



La surélévation des récipients en pépinière forestière au Québec : Quels sont ses effets sur la morphophysiologie des plants pendant la saison de croissance et sur leur viabilité en hiver?

Mohammed S. Lamhamedi¹ et Mario Renaud

Résumé

La surélévation des récipients de culture (ou conteneurs) est courante dans les pépinières forestières du Québec pour assurer un drainage efficace du substrat et la circulation d'air nécessaire au cernage et à la croissance racinaire des plants. Avant l'hiver, les récipients sont habituellement déposés au sol afin de mieux isoler les plants du gel hivernal. Or, pour diminuer les coûts de production, les manipulations des récipients, les troubles musculo-squelettiques chez les travailleurs et pour pallier les problèmes de rareté de la main-d'œuvre, certains pépiniéristes déposent les récipients à même le sol pendant toute la saison, alors que d'autres laissent les récipients surélevés pendant l'hiver.

Cette étude vise à i) comparer la croissance et la nutrition minérale de plants d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) 1+0 produits à une échelle opérationnelle en récipients surélevés à une hauteur de 20 cm ou posés directement au sol sur du gravier; ii) évaluer les effets de cette surélévation sur l'atteinte par les plants des normes de qualité morphophysiologique utilisées au Québec; et iii) discuter des répercussions du maintien ou non de la surélévation sur la viabilité des plants lors de leur hivernage.

Les plants surélevés avaient une masse sèche significativement plus grande que les plants témoins (écart de 18, 23 et 20 % pour les racines, la partie aérienne et le plant total, respectivement). Leur contenu en éléments minéraux était aussi plus grand. Le taux de conformité des plants surélevés était de 91,67 % (catégorie A), alors que celui des plants témoins était de 88,83 % (catégorie B).

Nos résultats indiquent clairement la nécessité de surélever les récipients afin d'améliorer la croissance, la nutrition minérale, la cohésion des carottes et le taux de conformité des plants. S'il optimise aussi les différentes régions et techniques culturales, le pépiniériste pourra ainsi améliorer sa marge bénéficiaire.

Mots clés : croissance, épinette noire, hivernage, nutrition minérale, *Picea mariana*, surélévation, taux de conformité

Abstract

In forest nurseries of Quebec (Canada), raising plant containers is a common practice that ensures efficient drainage and the necessary air circulation for root growth and air pruning. Before winter, the containers are usually placed on the ground to better isolate the plants from the winter frost. Yet, in order to reduce production costs, container manipulations, worker musculoskeletal disorders and to alleviate problems of labour scarcity, some nursery operators prefer to lay the containers directly on the soil all year long; others choose to keep them raised during the winter.

*This study aims i) to compare the growth and mineral nutrition of black spruce (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) 1+0 seedlings grown at an operational scale in containers that are raised 20 cm above the ground or placed directly on gravel; ii) to evaluate the effects of raising the containers on the achievement of the seedling morphophysiological quality standards used in Quebec; iii) to discuss the consequences of keeping the containers raised during winter on seedling viability.*

Seedlings in raised containers had a greater dry mass than those in the control treatment (mean increases of 18, 23 and 20% for roots, shoot and the whole plant, respectively). They also had higher mineral element contents. Regarding the current quality standards, seedlings in raised containers reached a better compliance rate (91.67%, or category A) than those in the unraised control (88.83%, or category B).

Results clearly show that raising growth containers improves seedling growth, mineral nutrition, plug cohesion and compliance rate. This practice can help increase the nursery operator's profit margin, provided other aspects of seedling management are optimized.

Keywords: black spruce, compliance rate, container raising, growth, mineral nutrition, *Picea mariana*, wintering

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



1. Introduction

Au cours des dernières années, les 19 pépinières forestières de la province de Québec (6 publiques et 13 privées) ont produit, en moyenne, 130 millions de plants par an. Pour livrer des plants forestiers qui respectent les normes et critères morpho-physiologiques de qualité (Veilleux *et al.* 2014) tout en diminuant les coûts de production, les pépiniéristes utilisent des itinéraires techniques et des régies de culture (irrigation, fertilisation, protections hivernales, etc.) adaptés au calendrier de production de chaque gabarit de plant selon l'essence, le type de récipient et la date de livraison au site de reboisement.

Dans beaucoup de pépinières forestières au Québec, les récipients de culture (ou conteneurs) sont surélevés à 15 à 20 cm du sol pendant la première saison de croissance sous tunnel (1+0) et la deuxième saison de croissance à l'extérieur (2+0). Cette surélévation des récipients a pour objectif d'assurer un drainage efficace du substrat et une circulation d'air nécessaires au cernage et à la croissance des racines (Lamhamedi *et al.* 2013a, Samson *et al.* 2006).

Dans certaines pépinières, les récipients ne sont surélevés que pendant la deuxième année de croissance des plants (2+0). Par ailleurs, dans quelques pépinières forestières qui possèdent des serres ou des tunnels adaptés à la mécanisation, les récipients sont surélevés à une hauteur de 60 cm à 100 cm pour diminuer les coûts de production. Finalement, certains producteurs choisissent de laisser les récipients de culture au sol pour diminuer les coûts de production, les manipulations des récipients et les troubles musculo-squelettiques, de même que pour pallier les problèmes de la rareté de la main-d'œuvre.

Bien que les plants forestiers soient produits sur la base de contrats entre le gouvernement du Québec et la pépinière forestière comprenant plusieurs clauses à respecter (normes morpho-physiologiques que les plants doivent atteindre, etc.), le choix des techniques de production revient uniquement au pépiniériste. La décision de surélever ou non les récipients tient compte de différents critères relatifs au matériel de surélévation : son coût, la facilité et la sécurité de sa manipulation, sa polyvalence eu égard aux divers types de récipients, sa durabilité et sa résistance lors des manipulations, et finalement, sa facilité d'entreposage. Certains pépiniéristes laissent les récipients des essences peu sensibles au gel hivernal surélevés en hiver tout en ayant recours à certaines techniques de protection comme l'utilisation de toiles de

protection, la fabrication artificielle de neige à l'aide de canons à neige ou la combinaison de ces deux techniques (Lamhamedi *et al.* 2013a).

Ainsi, les pépiniéristes forestiers du Québec qui surélèvent les récipients utilisent une variété de supports et plateaux : plateaux de plastique et de métal (figure 1a-b), treillis de broche, palettes de bois surélevées par des récipients, récipients en surplus et tables de culture mobiles en aluminium (figure 1c-f). Certaines pépinières forestières privées et publiques sont dotées de tables de culture en acier ou en aluminium (figure 1f) qui facilitent la mécanisation et le déplacement des récipients. Les pépiniéristes qui ne surélèvent pas les récipients les posent, par exemple, directement sur du gravier (figure 1g), à même le sol ou sur des planches de bois en contact direct avec celui-ci (figure 1h).

Nos observations ont révélé que le fait de poser des récipients de culture sur des planches de bois causait plusieurs problèmes, et ce, que les récipients soient surélevés ou non. D'abord, les racines des plants dont les cavités reposent directement sur des planches de bois ne subissent pas de cernage aérien, puisque les planches maintiennent des conditions humides idéales pour la croissance des racines à l'extérieur du récipient (figure 2a-b). Or, les racines qui croissent à l'extérieur de la carotte de substrat ne contribuent pas au maintien de la cohésion de celle-ci. De plus, lorsque des conditions humides sont maintenues, ces racines externes constituent un milieu propice pour la conservation et la multiplication du mycélium, de même que la propagation des champignons (figure 2a-c). Enfin, la réutilisation d'une année à l'autre de planches de bois infectées (p. ex. avec des spores) constitue un foyer d'infection par des agents pathogènes.

En Amérique du Nord, en Europe et en Scandinavie, la plupart des producteurs de plants forestiers surélèvent leurs récipients de culture (Landis *et al.* 1995). Par contre, dans les pays en développement, la surélévation n'est pas une pratique courante, sauf dans les pépinières modernes. En général, les plants sont produits dans des sachets de polyéthylène noir posés directement au sol (Jaenicke 1999, Lamhamedi *et al.* 2000). À l'échelle mondiale, la culture en sachets de polyéthylène est le mode de production de plants le plus utilisé dans les pépinières forestières.

Au Québec, la production de plants forestiers en pépinière forestière comporte de nombreux défis. Les interactions complexes entre les variables

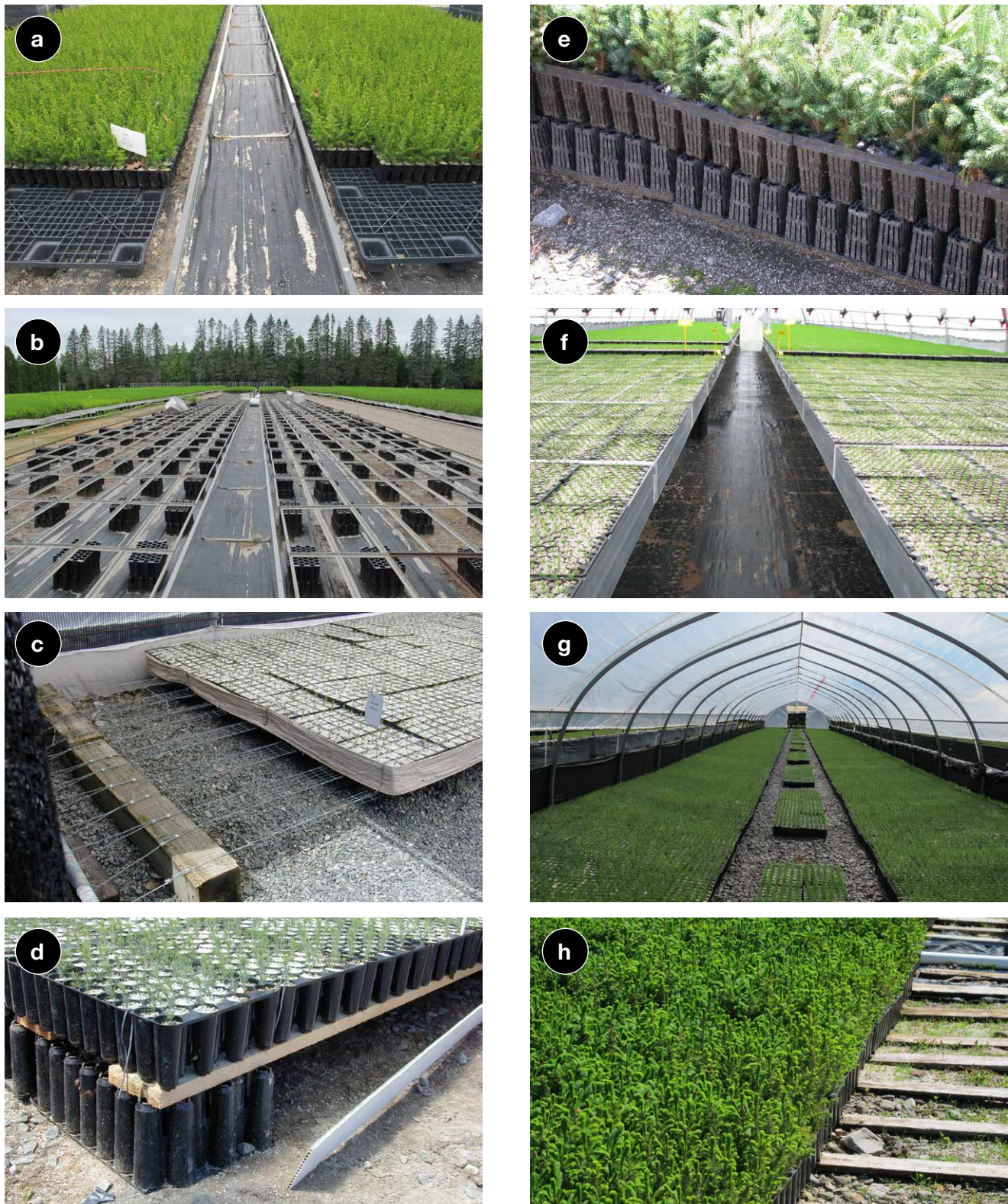


Figure 1. Différents types de supports et de plateaux de culture utilisés pour la production de plants en récipients dans les pépinières forestières du Québec : a) plateaux de plastique; b) plateaux de métal; c) treillis de broche; d) palettes de bois posées sur des récipients renversés; e) récipients en surplus; f) tables de culture mobiles en aluminium; g) aucune surélévation : les récipients sont posés directement sur du gravier ou sur le sol, recouvert ou non d'une membrane de géotextile cuivrée; et h) aucune surélévation : récipients posés sur des planches de bois en contact direct avec le sol (Photos : M.S. Lamhamedi).

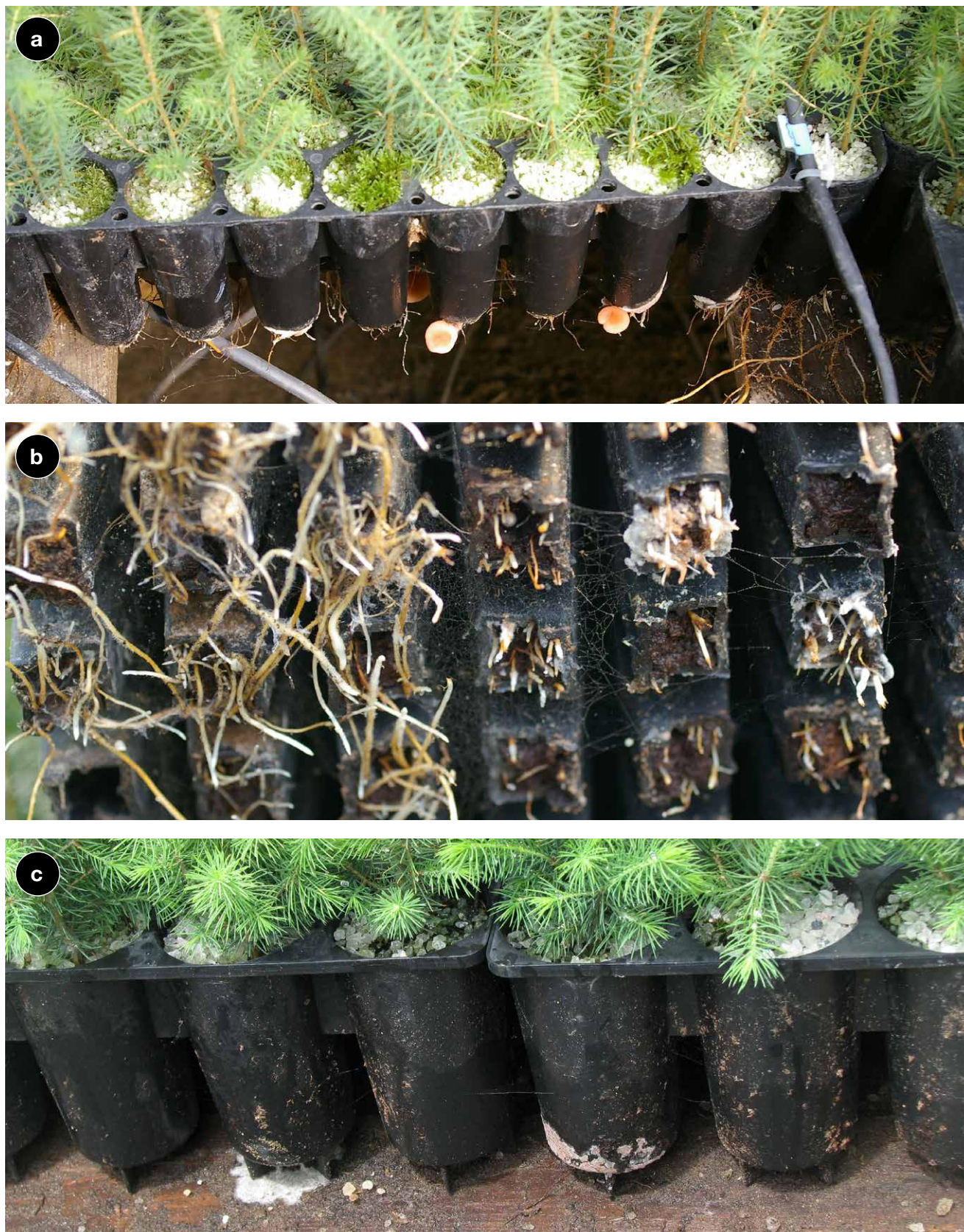


Figure 2. Les planches de bois favorisent le maintien de conditions humides favorables à la croissance des racines à l'extérieur des cavités, que les récipients soient a) surélevés ou b) posés directement au sol. Cette pratique favorise aussi c) le développement du mycélium (Photos : M.S. Lamhamedi).

environnementales, les stress environnementaux (étés pluvieux ou secs, températures d'été très élevées dans les tunnels et à l'extérieur, gels hâtifs en automne ou gels tardifs au printemps, etc.) et la très courte durée de la saison de croissance active imposent des contraintes majeures aux pépiniéristes. Le recours ou non à la surélévation des récipients influence la croissance et l'atteinte des normes de qualité morphophysiologique des plants, notamment celles concernant l'insuffisance racinaire. Ces effets ont peu été documentés dans les conditions opérationnelles des pépinières forestières du Québec, aussi bien pendant la saison de croissance que lors de l'hivernage des plants. Or, parmi les normes et critères de qualité morphophysiologique des plants actuellement en vigueur, l'insuffisance racinaire contribue à elle seule au rejet, avant et après leur triage, de plusieurs millions de plants à l'échelle de la province (Lamhamedi *et al.* 2009). Selon ce critère, un plant sera rejeté si sa motte des racines se défait partiellement ou complètement après son extraction de la cavité du récipient, si cette motte se scinde en portions distinctes liées par un système racinaire non endommagé avec plus de 5 mm de discontinuité entre les portions, ou si plus de 33 % des racines périphériques sont mortes ou nécrosées (Veilleux *et al.* 2014).

Les objectifs spécifiques de cette étude consistent i) à comparer la croissance et la nutrition minérale de plants d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) 1+0 produits à une échelle opérationnelle en récipients surélevés à une hauteur de 20 cm ou posés directement au sol sur du gravier; ii) à évaluer les effets de cette surélévation des récipients sur l'atteinte par les plants des normes de qualité morphophysiologique utilisées au Québec; et iii) à discuter des répercussions du maintien ou non de la surélévation sur la viabilité des plants lors de leur hivernage.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel végétal

Les graines d'épinette noire (lot de semences : EPN-V1-LEV-2-2; code de culture GI05EPN05-C06) ont été ensemencées au printemps 2007 dans des récipients 67-50 (IPL, Saint-Damien, Québec, Canada; 67 cavités, 50 cm³/cavité; longueur : 35,2 cm, largeur : 21,9 cm, hauteur : 9 cm; densité de culture : 864 plants/m²) dont les cavités ont été remplies d'un substrat à base de tourbe relativement

humide (18 % v/v, eau/substrat) ajusté à une densité moyenne de 0,09 g/cm³. Les proportions de particules très grosses (celles retenues sur les tamis de 10 mailles [mesh]), grosses et moyennes (celles retenues sur les tamis de 20 mailles), petites (celles retenues sur les tamis de 40, 100 et 200 mailles) et fines (celles retenues sur les tamis de 200 mailles) étaient respectivement de 12, 29, 60 et 11 %.

Les récipients ont été installés dans un tunnel, avec la production régulière de la pépinière forestière privée de Girardville (latitude : 49° 01' 06" N.; longitude : 72° 30' 42" O.). Les tunnels de cette pépinière, d'une capacité moyenne de 250 000 plants, étaient couverts d'une toile de polyéthylène laiteux (blanc) transmettant de 50 à 55 % de la lumière incidente (*Ginegar Plastic Products Ltd, multi-layer greenhouse cover film*, type UVA/White 45 %). Cette toile est rétractable sur les 2 côtés du tunnel, ce qui facilite l'aération et permet un certain contrôle des températures de l'air à l'intérieur de celui-ci.

2.2. Techniques culturales de production de plants

Les plants d'épinette noire ont été produits selon les techniques culturales standards pour la production de plants d'épinette noire (1+0) (Lamhamedi *et al.* 2009). L'éclaircie a été effectuée une fois la germination terminée, sans repiquage des semis dans les alvéoles vides. La majorité des alvéoles possédaient au moins un plant.

L'irrigation a été assurée par des gicleurs dotés d'un spectre d'arrosage carré (7,3 m × 7,3 m) (*Rain-Jet*, modèle 66U, Harnois, Québec, Canada). Le suivi des teneurs en eau du substrat (% v/v) a été réalisé à l'aide de la méthode gravimétrique avant l'irrigation (Lamhamedi *et al.* 2009).

La fertilisation a été appliquée 2 fois par semaine, selon les besoins des plants et les standards de croissance à atteindre, en adaptant l'approche de nutrition minérale en usage dans les pépinières forestières du Québec (Girard *et al.* 2001, Langlois et Gagnon 1993). Les quantités totales d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K) appliquées pendant la saison de croissance ont atteint 18 mg N/plant, 15 mg P/plant et 18 mg K/plant. La solution fertilisante contenait également des éléments minéraux secondaires (calcium, magnésium et soufre : Ca, Mg et S) et des oligo-éléments (fer, manganèse, zinc, bore, etc.).

Un traitement de jours courts a été appliqué aux plants du dispositif du 30 juin au 18 juillet 2007, c'est-à-dire une fois que leur hauteur cible avait été atteinte (Lamhamedi *et al.* 2009), conformément aux techniques culturales standards de la pépinière de Girardville. Ce traitement a pour objectif d'initier la formation des bourgeons pour arrêter la croissance en hauteur. Il consiste à recouvrir quotidiennement tous les plants d'une toile en polythène noire placée environ 40 cm au-dessus des apex terminaux des plants, et ce, de 16 h à 8 h le lendemain, pendant 14 jours. La photopériode est ainsi réduite à 8 h.

2.3. Dispositif expérimental et variables mesurées

Les récipients des 2 traitements (récipients surélevés à 20 cm et récipients témoins posés directement au sol sur une couche de gravier) ont été distribués aléatoirement à l'intérieur d'un dispositif expérimental à blocs aléatoires complets comptant 5 blocs (répétitions). Chaque traitement comprenait au moins 21 récipients par bloc. Les récipients surélevés étaient posés sur des planches en bois qui reposaient elles-mêmes directement sur des récipients inversés.

La fertilité du substrat, la croissance des plants et la nutrition minérale ont été évaluées au début du mois de novembre 2007, soit à la fin de la saison de croissance. Nous avons échantillonné 1 récipient par traitement dans chaque bloc expérimental. Le récipient du 1^{er} bloc a été choisi aléatoirement pour chaque traitement, et le récipient de même position a été choisi systématiquement dans les 4 autres blocs. Dans chacun de ces récipients, 50 plants parmi les 67 ont été choisis aléatoirement et doucement extraits de leurs cavités (total : 250 plants/traitement). Ces échantillonnages ont permis de déterminer plusieurs variables morphophysiologiques : la hauteur et le diamètre au collet (mesures individuelles sur 50 plants/bloc/traitement), les masses sèches des parties aériennes et des racines (5 échantillons composites de 10 plants par bloc/traitement), le contenu en éléments minéraux des plants (1 échantillon composite de 50 plants par bloc/traitement). Les masses des parties aériennes et des racines ont été déterminées après un séchage de 48 heures dans une étuve à 60 °C.

Les analyses minérales du substrat, des parties aériennes et des racines des plants ont été effectuées par le laboratoire de chimie organique et inorganique (ISO/CEI 17025) de la Direction de la recherche forestière. La fertilité (N-NO₃, N-NH₄, N

minéral, P, K, Ca et Mg), le pH (H₂O) et la conductivité électrique du substrat ont été déterminés pour chaque date d'échantillonnage en utilisant un échantillon composite/bloc/traitement (50 carottes extirpées des 50 cavités/échantillon composite/bloc). Le statut nutritionnel des plants est exprimé en contenu (concentration × masse sèche) de chaque élément par plant ou partie du plant, car il reflète précisément l'absorption et l'accumulation des éléments minéraux dans les plants (Timmer 1991).

Au début du mois de juillet 2008, avant la livraison des plants vers les sites de reboisement, 120 plants de chaque traitement, choisis aléatoirement, ont été qualifiés selon les 25 normes et critères indiqués dans les clauses contractuelles de production de plants (Veilleux *et al.* 2014). Cette qualification a été effectuée par du personnel accrédité par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Elle permet d'établir le taux de conformité de chaque lot de plants, lequel est utilisé comme barème pour le paiement des différents lots produits par les pépiniéristes.

2.4. Analyses statistiques

Afin d'évaluer les effets des deux traitements sur les variables morphophysiologiques, des analyses de la variance ont été effectuées avec la procédure MIXED de SAS 9.2. Le modèle général est le suivant :

$$y_{ijk} = \mu + E_i + \gamma_j + \varepsilon_{ijk}$$

où

y_{ijk} est la variable réponse associée à la répétition k dans le bloc j du traitement i ,

μ est la moyenne générale du modèle,

E_i est l'effet fixe du traitement i , $i \in \{sol, sur\acute{e}lev\acute{e}\}$,

γ_j est l'effet aléatoire du bloc j , $j \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$, et

ε_{ijk} est l'erreur résiduelle associée à la répétition k du bloc j du traitement i , $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$.

Les hypothèses de normalité des résidus et d'homogénéité de la variance ont été vérifiées graphiquement. Lorsque la normalité n'était pas respectée, une analyse de la variance sur les rangs (analyse non paramétrique) a été effectuée. Si les résultats de l'analyse de la variance basée sur les rangs étaient les mêmes que ceux de l'analyse sur les données non

transformées, les résultats de cette dernière analyse sont présentés. Dans le cas contraire, l'analyse non paramétrique a été favorisée. Une approche basée sur des simulations a été utilisée pour toutes les variables mesurées afin de détecter des différences significatives 2 à 2. Le seuil théorique utilisé pour les analyses statistiques a été fixé à 5 %.

3. Résultats et discussion

3.1. Effets de la surélévation sur la croissance et la nutrition minérale des plants

L'effet du traitement de surélévation était significatif pour toutes les variables de croissance mesurées à la fin de la saison de croissance, notamment la hauteur ($p = 0,0491$), le diamètre ($p < 0,0001$) et les masses sèches de la partie aérienne ($p < 0,0001$), des racines ($p = 0,0028$) et du plant entier ($p < 0,0001$). Toutes ces variables de croissance ont des valeurs significativement plus grandes chez les plants surélevés que chez les plants témoins non surélevés (figure 3). Ainsi, par exemple, la surélévation des récipients a augmenté de façon significative la masse sèche des racines, des parties aériennes et celle des plants entiers respectivement de 18 %, 23 % et 20 % par comparaison aux plants témoins non surélevés (figures 3 et 4).

Les racines, les parties aériennes et les plants entiers des récipients surélevés avaient aussi des contenus tissulaires significativement plus élevés en P ($p = 0,0433$), en K ($p = 0,0125$), en Ca ($p = 0,0161$) et en Mg ($p = 0,0280$) que ceux des récipients témoins (figure 5). Malgré ces différences, les plants des 2 traitements ne montraient aucun symptôme de carence en éléments minéraux. Les concentrations en minéraux étaient optimales pour la croissance des parties aériennes et des racines, de même que pour les différents processus physiologiques des plants (photosynthèse, etc.; Gagnon et Lamhamedi 2011).

Le contenu tissulaire en N des plants ne différait pas entre les plants des 2 traitements (figure 5). Ce contenu correspond à une concentration foliaire de 2,11 % pour les plants surélevés et de 1,88 % pour les plants témoins, ce qui est supérieur à la concentration foliaire minimale en N de 1,6 % exigée au Québec lors de la livraison des plants pour le reboisement (Veilleux *et al.* 2014). La croissance des racines est intimement liée aux produits de la photosynthèse courante, dont la disponibilité est fortement

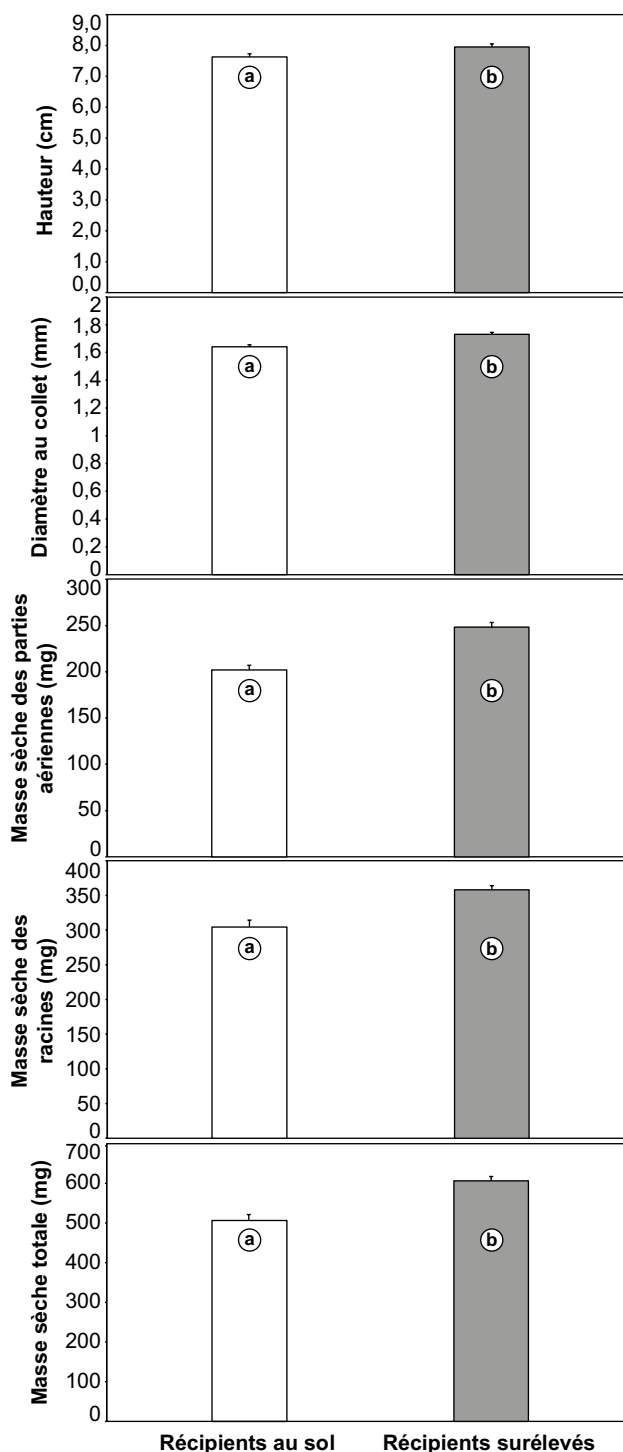


Figure 3. Comparaison de la hauteur, du diamètre au collet, des masses sèches des parties aériennes et des racines, ainsi que de la masse sèche totale des plants d'épinette noire 1+0 cultivés sous tunnel dans des récipients 67-50 posés au sol ou surélevés. Les barres d'erreur représentent l'erreur type; des lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes ($p < 0,05$).

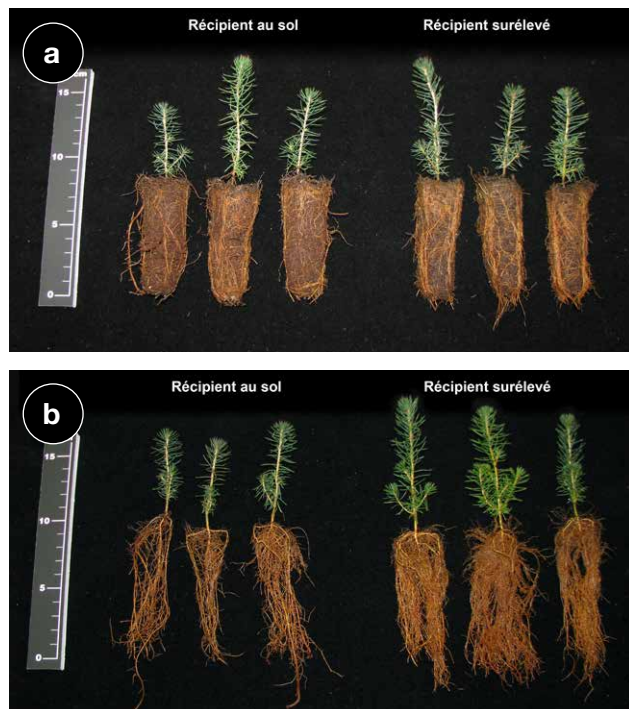


Figure 4. Comparaison, à la fin de la saison de croissance, du système racinaire de plants d'épinette noire 1+0 cultivés sous tunnel dans des récipients 67-50 surélevés ou posés au sol : a) colonisation de la carotte de substrat par les racines et b) apparence du système racinaire après lavage (Photos : M. Renaud).

corrélée au taux de photosynthèse et à la concentration en N (Lamhamedi et Bernier 1994). L'absence de différences de contenu en N entre les 2 traitements et la présence de concentrations foliaires optimales en N (Gagnon et Lamhamedi 2011) pour les différents processus physiologiques indiquent clairement que les différences observées dans la croissance racinaire sont attribuables à l'effet de la surélévation des récipients.

3.2. Effets de la surélévation des récipients sur l'environnement du substrat

Les teneurs en eau moyennes du substrat ont varié de 20 à 51 % (v/v) pour les plants surélevés (figure 6), et ce, pendant toute la saison de croissance. Pour les plants du traitement témoin, les teneurs en eau à la base de chaque cavité sont élevées à cause généralement du manque de circulation d'air (données non présentées). Ainsi, les teneurs en eau dans la zone du bas dépassent généralement de 7 à 9 % (v/v) celles au centre ou dans la partie supérieure de la cavité (Lambany 1998). Pour mieux cerner l'évolution

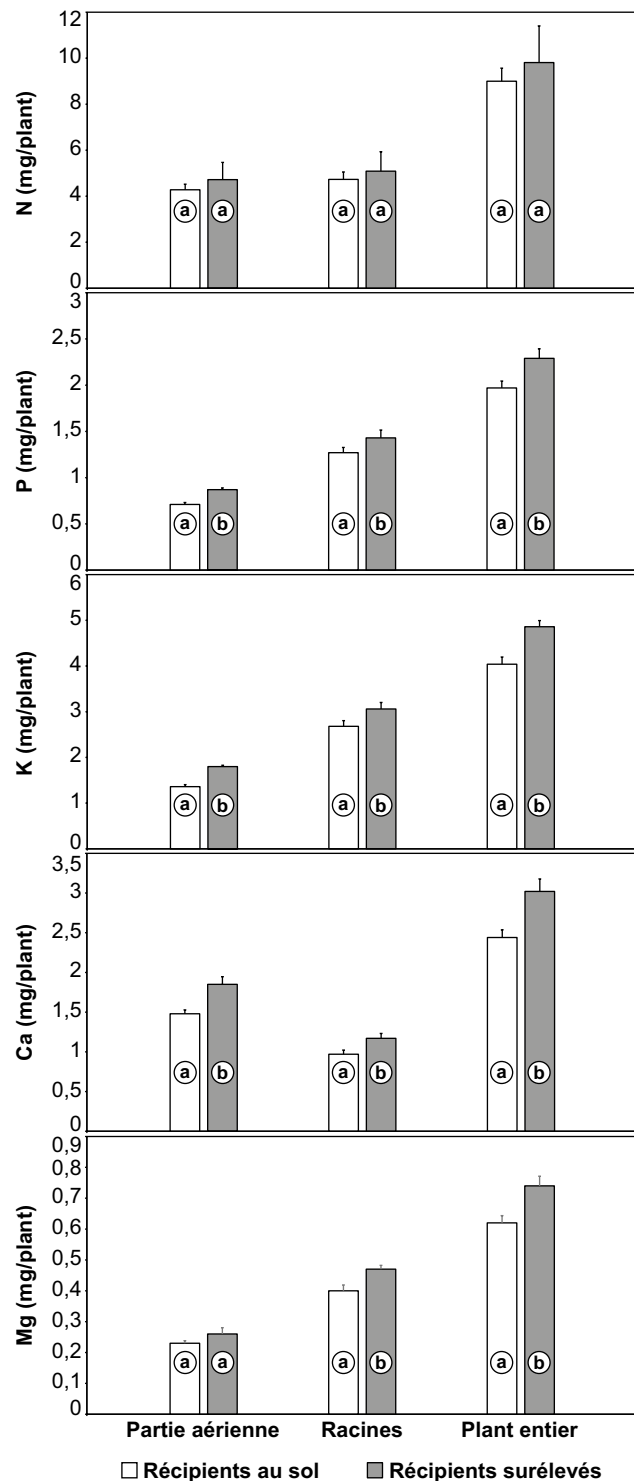


Figure 5. Comparaison, à la fin de la saison de croissance, du contenu en éléments minéraux (N, P, K, Ca et Mg) des parties aériennes, des racines et de plants entiers d'épinette noire 1+0 cultivés sous tunnel dans des récipients 67-50 surélevés ou posés au sol. Les barres d'erreur représentent l'erreur type; des lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes ($p < 0,05$).

des profils des teneurs en eau du substrat dans les cavités des 2 traitements, il faudrait quantifier les variations des teneurs en eau du substrat avant et après irrigation, et ce, tant dans le haut qu'au centre et dans le bas des cavités. D'autres travaux que nous avons réalisés ont démontré qu'une surélévation à 70 cm des récipients d'épinette noire (provenance, récipient et densité du substrat semblables à cette étude) peut, à elle seule, entraîner une baisse significative des teneurs en eau volumétriques du substrat de l'ordre de 20 % (%, v/v) par rapport à une surélévation standard de 20 cm (figure 6 et Lamhamedi *et al.* 2013a). Cette baisse serait attribuable en partie au grand volume d'air qui circule sous les récipients et qui dessèche ceux-ci lors des journées chaudes et ensoleillées, et en partie au drainage accéléré par la gravité.

La gestion et les valeurs cibles des teneurs en eau moyennes du substrat étaient identiques pour les 2 traitements. De la fin de la période de germination au début de la saison de croissance active, la teneur en eau du substrat (récipients surélevés à 20 cm du sol) était maintenue entre 27 et 51 % (v/v) (figure 6). Avant le traitement de jours courts, la teneur en eau a été abaissée à 27 %, puis augmentée rapidement à 49 % (v/v). Ceci a permis de ralentir la croissance en hauteur des plants afin de ne pas dépasser la hauteur ciblée par le pépiniériste. Dès le 17 juin et pendant le traitement de jours courts (du 30 juin au 18 juillet), la teneur en eau moyenne du substrat a été réduite progressivement de 49 à 22 % (v/v). Ensuite, une nouvelle diminution importante de la teneur en eau du substrat (de 40 % [v/v] le 26 juillet à 20 % [v/v] le 1^{er} août) a permis d'accélérer la fermeture complète des bourgeons et d'éviter leur débourement ultérieur. Après cette date, la teneur en eau moyenne du substrat a été maintenue entre 33 et 45 % (v/v).

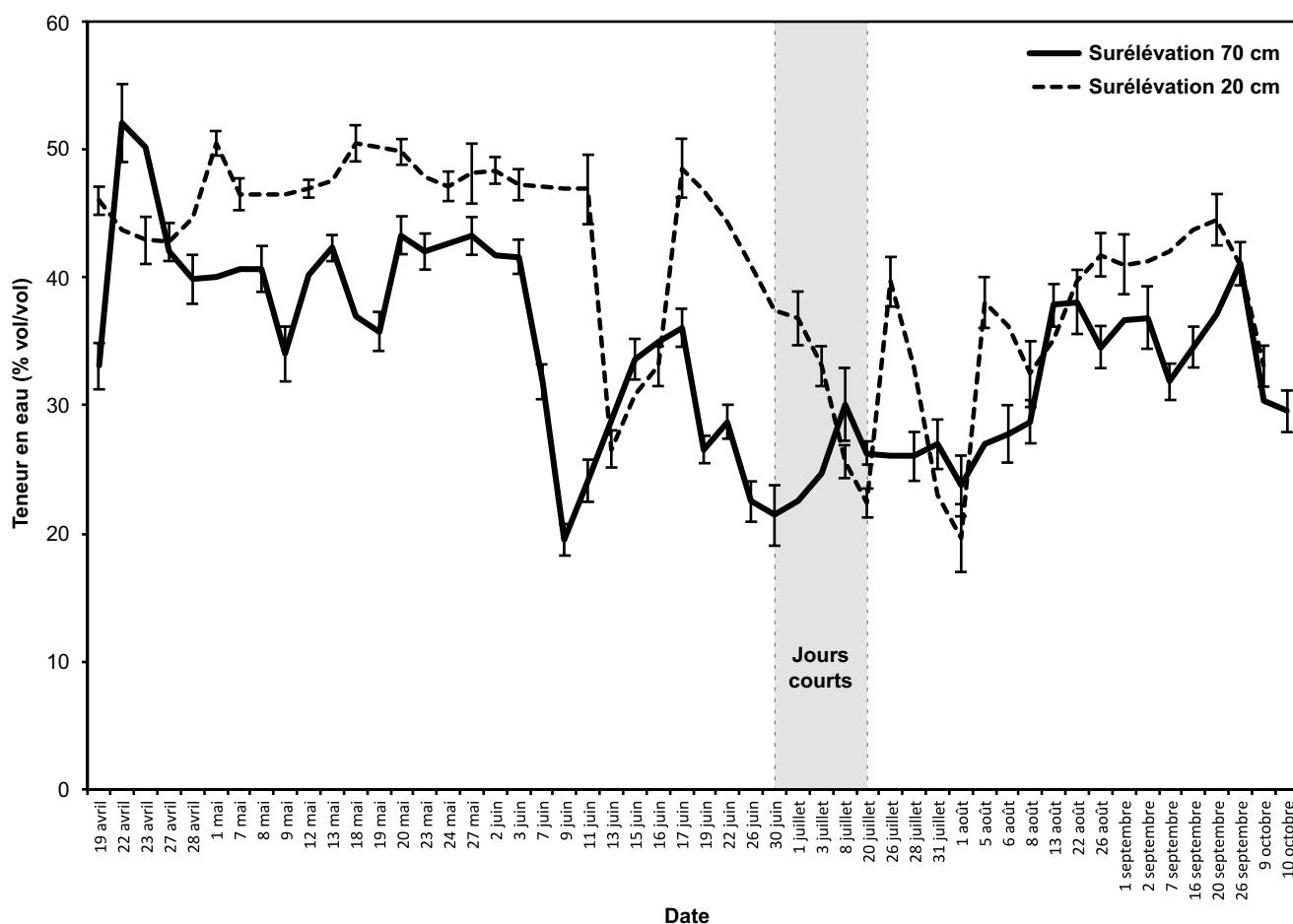


Figure 6. Variations des teneurs en eau du substrat des récipients surélevés à 20 cm (cette étude) ou à 70 cm du sol (Lamhamedi *et al.* 2013a) pendant toute la saison de croissance chez les récipients surélevés à 20 cm et à 70 cm. Chaque point représente la moyenne des teneurs en eau mesurées dans 12 récipients. Les barres d'erreur représentent les erreurs types. La zone grise délimite la période du traitement de jours courts.

Les fluctuations des températures observées au cours de la présente étude sont déjà publiées (Lamhamedi *et al.* 2013a). En été, pendant la saison de croissance active, le fait de surélever ou non les récipients ne modifie pas les températures optimales pour la croissance des plants, notamment pour la croissance en hauteur (24 °C le jour/28 °C la nuit) ou en diamètre (30 °C/20 °C), la masse sèche des parties aériennes (24 °C/22 °C) et celle des racines (21 °C/19 °C) (Lamhamedi et Bernier 1994, Odlum et Ng 1995). La température dans l'environnement physique des plants est davantage influencée par différentes techniques, notamment le type de toile recouvrant les tunnels (polyéthylène clair ou blanc) (Lamhamedi *et al.* 2011a) et le traitement de jours courts (Lamhamedi *et al.* 2013b).

S'il surélève les récipients, le pépiniériste doit ajuster ses techniques culturales, notamment l'irrigation, en tenant compte de l'évolution des propriétés physiques du substrat (porosité, diffusion des gaz, etc.) (Boudreault *et al.* 2014, Pépin *et al.* 2011), du traitement de jours courts (Lamhamedi *et al.* 2009, 2013b), du type de toile de polyéthylène (Lamhamedi *et al.* 2011a) et du stade de croissance des plants (Bergeron *et al.* 2004, Lamhamedi *et al.* 2003).

Lorsque des récipients sont posés directement au sol, l'air ne circule pas sous les récipients, le drainage est ralenti et la durée de présence de la nappe perchée (c'est-à-dire la zone saturée à la base de chaque cavité dont l'eau est retenue par capillarité; Lamhamedi 2006, Landis *et al.* 1989) augmente significativement. Ainsi, pour un même substrat, la proportion de la carotte saturée en eau par la nappe perchée varie selon la profondeur (ou la hauteur) de la cavité du récipient. Par exemple, la nappe perchée peut occuper jusqu'à 50 % du volume d'une cavité haute de 10 cm, mais seulement 25 % de celui des cavités plus profondes (p. ex. 20 cm; Lamhamedi 2006, Landis *et al.* 1989). Cela veut dire que, pour des plants produits dans de petites cavités (p. ex., les plants de petite dimension, ou PPD), jusqu'à 50 % des racines sont ennoyées à chaque saturation du substrat par l'eau d'irrigation ou de pluie. De plus, les périodes de saturation du substrat ou d'ennoyage des racines (et donc, de conditions très limitées en oxygène) qui suivent l'irrigation normale, celle pour lutter contre les gels hâtifs et tardifs, ou encore, des pluies excessives ou torrentielles, sont plus longues lorsque les récipients sont déposés à même le sol (à plus forte raison si celui-ci est mal drainé).

À cet effet, certains travaux ont montré que les conditions saturantes en eau engendrées par l'ennoyage des plants d'épinette noire induisent rapidement une diminution significative de la photosynthèse, de la transpiration, de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'absorption de l'ammonium (NH_4^+) et du nitrate (NO_3^-) (Islam et Macdonald 2009). Les conditions d'excès d'eau, qu'elles soient causées par la présence de la nappe perchée ou par l'ennoyage des cavités lors des irrigations ou des pluies excessives (figure 7), figurent parmi les principales causes de la diminution significative de l'aération du substrat limitant l'élongation et la croissance des racines (Kozłowski 1982, 1987, 1997, Drew 1983). La croissance des racines cesse lorsque le taux de diffusion de l'oxygène est inférieur à $0,20 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ (Heiskanen 1993) parce que tous les espaces entre les particules du sol sont occupés par de l'eau. À cet effet, Boudreault *et al.* (2014) ont déterminé une zone optimale du coefficient de diffusivité relative des gaz ($D_s D_o^{-1}$ = de 0,003 à 0,016 $\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) qui permet une croissance maximale des racines des plants de fortes dimensions d'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss.). Ce coefficient exprime la vitesse des échanges gazeux dans le substrat par rapport à celle des échanges dans l'atmosphère. La diffusion des gaz devient plus lente en présence de conditions saturantes en eau qu'en présence d'air, ce qui nuit à la respiration aérobie des racines et favorise l'accumulation d'éthylène (Kozłowski 1997, Visser et Voesenek 2004). À son tour, cette accumulation d'éthylène contribue à inhiber la croissance des racines (Kreuzwieser et Rennenberg 2014).

Les faibles concentrations en oxygène dans la rhizosphère inhibent aussi la nitrification (conversion bactérienne du NH_4^+ en NO_3^-) et peuvent contribuer à cette accumulation de NH_4^+ dans le substrat (Lamhamedi 2006). À des concentrations de 10 mM, le NH_4^+ devient généralement toxique et réduit la croissance des racines et des parties aériennes (Britto et Kronzucker 2002). Pour les gymnospermes en conditions d'excès d'eau, un manque d'oxygène peut causer la mort des apex racinaires (Heiskanen 1993, 1995) ou des racines elles-mêmes dans un délai de 2 jours (Kozłowski 1982). L'absence d'aération dans la rhizosphère crée un milieu propice au développement des champignons responsables de la pourriture racinaire (p. ex. *Pythium*, *Phytophthora*, etc.; Bilderback et Jones 2001, Kozłowski 1987, Watson *et al.* 2014). La mise en culture des tissus nécrosés a confirmé la présence de ces champignons associés à des excès d'eau dans plusieurs lots de plants (épinette blanche,

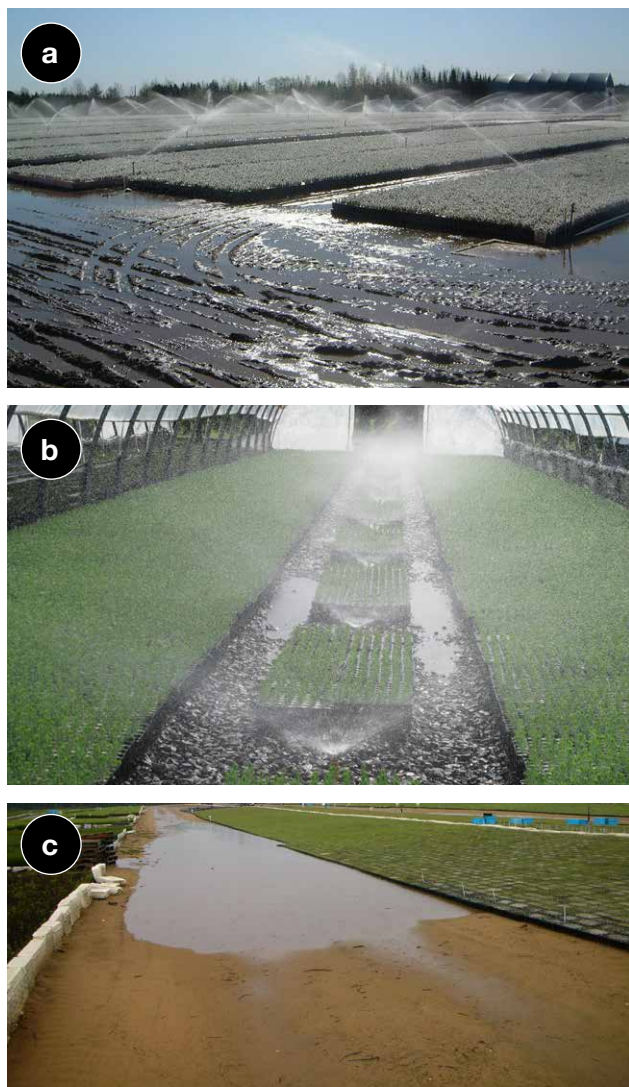


Figure 7. La pose des récipients directement au sol favorise l'allongement de la durée d'ennoyage des racines et des conditions anoxiques, notamment a) lors des irrigations pour lutter contre les gels tardifs ou hâtifs, b) lors des irrigations sous tunnel (stade 1+0) et c) lors des précipitations et des irrigations à l'extérieur (stade 2+0), plus particulièrement lorsque le drainage du sol n'est pas adéquat (Photos : M.S. Lamhamedi).

épinette noire, épinette de Norvège [*Picea abies* (L.) H. Karst.], pin gris [*Pinus banksiana* Lamb.], pin blanc [*Pinus strobus* L.], pin rouge [*Pinus resinosa* Aiton] et mélèze laricin [*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch] inventoriés dans le cadre du programme d'inspection et de surveillance des productions de plants forestiers au Québec (MRNF 2010).

L'aération du substrat est un processus dynamique qui n'est pas seulement déterminé par la surélévation des récipients. Il est aussi largement lié à la granulométrie des différents constituants du substrat, à l'évolution de sa densité selon le tassement engendré par les régies de culture (p. ex., l'irrigation), à la croissance des racines, etc. L'utilisation d'un substrat à granulométrie fine et l'absence de surélévation contribueront à augmenter la hauteur et la durée de présence de la nappe perchée (Lamhamedi 2006). Pour la production de plants forestiers, la dimension recommandée des particules de tourbe est de 0,8 à 6 mm. Si les particules sont plus petites que 0,8 mm, la capacité de rétention d'eau du substrat sera accrue à cause de la dominance des micropores (Lamhamedi 2006, Landis *et al.* 1990). À l'inverse, si les particules du substrat tourbeux sont plus grandes que 6 mm, la capacité de rétention d'eau du substrat sera faible, en raison de la dominance de macropores. Ainsi, le substrat sera sujet à un dessèchement rapide, ce qui obligera le pépiniériste à augmenter la fréquence des arrosages.

3.3. Qualité des plants livrables selon la surélévation

L'évaluation de la qualité morphophysiolgologique des plants selon les 25 critères et normes contractuels du MFFP a montré que le taux de conformité des plants d'épinette noire (1+0) dans les récipients 67-50 surélevés (91,67 %, catégorie A) était supérieur à celui des plants témoins cultivés au sol (88,83 %, catégorie B). Comme le prix des plants de catégorie A est supérieur à celui des plants de catégorie B, la surélévation des récipients permettra au pépiniériste d'augmenter sa marge bénéficiaire. Dans le cas de la surélévation de 70 cm, les plants d'épinette noire produits dans le récipient 67-50 (provenance, substrat et densité semblables à cette étude) et ayant également subi un traitement de jours courts se conformaient à 85,50 % aux normes contractuelles (Lamhamedi et Renaud, résultats non publiés).

3.4. Hauteur optimale de surélévation et hivernage des plants

La mise au sol des récipients en automne pour protéger les plants contre le gel hivernal et leur soulèvement au printemps nécessitent beaucoup de main-d'œuvre. Ces deux opérations sont coûteuses et constituent un frein majeur à l'intégration progressive de la mécanisation dans les pépinières forestières.

Pendant la période hivernale, le fait que les récipients soient surélevés ou posés au sol affecte l'évolution des températures dans les cavités et la viabilité des racines, tout comme les variations de l'épaisseur de la couche de neige naturelle ou artificielle et le type de protection hivernale utilisé (toiles géotextiles, canon à neige artificielle, clôtures à neige, brise-vent, remblai de terre, mise au sol des récipients, protection des îlots de plants par des planches en bois ou des feuilles de polystyrène etc.) (Corbeil *et al.* 2009, Lamhamedi *et al.* 2011b). La période à laquelle les racines des plants sont les plus vulnérables au gel s'étend de la mi-novembre à la mi-décembre, avant que la neige ne recouvre les plants et protège les racines du gel. Lors de certaines années exceptionnelles, la couverture nivale est absente pendant encore plus longtemps (par exemple, jusqu'à la mi-février en 2007) dans certaines pépinières forestières du Québec (Lamhamedi *et al.* 2011b), ce qui se traduit par des températures minimales plus froides ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et moins) dans le substrat.

En hiver, les variations des températures dans les racines et le substrat sont généralement influencées par la température de l'air, et plus particulièrement par celle de l'air confiné sous les récipients. Sous des récipients non couverts par de la neige, plus le volume d'air est grand au début de l'hiver (ce qui dépend de la hauteur de surélévation) et plus le taux de refroidissement (baisse de température en $^{\circ}\text{C}$ par jour ou par heure) dans les racines et le substrat sera lent. Lambany et Renaud (1998) ont démontré que, lorsque des récipients d'épinettes noires étaient surélevés à au moins 15 à 20 cm du sol, l'air sous-jacent maintenait le substrat à une température suffisamment chaude pour prévenir les dommages aux racines. En comparant différentes hauteurs de surélévation des récipients (6, 12,5 et 25 cm), Gélinas et Lavergne (2009) ont observé que les températures minimales étaient plus élevées dans les racines et le substrat de récipients surélevés à 25 cm par rapport aux autres hauteurs. Jusqu'à la mi-février, dans des récipients posés au sol, les moyennes des températures minimales dans les cavités (substrat et racines) variaient de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en l'absence de neige, et de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en présence de la neige (Lamhamedi *et al.* 2011b). Dans des récipients surélevés à l'aide de plateaux en métal et en l'absence de neige, les températures moyennes journalières les plus froides en janvier ont atteint $-11,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans le substrat et $-22,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ au ras des plants. Par contraste, dans des récipients surélevés sous

couvert de neige, les températures n'ont atteint que $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans le substrat et $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ au ras des plants (Lambany et Renaud 1998). L'absence de neige au début de l'hiver augmente à elle seule le pourcentage de mortalité des plants, selon les essences, de 5 à 23 % (Lamhamedi *et al.* 2011b).

Pour diminuer les coûts de manipulation des récipients en automne et au printemps, certains pépiniéristes choisissent de garder les récipients surélevés en hiver. Cependant, lorsque les chutes de neige sont tardives, il y a un risque à laisser les récipients surélevés sans recourir à des mesures de protection hivernales comme des toiles géotextiles ou un couvert de neige artificielle (Lamhamedi *et al.* 2011b). En effet, la présence d'une couche de neige de 5 à 10 cm sert de « police d'assurance », car celle-ci constitue un excellent isolant qui protège les plants contre les fluctuations extrêmes des températures hivernales (Lamhamedi *et al.* 2011b). Actuellement, au Québec, deux pépinières forestières (Hautes Laurentides et Grandes-Piles) fabriquent de la neige artificielle à l'aide d'un canon à neige pour protéger les plants contre le gel hivernal. Cependant, la disponibilité d'un seul canon à neige limite la capacité de ces pépinières à traiter de grandes surfaces en peu de temps. La stratégie consiste alors à mettre au sol les essences sensibles au gel hivernal (mélèze laricin [*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch], thuya occidental [*Thuja occidentalis* L.], etc.) et de ne laisser surélevés des récipients que sur une superficie pouvant être couverte rapidement grâce au canon à neige. À la pépinière de Grandes-Piles, 3,8 heures suffisent pour couvrir un secteur de 800 m² avec une couche de neige épaisse de 4 cm à l'aide d'un canon à neige dont la capacité d'enneigement est supérieure à 45 m³/h à $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Goulet, 2016). Le seul moyen de traiter rapidement de plus grandes surfaces serait de louer des canons à neige supplémentaires. Cette possibilité dépend toutefois de la situation financière de chaque pépinière.

De ce qui précède, nous croyons qu'une hauteur de surélévation de 20 à 25 cm serait optimale pour maintenir une bonne aération sous les récipients, favoriser le drainage rapide de la nappe perchée pendant la saison de croissance active (surtout pour les plants produits à l'extérieur soumis aux précipitations naturelles) et maintenir une bonne masse d'air à des températures relativement chaudes au début de l'hiver.

4. Conclusion et portée opérationnelle des résultats

La surélévation des récipients à une hauteur de 20 cm a permis d'augmenter de façon significative la croissance et le contenu en éléments minéraux des différentes parties des plants d'épinette noire (1+0) cultivés en tunnel, ainsi que leur taux de conformité par rapport aux plants témoins dont les récipients étaient déposés au sol.

La surélévation des récipients a diminué le nombre de plants rejetés à cause de l'insuffisance racinaire et amélioré leur qualité morphophysiologique ainsi que leur taux de conformité. À elle seule, elle a permis d'augmenter de 18 % la masse des racines des plants d'épinette noire 1+0 en récipients 67-50 par rapport à celle des plants témoins, ce qui a contribué à l'amélioration de la cohésion des carottes des plants. La surélévation des récipients permet de diminuer la hauteur de la nappe perchée et l'effet négatif des conditions anoxiques générées par celle-ci dans chaque cavité lors des apports d'eau.

Au Québec, l'approvisionnement en tourbe constituée de fibres grossières est devenu difficile et coûteux, ce qui force certains pépiniéristes à recourir à des substrats tourbeux plus fins. Or, des récipients posés au sol, particulièrement lorsqu'ils contiennent des substrats tourbeux à granulométrie fine, ne permettent pas de créer des conditions favorables à la croissance des racines, aux échanges gazeux des plants (photosynthèse, transpiration, etc.), à la diffusion des gaz dans le substrat, etc. Dans ce contexte, la surélévation des récipients est essentielle pour améliorer le profil hydrique des cavités et diminuer le nombre de plants rejetés à cause des conditions non optimales pour la croissance des plants et les processus physiologiques (photosynthèse, croissance des racines, nutrition minérale, etc.).

Malgré les avantages de la surélévation des récipients, les effets positifs de cette pratique sur la croissance et la qualité morphophysiologique des plants ne peuvent être observés que si le pépiniériste arrive à optimiser les différentes techniques et régies de culture (granulométrie du substrat, diffusivité des gaz et aération du substrat, ensemencement hâtif, irrigation, fertilisation, etc.) selon les stades de croissance des plants. Par ailleurs, soulignons que le maintien des plants surélevés en hiver exige l'utilisation de protection hivernale sur les plants (toiles géotextiles, neige, etc.), particulièrement si les chutes de neige sont tardives.

Remerciements

Nous tenons sincèrement à remercier Mme Nancy Tanguay, directrice générale, Mme Johanne Minier et tout le personnel de la pépinière de Girardville pour leur aide technique exceptionnelle pendant toutes les phases de ce projet. Nous remercions M. Denis Gélinas de la pépinière de Grandes-Piles, M. Jean-Philippe Gagnon Fleury de l'Université Laval et Mme Josianne DeBlois de la Direction de la recherche forestière (DRF) pour leur aide lors des analyses statistiques, ainsi que tout le personnel du laboratoire de chimie organique et inorganique (DRF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) pour les analyses minérales des échantillons.

Nous remercions M. Jean Gagnon, chercheur à la DRF, pour ses suggestions lors de la révision de cette note de recherche, ainsi que l'éditeur associé (Dr. Marcel Prévost) et les réviseurs anonymes pour leurs commentaires effectués dans le cadre du processus de révision scientifique par les pairs. Nos remerciements s'adressent également à Mmes Nathalie Langlois et Maripierre Jalbert pour la mise en page et à Mmes Viviane Saint-Arnaud et Denise Tousignant de la DRF pour leur contribution lors la révision complète et l'édition de cette note de recherche forestière.

Le financement de ce projet de recherche a été assuré par la DRF (MFFP) accordé au Dr Mohammed S. Lamhamedi (projet n° 3321 142332093 : Optimisation des principales pratiques culturales affectant l'insuffisance racinaire et la qualité morphophysiologique des plants produits en pépinière forestière).

Les résultats de cet essai technique ont déjà fait l'objet d'activités de transfert de connaissances auprès des pépinières forestières du Québec, des comités techniques de certaines pépinières, des chercheurs et des étudiants gradués.

Références bibliographiques

- Bergeron, O., M.S. Lamhamedi, H.A. Margolis, P.-Y. Bernier et D.C. Stowe, 2004. *Irrigation control and physiological responses of nursery-grown black spruce seedlings (1+0) cultivated in air-slit containers*. Hort. Sci. 39(3): 599-605. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Hortscience-39-3.pdf>]
- Bilderback, T.E. et R.K. Jones, 2001. *Horticultural practices to reduce disease development*. Dans : Jones, R.K. et D.M. Benson, (éds.). *Diseases of woody ornamentals and trees in nurseries*. APS Press, The American Phytopathological Society, St. Paul, MN (États-Unis). p. 387-398.
- Boudreault, S., S. Pépin, J. Caron, M.S. Lamhamedi et I. Paiement, 2014. *Substrate aeration properties and growth of containerized white spruce: A case study*. Vadose Zone J. 13(3):1-15.
- Britto, D.T. et H.J. Kronzucker, 2002. NH_4^+ toxicity in higher plants: A critical review. J. Plant Physiol. 159: 567-584.
- Corbeil, A., D. Gélinas, B.-M. Gingras, L. Lavergne et M. Rioux, 2009. *Recherche de nouvelles méthodes de protection hivernale pour la production de plants en récipient. Rapport d'étape et recommandations du comité technique*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction générale des pépinières et des stations piscicoles. Rapport d'étape et recommandations du comité technique. 26 p.
- Drew, M.C., 1983. *Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: A review*. Plant Soil 75: 179-199.
- Gagnon, J. et M.S. Lamhamedi, 2011. *Les concentrations foliaires en azote recommandées au Québec pour les essences résineuses produites en récipients sont-elles adéquates?* Dans : Colas, F. et M.S. Lamhamedi (éds.), 2011. *Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation*. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011. Québec, QC. p. 47-51. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Recueil-resume-concentrations-carrefour2011.pdf>]
- Gélinas, D. et L. Lavergne, 2008. *Essai de protection hivernale avec de la neige artificielle à la pépinière de Grandes-Piles*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Pépinière de Grandes-Piles. Rapport d'étape. 22 p.
- 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 n° 111, 8 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Note111.pdf>]
- Goulet, S., 2016. *Utilisation du canon à neige en conditions opérationnelles*. Dans : *Journée de transfert de connaissances*. Office des producteurs de plants forestiers du Québec. 23-24 février 2016. Québec, QC. 38 p.
- Heiskanen, J., 1993. *Favourable water and aeration conditions for growth media used in containerized tree seedling production: A review*. Scand. J. For. Res. 8: 337-358.
- Heiskanen, J., 1995. *Irrigation regime affects water and aeration conditions in peat growth medium and the growth of containerized Scots pine seedlings*. New For. 9: 181-195.
- Islam, M.A. et S.E. Macdonald, 2009. *Current uptake of 15N-labeled ammonium and nitrate in flooded and non-flooded black spruce and tamarack seedlings*. Ann. For. Sci. 66(102): 1-11.
- Jaenicke, H., 1999. *Good tree nursery practices: Practical guidelines for research nurseries*. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). Nairobi (Kenya). 93 p.
- Kozłowski, T.T., 1982. *Water supply and tree growth. Part II: Flooding*. For. Abstr. 43(2): 145-161.
- Kozłowski, T.T., 1987. *Soil moisture and absorption of water by tree roots*. J. Arboric. 13(2): 39-46.
- Kozłowski, T.T., 1997. *Responses of woody plants to flooding and salinity*. Tree Physiol. Monograph. 1: 1-29.
- Kreuzwieser, J. et H. Rennenberg, 2014. *Molecular and physiological responses of trees to waterlogging stress*. Plant Cell Environ. 37: 2245-2259.

- Lambany, G., 1998. *Gestion de l'irrigation et de la fertilisation des productions d'épinettes 1+0 cultivées dans le récipient IPL 25-350A*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Synthèse des textes des conférences présentées dans le cadre du Colloque sur l'irrigation et la fertilisation. 24-25 mars 1998. Sainte-Foy, QC. p. 1-8.
- Lambany, G. et M. Renaud, 1998. *Étude des conditions de température observées dans une culture d'épinette noire 1+0 hivernée sous toile*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 431. 23 p.
- Lamhamedi, M.S., 2006. *Principaux facteurs influençant le développement racinaire et effets de l'irrigation sur la croissance et la physiologie des racines en pépinière forestière*. Dans : *Recueil des conférences et des résumés du 4^e atelier sur la production de plants forestiers du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. 15-16 mars 2006. Sainte-Foy, QC. 76 p. [cd-rom].
- Lamhamedi, M.S., P.-Y. Bernier, 1994. *Ecophysiology and field performance of black spruce (Picea mariana): A review*. Ann. Sci. For. 51: 529-551. [<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00882968/document>]
- Lamhamedi, M.S., Y. Ammari, B. Fecteau, J.-A. Fortin et H. Margolis, 2000. *Problématique des pépinières forestières en Afrique du nord et stratégies d'orientation*. Cahiers Agricultures 9: 369-380.
- Lamhamedi, M.S., H. Margolis, M. Renaud, L. Veilleux et I. Auger, 2003. *Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (1+0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière*. Can. J. For. Res. 33: 279-291. [<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Can-J-For-Res-33-279-291.pdf>]
- Lamhamedi, M.S., M. Renaud, P. Desjardins et L. Veilleux, 2009. *Mise à l'échelle opérationnelle du traitement hâtif de jours courts sur la morpho-physiologie et l'insuffisance racinaire des plants d'épinette noire (1+0) produits en tunnel*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 154. 28 p. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Memoire154.pdf>]
- Lamhamedi, M.S., M. Renaud, P. Desjardins et L. Veilleux, 2011a. *L'utilisation des toiles claires peut-elle augmenter la croissance des racines des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière?* Dans : Colas, F. et M.S. Lamhamedi (éds.). *Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation*. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations. 4-6 octobre 2011. Québec, QC. p. 87-95. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Recueil-resume-utilisation-carrefour2011.pdf>]
- Lamhamedi, M.S., L. Veilleux, M. Renaud et P. Desjardins, 2011b. *Prédiction et détermination des seuils de tolérance au gel en automne et techniques de protection contre le gel hivernal*. Dans : Colas, F. et M.S. Lamhamedi (éds.). *Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation*. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations. 4-6 octobre 2011. Québec QC. p. 53-64. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Recueil-resume-prediction-carrefour2011.pdf>]
- Lamhamedi, M.S., P. Desjardins, M. Renaud, et L. Veilleux, 2013a. *Techniques culturelles de production pour améliorer la qualité morpho-physiologique 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*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Québec, QC. 6 novembre 2013. 130 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Journee-formation-pepinier-for-qcf.pdf>]

- Lamhamedi, M.S., M. Renaud, P. Desjardins et L. Veilleux, 2013b. *Root growth, plug cohesion, mineral nutrition, and carbohydrate content of (1+0) Picea mariana seedlings in response to a short-day treatment*. TPN 56: 35-46. [<https://nprn.rngr.net/publications/tpn/56-1>]
- Langlois, C.-G. et J. Gagnon, 1993. *A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries*. Dans : Barrow, N.J. (éd.). *Plant nutrition: from genetic engineering to field practice*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (Pays-Bas). p. 303-306.
- 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 n° 674. 119 p. [<https://rng.net/publications/ctnm/volume-4>]
- Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett, 1990. *The container tree nursery manual. Vol. 2: Containers and growing media*. U.S.D.A., Forest Service. Washington, DC (États-Unis). Agric. Handbook n° 674. 87 p. [<https://rng.net/publications/ctnm/volume-2>]
- Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett, 1995. *The container tree nursery manual. Vol. 1: Nursery planning, development, and management*. U.S.D.A., Forest Service. Washington, DC (États-Unis). Agric. Handbook n° 674. 188 p. [<https://rng.net/publications/ctnm/volume-1>]
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2010. *Surveillance des productions de plants*. Dans : *Insectes, maladies et feux dans les forêts québécoises en 2009*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'environnement et de la protection des forêts. p. 14-26. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/fimaq/insectes/bilan2009.pdf>]
- Odlum, K.D. et P. Ng., 1995. *Selecting greenhouse temperatures to control black spruce and jack pine seedling growth: Pocket guide*. Ministry of Natural Resources, Ontario Forest Research Institute. 36 p.
- Pépin, S., S. Boudreault, I. Paiement, J. Caron et M.S. Lamhamedi, 2011. *Les propriétés physiques des substrats affectent-elles la croissance racinaire des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière?* Dans : Colas, F. et M.S. Lamhamedi (éds.). *Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation*. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations. 4-6 octobre 2011. Québec QC. p. 79-85. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Recueil-Resume-Steeve-Pepin-carrefour2011.pdf>]
- Samson, J., L. Émond, J. Lortie et J. Arsenault, 2006. *Supports et plateaux de culture utilisés en pépinières forestières*. Dans : *Recueil des conférences et des résumés du 4^e atelier sur la production de plants forestiers du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. 15-16 mars 2006. Sainte-Foy, QC. 1 p. [cd-rom]
- Timmer, V.R., 1991. *Interpretation of seedling analysis and visual symptoms*. Dans : van den Driessche, R. (éd.). *Mineral nutrition of conifer seedlings*. CRC Press. Boston, MA (États-Unis). p. 113-134.
- Veilleux, P., J.-Y. Allard, F. Bart, D. Labrecque, P. Marchand et A. Murray, 2014. *Guide terrain : Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction générale des pépinières et des stations piscicoles. 141 p.
- Visser, E.J. W. et L.A.C.J. Voesenek, 2004. *Acclimation to soil flooding—sensing and signal-transduction*. Plant Soil 274:197-214.
- Watson, G.W, A.M. Hewitt, M. Custic et M. Lo, 2014. *The management of tree root systems in urban and suburban settings: A review of soil influence on root growth*. Arboric. Urban For. 40(4): 193-217.



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. et M. Renaud, 2018. *La surélévation des réceptacles en pépinière forestière au Québec : Quels sont ses effets sur la morpho-physiologie des plants pendant la saison de croissance et sur leur viabilité en hiver?* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 151. 17 p.

ISSN 0834-4833

ISBN : 978-2-550-80959-3

ISBN (pdf): 978-2-550-80964-7

G.F.D.C. 232.327.9 (714)

L.C. SD 404.3

Dépôt légal 2018

Bibliothèque nationale du Québec

© 2018 Gouvernement du Québec

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 