/bloc), pour un total de 24 000 boutures (1 récipient × 10 familles × 3 traitements × 200 boutures/récipient × 4 blocs). Dans les cavités, les mottes étaient constituées de pastilles préhumectées d'un substrat tourbeux (Jiffy Préforma^{MD}). Ce substrat organique a une bonne cohésion et se distingue par son pH et par sa fertilité élevés (pH_{CaCl2} = 5,50; [$N\text{-}NH_4$] = 20,3 ppm; [$N\text{-}NO_3$] = 82,7 ppm; [N_{min}] = 103,0 ppm; [P] = 56 ppm; [K] = 416,0 ppm; [Ca] = 7 793,3 ppm; [Mg] = 2 456,7 ppm).

Pendant la phase d'enracinement, les boutures ont reçu 4 fertilisations en N, P et K dont le total s'élève respectivement à 0,43 mg/plant, 0,13 mg/plant et 0,21 mg/plant. L'irrigation et la fertilisation ont été appliquées à l'aide d'un robot (modèle Aquaboom, Industrie Harnois, Saint-Thomas-de-Joliette, Québec) afin d'éviter les effets de la variabilité spatiale des teneurs en eau du substrat (Lamhamedi *et al.* 2006). Le robot était doté de buses conçues spécialement pour le bouturage (modèles TT 110 01 Turbo Teejet, avec un débit mesuré de 0,37 l/min, et XRC Teejet 110 04, avec un débit de 1,38 l/min).

Figure 2. a) Boutures d'épinette blanche récoltées au stade dormant à l'automne 2015 et conservées pendant l'hiver dans des chambres réfrigérées (–2 °C à –4 °C). b) Enceintes (tunnels) utilisées pour le bouturage de l'épinette blanche à l'échelle opérationnelle (pépinière forestière de Grandes-Piles, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Québec, Canada). Chaque enceinte (83 m × 7 m) est recouverte de deux toiles de polyéthylène blanc (épaisseur : 4 mil; 50 % d'extinction de lumière) séparées par un vide aéré en continu par injection d'air. c) Conduite pour injecter l'air entre les deux toiles. d-e) Insertion des boutures dans les cavités du récipient 20-200 (200 cavités/récipient, 20 cm^3/cavité). f) Dispositif expérimental installé dans une enceinte pouvant contenir jusqu'à 626 000 boutures.

Pour l'épinette blanche au Québec, la phase d'enracinement dure en moyenne 12 semaines. À la fin de cette période, les boutures sont acclimatées pendant un maximum de deux semaines. Pour permettre à l'humidité relative dans l'environnement des boutures de s'abaisser graduellement au même niveau qu'à l'extérieur de l'enceinte, les portes aux extrémités de l'enceinte sont ouvertes et un gros ventilateur est installé à une extrémité de l'enceinte pour pousser l'air de l'extérieur vers l'intérieur de l'enceinte. Cette évacuation forcée de l'air l'humide est nécessaire, puisque les côtés de la double toile de l'enceinte ne peuvent pas s'ouvrir comme dans un tunnel standard de production de plants forestiers. Après ces 2 semaines d'acclimatation, les boutures sont acheminées vers la salle de triage pour être repiquées dans les récipients plus gros qui seront déposés dans les aires de cultures à l'extérieur.

2.4.2 Variables mesurées sur les boutures

À la sortie des boutures de la chambre réfrigérée, avant le bouturage, 4 échantillons composites de 10 boutures par famille/bloc/traitement ont servi à déterminer la masse sèche ainsi que la concentration initiale des boutures en éléments minéraux, y compris le bore.

Le 24 août 2016, après environ 12 semaines d'enracinement, les variables d'enracinement et de croissance des boutures (B+0) ont été évaluées grâce à un échantillonnage aléatoire de 10 boutures par famille/bloc/traitement, soit un total de 1 200 boutures (10 boutures × 10 familles × 4 blocs × 3 traitements). Pour chaque bouture échantillonnée, nous avons déterminé le débourrement apical, le nombre de branches latérales débourrées, l'état d'enracinement pour déterminer le taux d'enracinement (moyenne pour chaque combinaison famille-bloc-traitement) ainsi que le nombre de racines/bouture. Une bouture est considérée comme enracinée lorsqu'elle possède au moins une racine très apparente (Lamhamedi *et al.* 2017) dont la longueur est supérieure à 1 cm. Ensuite, les boutures enracinées de chaque combinaison famille-bloc-traitement ont été rassemblées en un échantillon composite pour déterminer la masse sèche de la partie aérienne des boutures initiales, celle des nouvelles pousses et celle des racines, afin de calculer la masse sèche totale et l'accroissement de la partie aérienne entre le début et la fin de la phase d'enracinement. La distinction entre la partie aérienne de chaque bouture de départ et la nouvelle pousse formée pendant la phase d'enracinement se fait aisément, du fait que les jeunes aiguilles sont d'une teinte différente des plus vieilles. Le fait d'utiliser les mêmes boutures (génotypes) évite tout biais, lors de la détermination de l'accroissement de la masse sèche, compte tenu de la variabilité génétique individuelle très marquée en ce qui concerne la densité (nombre d'aiguilles/cm) et la longueur des aiguilles (0,8 cm à 2 cm), deux caractéristiques sous contrôle génétique et très variables d'un individu à un autre chez l'épinette blanche (Lamhamedi *et al.* 2000).

La nutrition minérale des parties aériennes a été déterminée en utilisant toutes les boutures enracinées de l'échantillon composite de 10 boutures échantillonnées par famille/traitement/bloc. Les analyses minérales des plants et du substrat ont été réalisées au laboratoire de chimie organique et inorganique du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) selon les méthodes décrites par Gagnon et DeBlois (2017) et Lamhamedi *et al.* (2013a). À titre indicatif, l'analyse minérale des racines a été effectuée en regroupant tous les échantillons de tous les blocs/famille/traitement, car la masse des racines était insuffisante pour faire cette analyse sur l'échantillon de chaque bloc.

La concentration en azote total a été déterminée par combustion de l'échantillon à haute température à l'aide de l'analyseur LECO Trumac N (Leco Corporation, Saint-Joseph, Michigan). Les autres éléments (P, K, Ca, Mg) ont été dosés à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique au plasma (modèle ICAP 9000, Thermo Instruments, Franklin, Massachusetts). Le B a été déterminé par perte au feu, puis solubilisé dans l'acide chlorhydrique et dosé par spectrométrie d'émission atomique au plasma.

Le contenu en éléments minéraux a été calculé pour chaque élément (concentration multipliée par la masse sèche) afin de refléter la quantité de nutriments contenus dans une quantité de matériel végétal (Timmer *et al.* 1991).

2.5. Analyses statistiques

Des analyses de la variance ont été effectuées à l'aide de modèles linéaires mixtes avec la procédure MIXED de SAS/STAT 14.1 (SAS Institute Inc.) en analysant la moyenne des échantillons par bloc/traitement/famille. Le traitement (fertilisation en bore), la famille et leur interaction ont été considérés comme des effets fixes, tandis que le bloc a été considéré comme un effet aléatoire.

Lorsqu'un effet fixe était significatif au seuil de 5 %, des contrastes ont été effectués. L'effet du traitement

a été décomposé en deux contrastes : 1) la moyenne des traitements Bore 1 et Bore 2 par rapport au Témoin, et 2) le traitement Bore 1 par rapport au traitement Bore 2. Afin de déterminer des groupes de familles significativement différents, celles-ci ont été comparées avec le test de Scott-Knott (Lamhamedi et Fortin 1991, Scott et Knott, 1974). Ce test, basé sur des techniques de regroupement, a été effectué à l'aide du module « ScottKnott » du logiciel R (Jelihovschi *et al.* 2014). Ce test a été privilégié d'une part en raison du nombre élevé de comparaisons des familles deux à deux et d'autre part, pour son avantage à ne jamais produire de chevauchements entre les groupes formés, contrairement à d'autres méthodes de comparaisons. Si l'interaction famille × traitement était significative, le test de Scott-Knott sur les familles était effectué pour chaque traitement.

Les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances ont été vérifiées graphiquement. Pour certaines variables, une variance résiduelle par traitement de bore a été estimée pour tenir compte de l'hétérogénéité des variances.

3. Résultats

3.1. Évolution des variables environnementales dans l'enceinte de bouturage à une échelle opérationnelle

L'enregistrement continu des variables environnementales (température, humidité relative, DPV, etc.) a permis de vérifier l'excellent contrôle de l'environnement physique pendant la phase d'enracinement. En particulier, le DPV a été maintenu à moins de 1 kPa (figure 3), ce qui a évité aux boutures d'être soumises à des conditions desséchantes (p. ex. potentiel hydrique de l'air très négatif). L'humidité relative de l'air était stable, avec des moyennes quotidiennes d'environ 95 %, des valeurs minimales variant de 90 à 94 %, et des valeurs maximales variant de 97 à 100 %. Les températures moyennes quotidiennes, quant à elles, ont varié de 18 à 27 °C.

3.2. Enracinement et croissance des boutures

L'analyse de la variance a montré que le traitement de fertilisation en bore a eu un effet significatif sur le nombre de branches latérales débourrées, le nombre de racines par bouture, la masse sèche totale et celle des parties

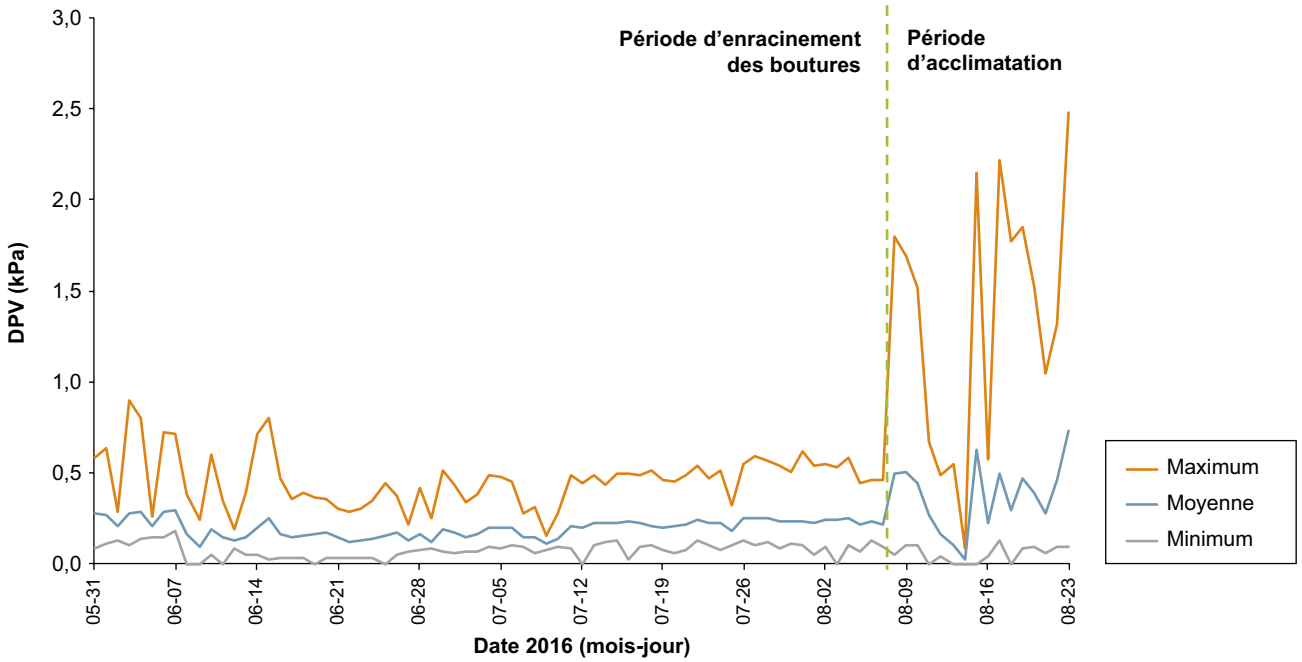

Figure 3. Évolution du déficit de pression de vapeur (DPV) dans l'enceinte de bouturage pendant les périodes d'enracinement et d'acclimatation des boutures des familles d'épinette blanche (minimum, moyenne et maximum quotidiens). Le DPV a été maintenu à moins de 1 kPa pendant toute la phase d'enracinement.

aériennes et des racines, ainsi que l'accroissement de la masse sèche des parties aériennes des boutures à la fin de la phase d'enracinement ($p \leq 0{,}0144$; tableau 1). Le traitement n'a eu aucun effet significatif sur le taux d'enracinement ($p = 0{,}3516$) ni sur le taux de débourrement apical ($p = 0{,}6167$) des boutures pendant la phase d'enracinement. Par contre, le taux d'enracinement a été sous contrôle génétique, tel que suggéré par l'effet significatif de la famille ($p = 0{,}0028$).

Les contrastes orthogonaux ont montré qu'à la fin de la phase d'enracinement, le nombre de branches latérales débourrées, le nombre de racines, la masse sèche totale et celles des parties aériennes et des racines ainsi que l'accroissement de la masse sèche de la partie aérienne des boutures étaient significativement plus grands chez les boutures provenant du traitement Bore 2 (pieds-mères ayant reçu la dose plus élevée de bore) que chez celles provenant du traitement Bore 1 ($p \leq 0{,}0216$; tableau 1). De plus, lorsque l'effet du traitement était significatif, les moyennes des deux traitements de fertilisation en bore (Bore 1 et Bore 2) étaient significativement supérieures à celles du traitement Témoin pour toutes les variables de croissance et d'enracinement des boutures à l'exception du nombre de racines ($p = 0{,}0811$). Par exemple, à la fin de la phase d'enracinement, les boutures du traitement Bore 2 avaient une masse des racines 23,4 % plus grande que celles du traitement Témoin (tableau 1).

L'effet de la famille était significatif, lui aussi, pour toutes les variables d'enracinement et de croissance des boutures à l'exception du taux de débourrement apical (tableau 1). L'absence d'interaction significative entre le traitement et la famille montre que l'effet familial observé était constant, quelle que soit la dose de fertilisation en bore. Ainsi, une variabilité familiale existe et se manifeste par la présence de deux groupes de familles distincts pour chacune des variables de croissance et d'enracinement des boutures (tableau 2).

3.3. Nutrition minérale des boutures

3.3.1 Avant l'enracinement

Après la sortie des boutures de la chambre réfrigérée et avant le début de leur phase d'enracinement, l'effet de l'interaction Famille × Traitement était significatif pour la concentration initiale en bore des boutures ($p < 0{,}0001$; tableau 3), mais pas pour celle des autres éléments minéraux (N, P, K, Ca et Mg; $p \geq 0{,}1691$; tableau 3). La concentration initiale moyenne en bore des boutures était de 13,52 ± 0,30 ppm pour le traitement Témoin, de 58,69 ± 0,80 ppm pour le traitement Bore 1 et de 95,26 ± 1,14 ppm pour le traitement Bore 2 (tableau 3). Les concentrations plus élevées en bore n'ont engendré aucun symptôme apparent de toxicité (brunissement ou dessèchement de la moitié ou de la totalité de la longueur des aiguilles, typique chez les résineux) sur les boutures prélevées ni sur les pieds-mères pendant les deux premières saisons de croissance (1+0 et 2+0).

La comparaison des moyennes par famille et par traitement, selon le test de Scott-Knott, a montré qu'une variabilité familiale s'est manifestée par la présence de deux groupes distincts de familles à l'intérieur de chacun des deux traitements de fertilisation en bore (Bore 1 et Bore 2; tableau 4). Par contraste, dans le cas du traitement Témoin, la concentration initiale en bore des boutures n'était pas significativement différente entre les familles.

3.3.2 À la fin de la phase d'enracinement (B+0)

Des effets significatifs aussi bien du traitement que de la famille ont été observés pour le contenu des parties aériennes des boutures en différents éléments minéraux (N, P, K, Ca, Mg et B) à la fin de la phase d'enracinement (B+0) (tableau 5). En ce qui concerne les concentrations en éléments minéraux des parties aériennes des boutures à la fin de la phase d'enracinement, il y a une interaction significative Famille × Traitement pour le N ($p = 0{,}0289$) et pour le B ($p = 0{,}0002$) (tableau 6). L'effet significatif du traitement a été observé pour le N, le K, le Mg et le B, tandis que celui de la famille était significatif pour tous les éléments minéraux (tableau 6).

À la fin de la phase d'enracinement, la concentration moyenne en bore des parties aériennes des boutures était de 11,00 ± 0,34 ppm pour le Témoin, de 34,65 ± 0,40 ppm pour le traitement Bore 1 et de 54,61 ± 0,76 ppm pour le traitement Bore 2 (tableau 6). Ainsi, à la fin de la phase d'enracinement, la concentration en bore des parties aériennes des boutures avait diminué de 19 %, 41 % et 43 % respectivement pour les traitements Témoin, Bore 1 et Bore 2, par rapport aux valeurs initiales (figure 4).

Pour les variables de contenus et de concentrations en éléments minéraux pour lesquelles l'interaction Famille × Traitement n'était pas significative, les comparaisons des moyennes à l'aide du test de Scott-Knott ont montré la présence d'une variabilité familiale, caractérisée par la présence de 1 à 4 groupes de familles distincts selon la variable (tableau 7).

Tableau 1. Probabilités observées (valeurs de *p*) et degrés de liberté au numérateur (dln) et au dénominateur (dld) des effets fixes associés à l'analyse de la variance et les moyennes ajustées des variables de croissance et d'enracinement mesurées à la fin de la phase d'enracinement des boutures d'épinette blanche (B+0) issues de 10 familles biparentales.

Source de variation	dln	dld	Valeurs de *p*							
			Taux de débourrement apical	Nombre de branches latérales débourrées	Taux d'enracinement	Nombre de racines/ bouture	Masse sèche des parties aériennes	Masse sèche des racines	Masse sèche totale	Accroissement de la masse sèche des parties aériennes
Traitement	2	87	0,6167	0,0017	0,3516	0,0144	0,0014	0,0001	0,0007	0,0005
(Bore 1 et Bore 2) *vs* Témoin	(1)	87	0,7241	0,0101	0,1515	0,0811	0,0012	0,0016	0,0007	0,0013
Bore 2 *vs* Bore 1	(1)	87	0,3600	0,0106	0,8831	0,0182	0,0143	0,0014	0,0094	0,0216
Famille	9	87	0,1612	0,0027	0,0028	< 0,0001	0,0030	0,0046	0,0172	< 0,0001
Famille × Traitement	18	87	0,7149	0,2784	0,2409	0,7751	0,7162	0,7298	0,8454	0,2970
Traitement			**Moyennes ajustées (± erreur type)**							
			(%)	Nombre/ bouture	(%)	Nombre de racines/ bouture	(mg)	(mg)	(mg)	(mg)
Témoin			94,50 ± 1,39	1,38 ± 0,09	93,50 ± 1,20	3,77 ± 0,14	286,09 ± 5,28	40,07 ± 1,84	326,17 ± 6,19	113,03 ± 8,61
Bore 1			93,25 ± 1,39	1,50 ± 0,09	95,50 ± 1,20	3,83 ± 0,14	297,81 ± 6,44	42,53 ± 1,84	340,33 ± 7,60	131,59 ± 8,61
Bore 2			94,75 ± 1,39	1,81 ± 0,09	95,75 ± 1,20	4,31 ± 0,14	325,90 ± 9,21	49,43 ± 1,84	375,33 ± 10,77	157,12 ± 8,61

Tableau 2. Comparaison des moyennes ajustées (± erreur type) par famille des variables d'enracinement et de croissance mesurées à la fin de la phase d'enracinement des boutures d'épinette blanche (B+0) issues de 10 familles biparentales. Verticalement, les familles avec la même lettre forment un groupe homogène selon le test de Scott-Knott.

Famille	Nombre de branches latérales débourrées	Taux d'enracinement des boutures	Nombre de racines/ bouture	Masse sèche des parties aériennes (mg)	Masse sèche des racines (mg)	Masse sèche totale (mg)	Accroissement de la masse sèche des parties aériennes (mg)
1	1,74 ± 0,16 a	0,98 ± 0,02 a	4,76 ± 0,26 a	284,67 ± 13,09 b	49,75 ± 2,91 a	334,42 ± 15,35 b	127,20 ± 14,60 b
2	1,89 ± 0,16 a	0,93 ± 0,02 b	3,67 ± 0,26 b	310,28 ± 13,09 a	39,67 ± 2,91 b	349,94 ± 15,35 a	157,80 ± 14,60 a
3	1,18 ± 0,16 b	0,90 ± 0,02 b	3,30 ± 0,26 b	316,31 ± 13,09 a	45,48 ± 2,91 a	361,79 ± 15,35 a	118,68 ± 14,60 b
4	1,30 ± 0,16 b	0,99 ± 0,02 a	3,91 ± 0,26 b	307,38 ± 13,09 a	48,88 ± 2,91 a	356,26 ± 15,35 a	124,23 ± 14,60 b
5	1,93 ± 0,16 a	0,98 ± 0,02 a	4,25 ± 0,26 a	283,84 ± 13,09 b	40,85 ± 2,91 b	324,68 ± 15,35 b	97,26 ± 14,60 b
6	1,51 ± 0,16 b	0,96 ± 0,02 a	4,18 ± 0,26 a	334,32 ± 13,09 a	45,95 ± 2,91 a	380,28 ± 15,35 a	163,92 ± 14,60 a
7	1,24 ± 0,16 b	0,90 ± 0,02 b	2,99 ± 0,26 b	306,02 ± 13,09 a	41,52 ± 2,91 b	347,53 ± 15,35 a	131,22 ± 14,60 b
8	1,62 ± 0,16 a	0,90 ± 0,02 b	3,47 ± 0,26 b	318,89 ± 13,09 a	36,54 ± 2,91 b	355,43 ± 15,35 a	177,11 ± 14,60 a
9	1,43 ± 0,16 b	0,98 ± 0,02 a	4,31 ± 0,26 a	254,36 ± 13,09 b	41,77 ± 2,91 b	296,13 ± 15,35 b	82,72 ± 14,60 b
10	1,82 ± 0,16 a	0,98 ± 0,02 a	4,85 ± 0,26 a	316,61 ± 13,09 a	49,70 ± 2,91 a	366,32 ± 15,35 a	159,02 ± 14,60 a

Dans le cas des concentrations en N et en B, pour lesquelles l'interaction Famille × Traitement était significative, on distingue 1 à 3 groupes différents de familles, selon le traitement (figure 5).

À titre indicatif, les concentrations en bore des racines variaient de 16 ppm à 29 ppm selon les familles et les traitements. La concentration en bore la plus élevée (29 ppm) a été observée chez les boutures du traitement Bore 2.

Tableau 3. Probabilités observées (valeurs de *p*) et degrés de liberté au numérateur (dln) et au dénominateur (dld) des effets fixes associés à l'analyse de la variance et des moyennes ajustées des concentrations initiales des éléments minéraux mesurées avant la phase d'enracinement dans les boutures d'épinette blanche (B+0) issues de 10 familles biparentales.

Source de variation	dln	dld	Valeurs de *p*					
			Concentration en N	Concentration en P	Concentration en K	Concentration en Ca	Concentration en Mg	Concentration en B
Traitement	2	116	< 0,0001	< 0,0001	0,0063	0,3500	0,0805	< 0,0001
(Bore 1 et Bore 2) *vs* Témoin	(1)	116	< 0,0001	0,0001	0,0084	0,2524	0,2273	< 0,0001
Bore 2 *vs* Bore 1	(1)	116	0,0019	0,0031	0,0671	0,3742	0,0576	< 0,0001
Famille	9	116	< 0,0001	< 0,0001	0,0003	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Famille × Traitement	18	116	0,1746	0,2553	0,4235	0,5387	0,1691	0,0001
Traitement			**Moyennes ajustées (± erreur type)**					
			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(ppm)
Témoin			1,992 ± 0,0181	0,218 ± 0,0017	0,703 ± 0,0091	0,130 ± 0,0019	0,121 ± 0,0016	13,52 ± 0,30
Bore 1			1,935 ± 0,0181	0,213 ± 0,0017	0,685 ± 0,0091	0,129 ± 0,0019	0,125 ± 0,0016	58,69 ± 0,80
Bore 2			1,881 ± 0,0181	0,206 ± 0,0017	0,661 ± 0,0091	0,126 ± 0,0019	0,122 ± 0,0016	95,26 ± 1,14

Tableau 4. Comparaison des moyennes ajustées (± erreur type), par famille et par traitement, de la concentration en Bore (B) mesurée avant la phase d'enracinement dans les boutures d'épinette blanche (B+0) issues de 10 familles biparentales. Verticalement, les familles avec la même lettre forment un groupe homogène selon le test de Scott-Knott.

Famille	Concentration en B (ppm)		
	Témoin	Bore 1	Bore 2
1	15,220 ± 0,936 a	53,340 ± 2,522 b	93,020 ± 3,597 b
2	13,280 ± 0,936 a	49,860 ± 2,522 b	94,600 ± 3,597 b
3	13,600 ± 0,936 a	60,120 ± 2,522 a	93,860 ± 3,597 b
4	13,140 ± 0,936 a	62,980 ± 2,522 a	106,740 ± 3,597 a
5	10,520 ± 0,936 a	48,720 ± 2,522 b	88,460 ± 3,597 b
6	14,600 ± 1,047 a	62,040 ± 2,522 a	94,520 ± 3,597 b
7	14,360 ± 0,936 a	62,480 ± 2,522 a	92,720 ± 3,597 b
8	12,880 ± 0,936 a	58,460 ± 2,522 a	88,900 ± 3,597 b
9	13,320 ± 0,936 a	66,740 ± 2,522 a	100,740 ± 3,597 a
10	14,240 ± 0,936 a	62,140 ± 2,522 a	99,020 ± 3,597 a

Tableau 5. Probabilités observées (valeurs de *p*) et degrés de liberté au numérateur (dln) et au dénominateur (dld) des effets fixes associés à l'analyse de la variance des variables du contenu en éléments minéraux mesuré à la fin de la phase d'enracinement dans les parties aériennes des boutures d'épinette blanche (B+0) issues de 10 familles biparentales.

Source de variation	dln	dld	Valeur de *p*					
			Contenu en N	Contenu en P	Contenu en K	Contenu en Ca	Contenu en Mg	Contenu en B
Traitement	2	87	0,0448	0,0038	0,0000	0,0001	0,0001	< 0,0001
(Bore 1 et Bore 2) *vs* Témoin	(1)	87	0,5273	0,0688	0,0001	0,0005	0,0003	< 0,0001
Bore 2 *vs* Bore 1	(1)	87	0,0160	0,0045	0,0002	0,0085	0,0075	< 0,0001
Famille	9	87	0,0009	0,0106	0,0002	< 0,0001	0,0003	0,0104
Famille × Traitement	18	87	0,4165	0,7238	0,4591	0,6984	0,7712	0,0563

Tableau 6. Probabilités observées (valeurs de *p*) et degrés de liberté au numérateur (dln) et au dénominateur (dld) des effets fixes associés à l'analyse de la variance et des moyennes ajustées des concentrations en éléments minéraux mesurées à la fin de la phase d'enracinement dans les parties aériennes des boutures d'épinette blanche (B+0) issues de 10 familles biparentales.

Source de variation	dln	dld	Valeur de *p*					
			Concentration en N	Concentration en P	Concentration en K	Concentration en Ca	Concentration en Mg	Concentration en B
Traitement	2	87	< 0,0001	0,1593	0,0067	0,4440	0,0204	< 0,0001
(Bore 1 et Bore 2) *vs* Témoin	(1)	87	< 0,0001	0,1259	0,0215	0,2824	0,0055	< 0,0001
Bore 2 *vs* Bore 1	(1)	87	0,5768	0,2460	0,0259	0,4952	0,8806	< 0,0001
Famille	9	87	0,0002	0,0153	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Famille × Traitement	18	87	0,0289	0,6092	0,1532	0,3173	0,1261	0,0002
Unité			**Moyennes ajustées (± erreur type)**					
			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	ppm
Témoin			1,609 ± 0,012	0,183 ± 0,002	0,497 ± 0,006	0,277 ± 0,004	0,139 ± 0,001	11,00 ± 0,34
Bore 1			1,506 ± 0,012	0,177 ± 0,002	0,504 ± 0,006	0,283 ± 0,004	0,142 ± 0,001	34,65 ± 0,40
Bore 2			1,497 ± 0,012	0,181 ± 0,002	0,522 ± 0,006	0,280 ± 0,004	0,143 ± 0,001	54,61 ± 0,76

Tableau 7. Comparaison des moyennes ajustées (± erreur type) par famille des concentrations et des contenus des différents éléments minéraux, à la fin de la phase de l'enracinement, des boutures d'épinette blanche (B+0) pour lesquelles l'interaction Famille × Bore n'était pas significative. Verticalement, les familles avec la même lettre forment un groupe homogène selon le test de Scott-Knott.

Famille	Concentration (%)				Contenu (mg/plant)					
	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	B
1	0,177 ± 0,004 b	0,528 ± 0,010 a	0,330 ± 0,006 a	0,145 ± 0,002 a	4,214 ± 0,199 b	0,504 ± 0,027 b	1,496 ± 0,069 b	0,934 ± 0,035 a	0,413 ± 0,019 a	0,001 ± 0,0006 a
2	0,178 ± 0,004 b	0,538 ± 0,010 a	0,283 ± 0,006 b	0,137 ± 0,002 b	4,760 ± 0,199 a	0,553 ± 0,027 a	1,676 ± 0,069 a	0,877 ± 0,035 a	0,425 ± 0,019 a	0,009 ± 0,0006 a
3	0,188 ± 0,004 a	0,445 ± 0,010 c	0,286 ± 0,006 b	0,148 ± 0,002 a	4,965 ± 0,199 a	0,595 ± 0,027 a	1,412 ± 0,069 b	0,902 ± 0,035 a	0,470 ± 0,019 a	0,011 ± 0,0006 a
4	0,186 ± 0,004 a	0,472 ± 0,010 c	0,292 ± 0,006 b	0,149 ± 0,002 a	4,963 ± 0,199 a	0,572 ± 0,027 a	1,452 ± 0,069 b	0,896 ± 0,035 a	0,459 ± 0,019 a	0,011 ± 0,0006 a
5	0,182 ± 0,004 a	0,523 ± 0,010 a	0,263 ± 0,006 c	0,136 ± 0,002 b	4,378 ± 0,199 b	0,519 ± 0,027 b	1,479 ± 0,069 b	0,741 ± 0,035 b	0,387 ± 0,019 b	0,009 ± 0,0006 b
6	0,173 ± 0,004 b	0,502 ± 0,010 b	0,279 ± 0,006 b	0,139 ± 0,002 b	5,121 ± 0,199 a	0,580 ± 0,027 a	1,677 ± 0,069 a	0,939 ± 0,035 a	0,465 ± 0,019 a	0,013 ± 0,0006 a
7	0,190 ± 0,004 a	0,509 ± 0,010 b	0,244 ± 0,006 d	0,138 ± 0,002 b	4,751 ± 0,199 a	0,579 ± 0,027 a	1,557 ± 0,069 a	0,743 ± 0,035 a	0,422 ± 0,019 a	0,011 ± 0,0006 a
8	0,182 ± 0,004 a	0,546 ± 0,010 a	0,265 ± 0,006 c	0,136 ± 0,002 b	4,865 ± 0,199 a	0,581 ± 0,027 a	1,736 ± 0,069 a	0,844 ± 0,035 a	0,433 ± 0,019 a	0,010 ± 0,0006 a
9	0,178 ± 0,004 b	0,518 ± 0,010 b	0,281 ± 0,006 b	0,138 ± 0,002 b	3,938 ± 0,199 b	0,457 ± 0,027 b	1,318 ± 0,069 b	0,708 ± 0,035 b	0,351 ± 0,019 b	0,010 ± 0,0006 a
10	0,167 ± 0,004 b	0,496 ± 0,010 b	0,278 ± 0,006 b	0,146 ± 0,002 a	4,582 ± 0,199 a	0,525 ± 0,027 b	1,569 ± 0,069 a	0,875 ± 0,035 a	0,461 ± 0,019 a	0,011 ± 0,0006 a

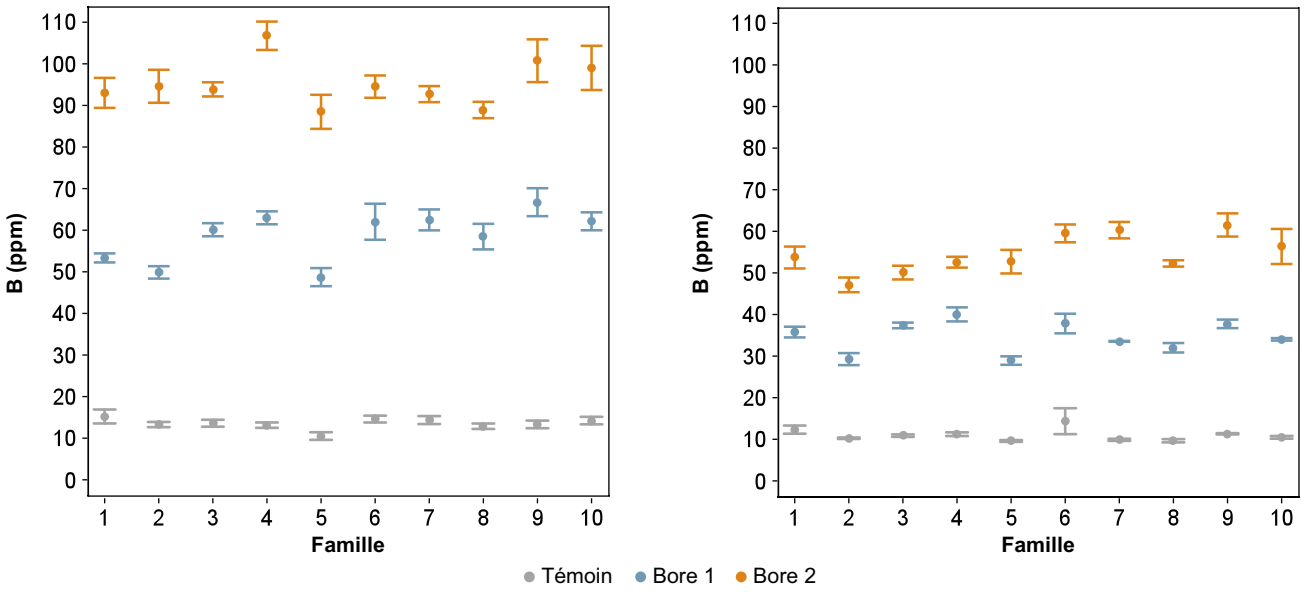

Figure 4. Variations des concentrations du B selon les familles et les 3 traitements (Témoin, Bore 1 et Bore 2) dans les parties aériennes des boutures d'épinette blanche issues de 10 familles biparentales. À gauche : avant la phase d'enracinement (concentrations initiales); à droite : à la fin de la phase d'enracinement. Les barres d'erreur représentent l'erreur type.

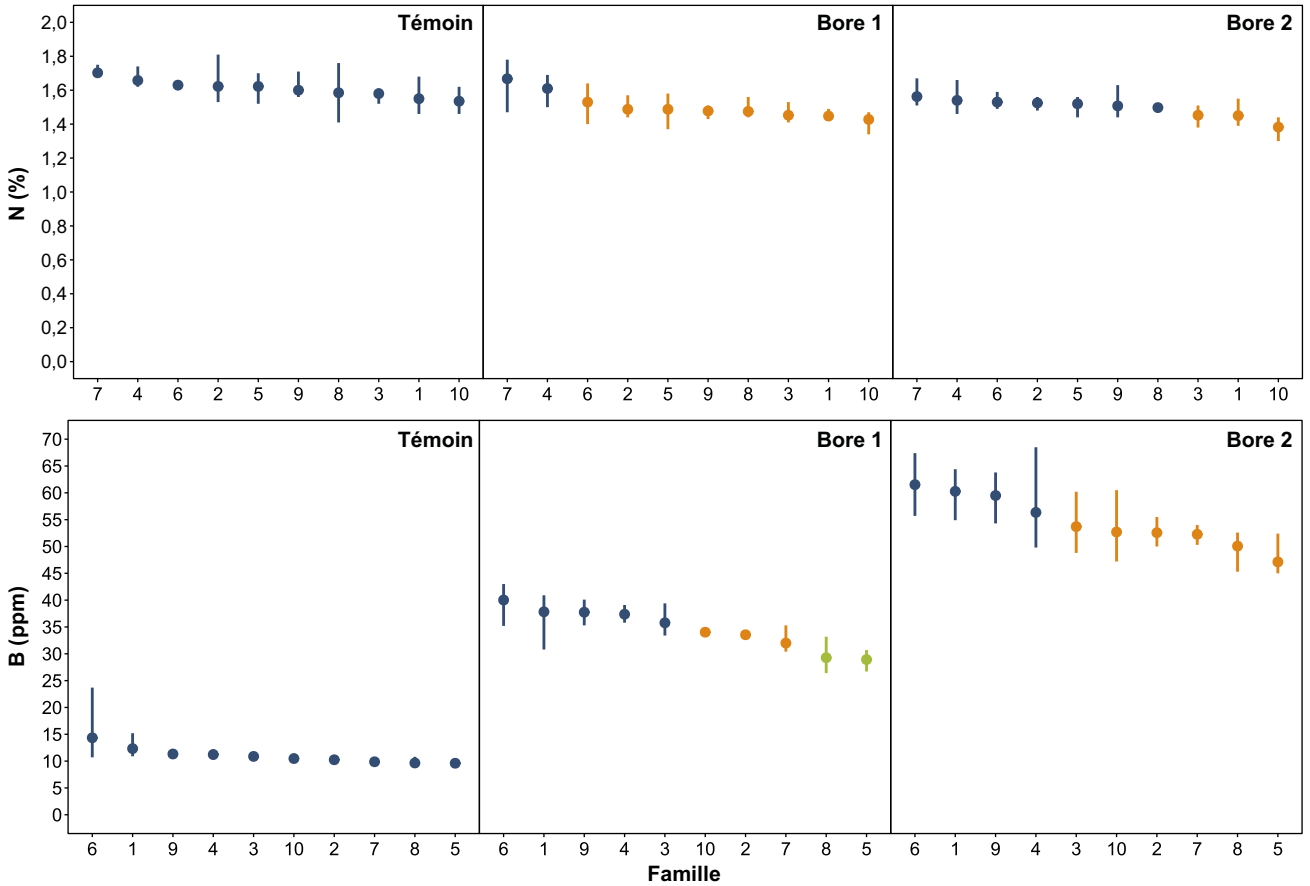

Figure 5. Moyennes ajustées des concentrations en N (%) et en B (ppm) des parties aériennes des boutures selon les traitements, pour les familles pour lesquelles l'interaction Famille × Traitement était significative. Les barres d'erreur vont de la valeur minimale à la valeur maximale. Les familles d'une même couleur forment un même groupe selon le test de Scott-Knott.

4. Discussion

Les résultats de cette étude montrent que la fertilisation en bore pendant les deux années consécutives de production des pieds-mères d'épinette blanche (1+0 et 2+0) a significativement augmenté la croissance des racines et des parties aériennes des boutures prélevées par la suite sur les différentes familles. À notre connaissance, c'est la première fois qu'on démontre que ce traitement améliore la croissance des racines et des parties aériennes des boutures (B+0) d'épinette blanche. Chez les plantes vasculaires, différents travaux ont démontré que le bore joue un rôle primordial dans l'élongation et la croissance des racines de boutures (Josten et Kutshera 1999, Middleton *et al.* 1978) et des plants (Dell et Huang 1997, Zhou *et al.* 2014). On sait aussi qu'une carence en bore inhibe rapidement la croissance racinaire et l'initiation de racines latérales (Camacho-Cristóbal *et al.* 2015, Dell et Huang 1997, Landis 2001, Poza-Viejo *et al.* 2018). Le bore stimule l'activité méristématique des cellules parce qu'il est impliqué dans les processus de division cellulaire, de différenciation et d'élongation des nouvelles racines (Josten et Kutschera 1999, Shelp 1993).

Nos résultats ont démontré que la fertilisation en bore n'a eu aucun effet significatif sur le taux d'enracinement des boutures, qui a cependant été significativement influencé par l'effet génétique de la famille (tableau 1). Ce résultat concorde avec ceux ayant démontré le contrôle génétique de l'enracinement de boutures d'épinette blanche provenant de familles sélectionnées et de clones somatiques (Gravel-Grenier *et al.* 2011, Lamhamedi *et al.* 2017). De ce qui précède, il est évident que le bore n'affecte pas l'initiation de l'enracinement (p. ex., le taux d'enracinement), mais plutôt le nombre de racines et la masse produite par l'élongation et la croissance des racines adventives. D'autres travaux ont aussi montré que le bore stimule l'élongation et la différenciation des jeunes racines des boutures du tournesol (*Helianthus annuus* L. 'Giganteus') (Josten et Kutschera 1999) ainsi que l'augmentation de la longueur totale, de la surface totale, du nombre de racines et de la densité racinaire des porte-greffes de 7 génotypes du genre *Citrus* (Zhou *et al.* 2014).

Malgré tout, cet effet positif de la fertilisation en bore sur les variables de croissance et d'enracinement des boutures d'épinette blanche nécessite que la fertilisation des autres éléments minéraux soit optimisée, notamment en respectant les rapports d'équilibre des éléments les uns par rapport aux autres (Lamhamedi *et al.* 2013b, Landis *et al.* 1989). Ainsi, un trop grand apport en calcium déséquilibre le rapport Ca/B et diminue l'absorption du bore (Gupta 1993). Majid (1984) a aussi montré que l'augmentation de la croissance et la disparition des symptômes de carence en bore chez des plants de *Pinus contorta* Douglas ex Loudon et de *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* (Mirb.) ne pourraient être obtenues que lorsque la fertilisation en azote et en bore est optimale. Chez des arbres de *Pinus contorta*, Brockley (2003) a observé que les applications combinées d'azote et de bore ont eu plus d'effet que celles de bore seul. Cette combinaison du bore et de l'azote a stimulé la croissance en hauteur et elle a contribué à éliminer les symptômes de carence en bore. Cette synergie très étroite entre l'azote et le bore est due aux effets directs du bore sur le métabolisme de l'azote (Princi *et al.* 2016).

Au Québec, ces dernières années, certains pépiniéristes ont augmenté les apports en bore dans leurs productions d'épinette blanche, en appliquant les mêmes doses que dans la présente étude pour fertiliser des pieds-mères ou des plants de fortes dimensions (PFD) standard. Ils ont ensuite constaté une diminution appréciable de certains défauts attribués à la carence en bore (fourches, absence de débourrement ou bourgeons vivants scellés et perte de dominance apicale, croissance inhibée des racines, etc.). Par exemple, les proportions de plants présentant des fourches observées en 2013 chez les pieds-mères (47,2 %) et les PFD (33,8 %) ont respectivement baissé à 5,8 % et 6,9 % en 2016 à la suite de fertilisations en bore (résultats non publiés). Certains pépiniéristes ont aussi observé que la fréquence des fourches, le taux d'insuffisance racinaire et la fréquence de bourgeons vivants scellés ont diminué en réponse à des applications de fertilisation en bore. Les analyses foliaires réalisées sur des pieds-mères de 10 familles et de 47 clones somatiques produits dans certaines pépinières forestières du Québec ont montré que les concentrations foliaires en bore variaient de 8 à 20 ppm (résultats non publiés), ce qui est bien en deçà du seuil minimal de 46 ppm recommandé pour des plants d'épinette blanche en pépinière forestière (Hawkins 2011, van den Driessche 1989).

Dans notre étude, l'augmentation significative de la masse des racines des boutures des traitements Bore 1 et Bore 2 par rapport au traitement Témoin pourrait aussi découler de l'augmentation de la photosynthèse en présence d'une fertilisation optimale en bore (Khan *et al.* 2010) et à la translocation des produits de la photosynthèse courante vers les racines (Ritchie 2003). Khan *et al.* (2010) ont montré

que la fertilisation en bore (4 ou 8 kg/ha) augmentait la croissance et la photosynthèse des plants de *Pinus radiata* (D. Don), mais que des doses plus élevées (16 ou 32 kg/ha) avaient l'effet inverse. En comparant l'effet de 4 doses de fertilisation en bore (0,01 mg/l, 0,05 mg/l, 0,10 mg/l et 0,25 mg/l) appliquées pendant 183 jours à des plants de *Citrus sinensis* Osb. âgés d'un an greffés sur deux génotypes, Sheng *et al.* (2009) ont montré que la photosynthèse augmentait en fonction des apports en bore. En effet, les plants recevant la plus faible dose (0,01 g/l) avaient un taux de photosynthèse de près de 65 % plus faible que ceux recevant la dose la plus forte (0,25 g/l).

À la fin de la phase d'enracinement, la concentration foliaire en bore des parties aériennes des boutures d'épinette blanche avait diminué par rapport à la concentration initiale (tableaux 3, 4 et 6, figure 4). Cela laisse croire qu'il y a eu translocation du bore des parties aériennes vers les racines et les nouvelles aiguilles des boutures développées pendant la phase d'enracinement. À cet égard, Lehto *et al.* (2000) ont appliqué du bore marqué (^{10}B) aux parties aériennes de plants de *Picea abies* (L.) Karst. et de *Pinus sylvestris* L. et ont montré qu'après une journée, le bore avait été transporté des parties aériennes vers les racines de ces deux essences. Le fait que des concentrations de 16 à 29 ppm de bore aient été détectées dans les nouvelles racines des boutures d'épinette blanche de notre étude montre qu'une telle translocation a eu lieu, puisqu'il n'y a eu aucune fertilisation en bore pendant la phase d'enracinement. D'autres travaux (Lehto *et al.* 2004) ont montré une translocation du bore marqué (^{10}B) des vieilles aiguilles vers les plus jeunes dans des plants d'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) H. Karst.).

Chez les espèces ligneuses, pour que le bore soit transporté vers les puits, il faut cependant que les besoins essentiels de la source soient comblés pour cet élément (Wang *et al.* 2015). Si la disponibilité du bore est insuffisante, la croissance des racines cesse rapidement ou est complètement inhibée chez les boutures, tant chez les espèces non ligneuses (Jarvis 1986) que chez les plants forestiers (Landis 2001). En Amérique du Nord, les concentrations foliaires adéquates de bore recommandées pour les résineux produits en récipients en pépinière varient de 20 à 100 ppm (Landis 2001, Landis *et al.* 2005). À notre avis, les deux traitements en bore évalués dans notre étude comblaient les besoins en bore des parties aériennes des boutures, puisque leurs concentrations foliaires initiales (tableau 3) dépassaient le seuil minimal de 46 ppm recommandé pour l'épinette blanche (Hawkins 2011). Bien que la concentration foliaire initiale en bore des boutures du traitement Bore 2 ait été forte (95,26 ± 1,14 ppm), la croissance des racines et des parties aériennes a été améliorée pour les boutures de ce traitement, qui n'ont montré aucun symptôme de toxicité ni effet négatif apparent sur la croissance. Pour quelques familles, la concentration initiale en bore des boutures avoisinait et même dépassait les 100 ppm (tableau 4). Ceci indique que cette essence est exigeante en bore, mais aussi, qu'elle répond bien aux fertilisations en bore, puisque la concentration foliaire initiale des boutures (tableau 4) et la croissance subséquente des racines et des parties aériennes des boutures enracinées (tableau 1) ont augmenté en fonction des apports en bore faits aux pieds-mères (figures 1a et 1b).

Chez les résineux, les symptômes de toxicité dus au bore se manifestent par une chlorose, un brunissement et un dessèchement des aiguilles sur la moitié ou la totalité de leur longueur (Khan 2012). Ces symptômes se distinguent facilement de ceux d'une carence en magnésium, caractérisée par une chlorose et un dessèchement limités aux apex des aiguilles (Lamhamedi *et al.* 2013b, Landis *et al.* 1989). Cependant, les besoins et les seuils de toxicité au bore varient selon les espèces. Dans une revue de littérature, Lehto *et al.* (2010) ont rapporté que la croissance de *Pinus sylvestris* n'était pas modifiée à une concentration foliaire en bore de 90 ppm, mais qu'elle diminuait légèrement à 140 ppm et que des symptômes de toxicité apparaissaient à 200 ppm. Pour deux espèces d'eucalyptus (*E. grandis* et *E. globulus*), les symptômes de toxicité ont été détectés à une concentration foliaire de 75 ppm. Chez des plants de *Pinus radiata* produits en conditions contrôlées, une fertilisation en bore à raison de 32 kg/ha a engendré l'apparition de symptômes de toxicité (Khan 2012).

À la fin de la phase d'enracinement, la concentration moyenne en bore des parties aériennes des boutures du traitement Bore 2 était de 54,61 ± 0,76 ppm (tableau 6), ce qui dépasse largement la concentration minimale (46 ppm) recommandée pour des plants d'épinette blanche (Hawkins 2011). Cette réserve contribuera à satisfaire les besoins des boutures après leur repiquage et à prévenir une éventuelle carence en bore. Malgré tout, nous considérons que la fertilisation en bore gagnerait à se poursuivre lors des stades de croissance subséquents des boutures (B+1 et B+2), afin de satisfaire leurs besoins et maintenir les nombreux processus physiologiques qui nécessitent du bore (croissance des racines et

des parties aériennes, photosynthèse et métabolisme des sucres, métabolisme de l'azote, lignification des parois cellulaires, maintien de l'intégrité de la membrane cellulaire, activité enzymatique, stimulation du métabolisme des acides nucléiques, métabolisme de l'acide indole-acétique, etc.; Princi *et al.* 2016, Shelp 1993). Par exemple, si les besoins en bore des racines des plants ne sont pas satisfaits, le transport du bore vers les parties aériennes sera inhibé (Wang *et al.* 2015).

La présence d'une variabilité familiale chez l'épinette blanche pour les variables de croissance, d'enracinement, d'absorption et de nutrition minérale en réponse à la fertilisation en bore démontre qu'il serait possible de sélectionner des familles qui utilisent le bore de manière efficiente (p. ex. croissance des racines, maintien d'une concentration et d'un contenu élevés en bore après l'enracinement des boutures, etc.). De plus, on pourrait orienter de façon prioritaire, à l'intérieur de ces familles, la sélection d'individus ou de clones plus performants et efficients pour ce critère. Davis *et al.* (2014) ont observé, dans plusieurs sites de reboisement, que la croissance de *Pinus radiata* en réponse à différentes doses de fertilisation en bore variait selon les familles et les cônes. Dans notre étude, les familles semblent avoir montré des réponses constantes au traitement Bore 1, lorsque l'on compare les variations de concentration foliaire en B avant et à la fin de la phase d'enracinement. Ce n'est cependant pas le cas dans le traitement Bore 2 (notamment pour les familles 1 et 4).

5. Conclusion et portée opérationnelle des résultats

Cette étude a démontré que nous pouvons contrôler le dosage lors des applications de la fertilisation en bore à une échelle opérationnelle pendant les deux années de production de pieds-mères d'épinette blanche issus de familles biparentales. Les deux traitements de fertilisation en bore ont permis d'augmenter de façon significative la concentration foliaire initiale en bore des boutures, par rapport au traitement Témoin. Malgré les concentrations foliaires élevées observées pour les traitements Bore 1 et Bore 2, les pieds-mères n'ont montré aucun symptôme de toxicité pendant les deux saisons de croissance. Ceci indique clairement que l'épinette blanche est exigeante en bore et que le pépiniériste peut appliquer des fertilisations en bore aux pieds-mères pour augmenter les concentrations foliaires en bore des boutures jusqu'à 95 ppm.

L'augmentation de la concentration foliaire initiale en bore des boutures a permis d'augmenter de façon significative la croissance de leurs racines et de leurs parties aériennes après 12 semaines d'enracinement. Par exemple, les boutures du traitement Bore 2 avaient une masse des racines supérieure de 23,4 % à celles du traitement Témoin. La fertilisation en bore des pieds-mères favorise donc l'accumulation de réserves en bore indispensables à l'élongation et à la croissance des racines et des parties aériennes des boutures.

Le calendrier de fertilisation en bore mis au point dans le cadre de ce projet pour la production des plants (1+0 et 2+0) d'épinette blanche pourra être facilement intégré au logiciel *Plantec* de gestion opérationnelle de la fertilisation des plants forestiers au Québec. De ce qui précède, il apparaît que le calendrier de fertilisation en bore du traitement Bore 2 pourrait être appliqué pour la production de plants et de pieds-mères de différentes sources génétiques (vergers, familles ou clones somatiques) de cette espèce, sans que des effets négatifs sur la croissance ou de toxicité soient à craindre.

Bien entendu, l'obtention des avantages escomptés de la fertilisation en bore sur la production de plants et le bouturage nécessitent l'optimisation des rapports d'équilibre entre les différents éléments minéraux ainsi que le maintien du déficit de pression de vapeur inférieur à 1 kPa pendant l'enracinement des boutures. Par ailleurs, lors de l'endurcissement au gel des plants en automne, il faut éviter de mélanger un fertilisant à base de nitrate de calcium avec ceux du bore afin d'éviter la formation de molécules complexes, par exemple les métaborates du calcium [$Ca(BO_2)_2$], qui rendent ces éléments minéraux non disponibles aux plants.

Remerciements

Nous tenons à remercier sincèrement Mme Sylvie Goulet, Mme Chantal Pelletier et tout le personnel de la pépinière de Grandes-Piles pour leur aide technique exceptionnelle pendant toutes les phases de ce projet. Nous remercions tout le personnel du laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière (DRF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) pour les analyses minérales des échantillons.

Nous remercions Mme Josianne DeBlois, à titre de prélectrice de la dernière version de cette note de recherche, ainsi que M. Jean Gagnon, chercheur retraité à la DRF, pour ses suggestions lors de la révision de la première version préliminaire de cette note de recherche. Nous remercions M. Rock Ouimet, responsable de la révision scientifique, de même que les réviseurs anonymes pour leurs commentaires effectués dans le cadre du processus de révision scientifique par les pairs. Nous remercions M. Jean-Pierre Saucier, directeur de la DRF, pour les échanges et le suivi accordé pendant toutes les étapes du cheminement de cette publication. Nos remerciements s'adressent également à Mmes Denise Tousignant, Nathalie Langlois, Claude-Andrée Berthiaume et Maripierre Jalbert, ainsi qu'à M. Alexandre Dallaire-Théroux pour l'édition et la mise en page de cette note de recherche forestière.

Le financement de ce projet de recherche a été assuré par la DRF (MFFP) et accordé à Mohammed S. Lamhamedi, ing.f., M. Sc., Ph. D. (projets no 3321-142332093 [Optimisation des principales pratiques culturales affectant l'insuffisance racinaire et la qualité morphophysiologique des plants produits en pépinière forestière] et no 3321-142332116 [Caractérisation morphophysiologique et sélection hâtive en pépinière forestière des clones somatiques d'épinette blanche et leur intégration dans la filière de bouturage au Québec]).

Références bibliographiques

Ahuja, M.-R. et W.J. Libby, 1993. *Clonal forestry II: Conservation and application*. Springer-Verlag. New York, NY (États-Unis). 240 p.

Beaudoin, R., 2004. *Perte de dominance apicale sur le pin sylvestre : symptômes visuels et microscopiques de carence en bore*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière no 144. 43 p. https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/beaudoin-roger/Memoire144.pdf

Beaulieu, J. et M. Bernier-Cardou, 2006. *Comparison of early height growth between white spruce seedlings and rooted cuttings*. Can. J. For. Res. 36: 3246-3250. https://doi.org/10.1139/x06-170

Brockley, R.P., 2003. *Effects of nitrogen and boron fertilization on foliar boron nutrition and growth in two different lodgepole pine ecosystems*. Can. J. For. Res. 33(16): 988-996. https://doi.org/10.1139/x03-032

Camacho-Cristóbal, J.J., E.M. Martín-Rejano, M.B. Herrera-Rodríguez, M.T. Navarro-Gochicoa, J. Rexach et A. González-Fontes, 2015. *Boron deficiency inhibits root cell elongation via an ethylene/auxin/ROS-dependent pathway in* Arabidopsis *seedlings*. J. Exp. Bot. 66(13): 3831-3840. https://doi.org/10.1093/jxb/erv186

Davis, M., J. Xue et P. Clinton, 2014. *Growth responses to boron fertilisation in* Pinus radiata. *Growing confidence in forestry's future research programme.* Scion, Technical note no GCFF TN-001. 6 p. https://scionforestryfuture.files.wordpress.com/2015/06/gcfftn-001.pdf

Dell, B. et L. Huang, 1997. *Physiological response of plants to low boron*. Plant Soil 193: 103-120. https://doi.org/10.1023/A:1004264009230

Gagnon, J. et J. DeBlois, 2017. *Effects of foliar urea fertilization on nitrogen concentrations of containerized 2+0 jack pine seedlings produced in forest nurseries*. TPN 60(1): 44-50.

Girard, D., J. Gagnon et C.-G. Langlois, 2001. Plantec*: un logiciel pour gérer la fertilisation des plants dans les pépinières forestières.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière no 111. 8 p. https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Note111.pdf

Gravel-Grenier, J., M.S. Lamhamedi, J. Beaulieu, S. Carles, H.A. Margolis, M. Rioux, D.C. Stowe et L. Lapointe, 2011. *Utilization of family genetic variability to improve the rooting ability of white spruce* (Picea glauca) *cuttings*. Can. J. For. Res. 41(6): 1308-1318. https://doi.org/10.1139/X11-044

Gupta, U.C., 1993. « Factors affecting boron uptake by plants ». Dans : Gupta, U.C. (éd.). *Boron and its role in crop production.* CRC Press. Londres (Royaume-Uni). p. 87-103.

Hawkins, B.J., 2011. « Seedling mineral nutrition, the root of the matter ». Résumé d'une conférence paru dans : *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations — 2010*. Fort Collins, CO (États-Unis). p. 87-97. https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/40178

Jarvis, B.C., 1986. « Endogenous control of adventitious rooting in non woody cuttings ». Dans : Jackson, M.B. (éd.). *New root formation in plants and cuttings*. Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht (Hollande). p: 191-222.

Jelihovschi, E.G., J.C. Faria et I.B. Allaman, 2014. *ScottKnott: A package for performing the Scott-Knott clustering algorithm in R.* Trends Math. Appl. Comput., 15(1): 3-17. https://doi.org/10.5540/tema.2014.015.01.0003

Josten, P. et U. Kutschera, 1999. *The micronutrient boron causes the development of adventitious roots in sunflower cuttings*. Ann. Bot. 84(3): 337-342. https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0922

Khalil, M.A.K., 1985. *Heritability of juvenile characters of white spruce* (Picea glauca *(Moench.) Voss.) in central Newfoundland, Canada*. Theor. Appl. Genet. 69: 247-251. https://doi.org/10.1007/BF00662434

Khan, R.U., 2012. *Boron dynamics and availability in* Pinus radiata *plantation.* Thèse de doctorat. Institute of Natural Resources, College of Sciences Massey University. Massey University. Palmerston North, Nouvelle-Zélande. 216 p.

Khan, R.U., C.W.N. Anderson, P. Loganathan, J. Xue et P. Clinton, 2010. *Response of* Pinus radiata *(D. Don) to boron fertilisation under greenhouse conditions.* World Congress of Soil Science : Soil solutions for a changing world. 1er au 6 août 2010. Brisbane, (Australie). p. 208-211. https://www.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/0085.pdf

Lamhamedi, M.S., 2013. « Principaux facteurs et techniques culturales affectant la germination des semences et la croissance des plants en pépinière forestière ». Dans : *Atelier sur les semences forestières : un maillon clé des plantations de grande valeur*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles du Québec. 3-4 décembre 2013. Berthier, QC. 39 p. https://mffp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche/atelier-conference-decembre-2013/pdf/Presentation_04_Lamhamedi.pdf

Lamhamedi, M.S. et J.A. Fortin, 1991. *Genetic variations of ectomycorrhizal fungi: extramatrical phase of* Pisolithus *sp*. Can. J. Bot. 69(9): 1927-1934. https://doi.org/10.1139/b91-242

Lamhamedi, M.S., H. Chamberland, P.Y. Bernier et F.M. Tremblay, 2000. *Clonal variation in morphology, growth, physiology, anatomy and ultrastructure of container-grown white spruce somatic plants*. Tree Physiol. 20(13): 869-880. https://doi.org/10.1093/treephys/20.13.869

Lamhamedi, M.S., G. Lambany, H.A. Margolis, M. Renaud, L. Veilleux, L. et P.Y. Bernier, 2001. *Growth, physiology and leachate losses in* Picea glauca *seedlings (1 + 0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes*. Can. J. For. Res. 31(11): 1968-1980. https://doi.org/10.1139/x01-134

Lamhamedi M.S., F. Colas et D. Tousignant, 2005a. *Caractérisation de la croissance des pieds-mères d'épinette blanche issus de croisements dirigés : 1 — Approche méthodologique*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis technique. 10 p. https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Avis-techn-caracterisation.pdf

Lamhamedi, M.S., L. Veilleux et M. Renaud. 2005b. *Élaboration des seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière selon les régions écologiques du Québec.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière no 147. 52 p. http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Memoire147.pdf

Lamhamedi, M.S., L. Labbé, H.A. Margolis, D.C. Stowe, L. Blais et M. Renaud, 2006. *Spatial variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings*. Soil Sci. Soc. Am. J. 70(January-February): 108-120. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/foret/understanding/research/Soil-Sci-Soc-Am-J-70-108-120.pdf

Lamhamedi, M.S., M. Renaud, P. Desjardins et L. Veilleux, 2013a. *Root growth, plug cohesion, mineral nutrition, and carbohydrate content of (1+0)* Picea mariana *seedlings in response to a short-day treatment*. TPN 56(1): 35-46. https://npn.rngr.net/publications/tpn/56-1

Lamhamedi, M.S., P. Desjardins, M. Renaud, et L. Veilleux, 2013b. *Techniques culturales de production pour améliorer la qualité morphophysiologique des plants forestiers et la rentabilité des pépinières forestières au Québec.* Dans : Journée de formation et de transfert de connaissances, d'expertises et de savoir-faire auprès des pépinières forestières du Québec membres de la Fédération québécoise des coopératives forestières. 6 novembre 2013. Québec, QC. p. 7-20. https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Journe-formation-pepiniere-for-fqcf.pdf

Lamhamedi, M.S., J. DeBlois, M. Renaud et J. Beaulieu, 2017. *Optimisation de l'intégration opérationnelle des clones somatiques dans la filière de bouturage de l'épinette blanche* (Picea glauca) *au Québec.* Rev. For. Fr. 69(2): 121-146. https://doi.org/10.4267/2042/64091

Landis, T.D., 2001. *Cultural perspectives. Micronutrients - Boron*. FNN Summer 2001: 11-14. https://rngr.net/publications/fnn/2001-summer/articles/micronutrients-boron

Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett, 1989. *The container tree nursery manual. Vol. 4: Seedling nutrition and irrigation*. U.S.D.A., Forest Service. Washington, DC (États-Unis). Agric. Handbook nº 674. 119 p. https://rngr.net/publications/ctnm/volume-4

Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett, 1992. *The container tree nursery manual. Vol. 3: Atmospheric environment.* U.S.D.A., Forest Service. Washington, DC (États-Unis). Agric. Handbook nº 674. 145 p. https://rngr.net/publications/ctnm/volume-3

Landis, T.D., D.L. Haase et R.K. Dumroese, 2005. « Plant nutrient testing and analysis in forest and conservation nurseries ». Résumé d'une conférence paru dans : *National proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations — 2004*. 12 au 15 juillet 2004; Charleston, NC (États-Unis); 26 au 29 juillet 2004; Medford, OR (États-Unis). p. 76-83. https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p035.pdf

Legrand, P., 2006. *Fertilisation de jeunes cèdres de l'Atlas carencés en bore dans le Massif central.* Rev. For. Fr. 6: 509-520. https://doi.org/10.4267/2042/8019

Lehto, T., E. Kallio et P.J. Aphalo, 2000. *Boron mobility in two coniferous species*. Ann. Bot. 86(3): 547-550. https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1215

Lehto, T., A. Lavola, R. Julkunen-Tiitto et P.J. Aphalo, 2004. *Boron retranslocation in Scots pine and Norway spruce*. Tree Physiol. 24(9): 1011-1017. https://doi.org/10.1093/treephys/24.9.1011

Lehto, T., T. Ruuhola et B. Dell, 2010. *Boron in forest trees and forest ecosystems*. For. Ecol. Manage. 260(12): 2053-2069. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.028

Majid, N.M., 1984. *Some aspects of boron, copper and iron nutrition of Lodgepole pine and Douglas-fir*. Thèse de Doctorat. Faculté des études supérieures. Université de Colombie-Britannique. Vancouver, CB. 172 p. https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0096652

Middleton, W., B.C. Jarvis et A. Booth. 1978. *The boron requirement for root development in stem cutting of* Phaseolus Aureus *Roxb*. New Phytol. 81(2): 287-297. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1978.tb02634.x

Minghe, L. et G.A. Ritchie, 1999. *Eight hundred years of clonal forestry in China: I. traditional afforestation with Chinese fir* (Cunninghamia lanceolata *(Lamb.) Hook.).* New For. 18(2): 131-142. https://doi.org/10.1023/A:1006558900234

Poza-Viejo, L., I. Abreu, M.P. González-García, P. Allauca, I. Bonilla, L. Bolaños et M. Reguera, 2018. *Boron deficiency inhibits root growth by controlling meristem activity under cytokinin regulation*. Plant Sci. 270(Mai): 176-189. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.02.005

Princi, M.P., A. Lupini, F. Araniti, C. Longo, A. Mauceri, F. Sunseri et M.R. Abenavoli, 2016. « Chapter 5 — Boron toxicity and tolerance in plants: Recent advances and future perspectives ». Dans : Ahmad, P. (éd.). *Plant metal interaction – Emergent radiation techniques*. Elsevier. p. 115-147. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00005-9

Rainville, A. et J. Beaulieu, 2007. « Tirer profit d'une espèce à haut rendement : 40 années d'efforts intégrés et continus en amélioration génétique de l'épinette blanche ». Résumé d'une conférence paru dans : *Colloque de transfert de connaissances — Des plants aux plantations : techniques, technologies et performances.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Carrefour de la recherche forestière, 19 septembre 2007. Québec, QC. p. 7-10. https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/recueil-resumes-colloque-transfert-connaissances/

Ritchie, G.A., 1991. *The commercial use of rooted cuttings in forestry: a world overview*. New For. 5(3): 247-275. https://doi.org/10.1007/BF00028115

Ritchie G.A., 2003. « Root physiology and phenology: the key to transplanting success ». Résumé d'une conférence paru dans : *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations — 2002*. Olympia, WA (États-Unis). p. 98-104. https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/5449

Schwambach, J., C. Fadanelli et A.G. Fett-Netto, 2005. *Mineral nutrition and adventitious rooting in microcuttings of* Eucalyptus globulus. Tree Physiol. 25(4): 487-494. https://doi.org/10.1093/treephys/25.4.487

Scott, A.J. et M. Knott, 1974. *A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. Biometrics* 30(3): 507-512. https://doi.org/10.2307/2529204

Shelp, B.J., 1993. « Physiological and biochemistry of boron plants ». Dans : Gupta, U.C. (éd.). *Boron and its role in crop plants*. CRC Press. Londres (Royaume-Uni). p. 53-85.

Sheng, O., S. Song, S. Peng et X. Deng, 2009. *The effects of low boron on growth, gas exchange, boron concentration and distribution of 'Newhall' navel orange (*Citrus sinensis *Osb.) plants grafted on two rootstocks.* Sci. Hortic. 121(3): 278-283. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.02.009

Stone, E.L., 1990. *Boron deficiency and excess in forest trees: A review*. For. Ecol. Manage. 37(1-3): 49-75. https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90046-E

Stone, E.L. et G.M. Will, 1965. *Boron deficiency in* Pinus radiata *and* P. pinaster. For. Sci. 11(4): 425-433.

Stone, E.L., C.A. Hollis et E.L. Barnard, 1982. *Boron deficiency in a southern pine nursery*. South. J. Appl. For. 6(2): 108-112. https://doi.org/10.1093/sjaf/6.2.108

Timmer, V.R., G. Armstrong et B.D. Miller, 1991. *Steady-state nutrient preconditioning and early outplanting performance of containerized black spruce seedlings*. Can. J. For. Res. 21(5): 585-594. https://doi.org/10.1139/x91-080

Tousignant D. et M. Rioux, 2002. « Le bouturage des résineux à la pépinière de Saint-Modeste (Québec, Canada) : 10 ans de recherche, de développement et d'innovations ». Résumé d'une conférence paru dans : *Multiplication végétative des ligneux forestiers, fruitiers et ornementaux : troisième rencontre du groupe de la Sainte Catherine.* 22 au 24 novembre 2000. Orléans (France). p. 65-86.

van den Driessche, R., 1989. *Nutrient deficiency symptoms in container-grown Douglas-fir and white spruce seedlings*. FRDA Report nº 100, Victoria, C-B. 29 p. https://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Frr/Frr100.htm

Wahid, N., A. Rainville, M.S. Lamhamedi, H.A. Margolis, J. Beaulieu et J. DeBlois, 2012. *Genetic parameters and performance stability of white spruce somatic seedlings in clonal tests*. For. Ecol. Manage. 270: 45-53. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.003

Wahid, N., M.S. Lamhamedi, A. Rainville, J. Beaulieu et H.A. Margolis, 2013. *Genetic control and nursery-plantation genotypic correlations for growth characteristics of white spruce somatic clones*. J. Sustainable For. 32(6): 576-593. https://doi.org/10.1080/10549811.2013.791231

Wang, N., C. Yang, Z. Pan, Y. Liu et S. Peng, 2015. *Boron deficiency in woody plants: various responses and tolerance mechanisms*. Front. Plant Sci. 6: 916. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00916

Zhou, F.G., S.A. Peng, Y.Z. Liu, Q.J. Wei, J. Han et M.Z. Islam, 2014. *The physiological and nutritional responses of seven different citrus rootstock seedlings to boron deficiency*. Trees 28(1): 295-307. https://doi.org/10.1007/s00468-013-0949-y

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 :
Lamhamedi, M.S., M. Renaud et I. Auger, 2020. *Enracinement des boutures de différentes familles d'épinette blanche en réponse à la fertilisation en bore de pieds-mères en pépinière forestière.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière nº 155. 20 p.

ISSN 0834-4833
ISBN (PDF) : 978-2-550-86932-0
G.F.D.C. : 232.322.419 (714)
L.C. : SD 403.4
Dépôt légal 2020
Bibliothèque nationale du Québec
© 2020 Gouvernement du Québec

Forêts, Faune et Parcs
Québec