

$$P'(t) = \frac{r}{k} P(t)(b - P(t))$$
$$V_{AE,ik} = \beta_1 d h p_{ik}^{\beta_2} H_{ik}^{\beta_3} + \varepsilon_{2,ik}$$



## Stimulation par la calcite granulaire de la colonisation ectomycorhizienne des racines et de la croissance des plants d'épinette blanche (2+0) dans les substrats tourbeux en pépinière forestière

par Mohammed S. Lamhamedi, Mario Renaud et Isabelle Auger

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 182

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE



# Stimulation par la calcite granulaire de la colonisation ectomycorhizienne des racines et de la croissance des plants d'épinette blanche (2+0) dans les substrats tourbeux en pépinière forestière

par Mohammed S. Lamhamedi<sup>1</sup>, ing.f., M. Sc., Ph. D.,  
Mario Renaud, techn. forest. et Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 182

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

---

<sup>1</sup> Correspondance : [mohammed.lamhamedi@mffp.gouv.qc.ca](mailto:mohammed.lamhamedi@mffp.gouv.qc.ca)

# Mandat de la DRF

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 acquiert de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou à 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.

## Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par au moins trois pairs indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document à tirage limité est également disponible dans notre site Internet en format PDF.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs  
Direction de la recherche forestière  
2700, rue Einstein, Québec (Québec)  
Canada, G1P 3W8  
Courriel : [recherche.forestiere@mffp.gouv.qc.ca](mailto:recherche.forestiere@mffp.gouv.qc.ca)  
Internet : [mffp.gouv.qc.ca/les-forets/connaissances/recherche-developpement/](http://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/connaissances/recherche-developpement/)

© Gouvernement du Québec

On peut citer ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Lamhamedi, M., M. Renaud et I. Auger, 2020. *Stimulation par la calcite granulaire de la colonisation ectomycorhizienne des racines et de la croissance des plants d'épinette blanche (2+0) dans les substrats tourbeux en pépinière forestière*.  
Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière.  
Mémoire de recherche forestière n° 182, 34 p.

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, sont protégées par les dispositions de la Loi sur le droit d'auteur, les lois, les politiques et les règlements du Canada, ainsi que par des accords internationaux. Il est interdit de reproduire, même partiellement, ces publications sans l'obtention préalable d'une permission écrite.

ISSN : 1183-3912  
ISBN (PDF) : 978-2-550-86626-8  
G.F.D.C. : 232.323.5(714)  
L.C. : SD 404.3

## Notes biographiques



**Mohammed S. Lamhamedi** est ingénieur forestier, diplômé de l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (IAV Hassan II) du Maroc (agronomie générale, 1983; ingénieur agronome d'état spécialisé en foresterie [M. Sc.], 1985) et de l'Université Laval (Ph. D. en sciences forestières, 1991). De 1986 à 1999, il exerce, tour

à tour, les postes d'enseignant-chercheur à l'IAV-Hassan II, de chercheur postdoctoral à l'Institut de recherche en biologie végétale de l'Université de Montréal, de chercheur-visiteur au Centre de foresterie des Laurentides, de directeur scientifique (projet Banque mondiale de modernisation des pépinières, Tunisie) et attaché de recherche à l'Université Laval. Il a rejoint la Direction de la recherche forestière en 1999, professeur associé à l'Université Laval, tout en demeurant chercheur associé du Centre d'étude de la forêt. Il participe à différents comités d'édition de revues et d'évaluation de projets d'organismes subventionnaires. Son expertise porte sur l'écophysiologie appliquée à la filière de production de plants dans les pépinières forestières (irrigation, fertilisation, physico-chimie des substrats, lessivage, ectomycorhizes, tolérance à la sécheresse et au gel, sélection hâtive, variabilité clonale, bouturage des feuillus et des résineux, embryogenèse somatique, substrats, compostage, développement d'une nouvelle génération de fertilisants pour atténuer les effets des gaz à effet de serre, modernisation des pépinières). D'autres de ses travaux portent également sur la qualité morphophysiologique des plants des différentes sources génétiques (vergers et clones somatiques) en pépinière en relation avec leur performance en site de reboisement (migration assistée, restauration des sites, etc.). Le transfert de connaissances et du savoir-faire auprès des pépinières au Québec et à l'échelle internationale constitue une facette de son expertise. Il codirige et dirige des étudiants gradués et des stagiaires postdoctoraux.



**Mario Renaud** est technicien forestier spécialiste, diplômé du cégep de Sainte-Foy depuis 1978. À l'emploi du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec depuis 1979, il a travaillé jusqu'à sa retraite (avril 2017) au Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie, où il a assisté le chargé de projets en

écophysiologie et techniques de production de plants. Avec le démarrage du programme gouvernemental de 300 millions de plants annoncé en 1983 par le gouvernement du Québec qui a été à l'origine de la création de 25 pépinières privées au Québec, l'introduction des cultures en récipient, l'agrandissement et la modernisation des infrastructures des pépinières publiques comme le Centre de semences de Berthier et la création du Centre de bouturage de Saint-Modeste, M. Renaud a contribué au développement et à la mise en application d'innovations technologiques en production de plants (inoculation des plants par les champignons ectomycorhiziens, adaptation et utilisation opérationnelle de la réflectométrie dans le domaine temporel, irrigation, fertilisation, protections hivernales, substrats, caractérisation des clones du peuplier et des clones somatiques de l'épinette blanche, etc.) M. Renaud a également assuré des activités de transfert technologique auprès des pépinières forestières. À titre de coauteur, il a publié plusieurs articles scientifiques et différents documents techniques.



**Isabelle Auger** est statisticienne, diplômée de l'Université Laval (B. Sc., 1995, M. Sc., 1997). Elle a travaillé comme statisticienne au Service canadien des forêts de 1996 à 1997, puis au Centre de recherche en endocrinologie moléculaire du Centre hospitalier de l'Université Laval de 1997 à 1999. En 1999, elle

entre à la Direction de la recherche forestière comme statisticienne au sein de l'équipe de biométrie. Ses principales tâches concernent alors la planification d'expériences et l'analyse statistique des données. Depuis 2011, elle est statisticienne experte en modélisation. Ses tâches actuelles incluent le développement de modèles de croissance forestière et le rôle de conseillère stratégique en modélisation forestière. Elle s'intéresse particulièrement aux modèles linéaires et non linéaires mixtes, aux modèles linéaires généralisés et à la programmation dans les logiciels SAS et R.



## Résumé

L'acidité et les variations des propriétés physicochimiques des substrats tourbeux limitent la nutrition minérale, la croissance des plants et l'activité des micro-organismes en pépinière forestière. Plusieurs recherches ont étudié si l'incorporation de différents produits (chaux dolomitique ou calcique) dans les substrats tourbeux, lors de leur confection, pouvait augmenter le pH dans la rhizosphère. À notre connaissance, aucune étude n'a encore évalué l'utilisation de la calcite granulaire comme matériel de recouvrement. Cette pratique viserait i) à stimuler la colonisation précoce des racines par les champignons ectomycorhiziens présents naturellement en pépinière et l'extension de leur phase extramatricielle; et ii) à améliorer la croissance et la nutrition minérale des plants 2+0 d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) en pépinière forestière.

Trois traitements ont été utilisés pour recouvrir les cavités des plants : Silice (29 g/cavité; traitement témoin), Calcite (24 g/cavité) et Calcite+ (31 g/cavité). Ces traitements ont été distribués aléatoirement à l'intérieur de chacun des 5 blocs complets du dispositif expérimental installé à une échelle opérationnelle.

La colonisation moyenne externe des carottes des plants (2+0) par les champignons ectomycorhiziens était significativement supérieure, dans les traitements Calcite et Calcite+ (61 %), à celle dans le traitement Silice (8 %). Les plants des traitements Calcite et Calcite+ montraient des gains significatifs en hauteur (21,7 %) et en masse sèche (20,6 % pour les parties aériennes et 18,3 % pour le plant entier) comparativement au traitement Silice. Des modèles logistiques ont montré qu'un recouvrement de calcite avait significativement amélioré la croissance des plants et la nutrition minérale, par rapport à la silice.

Les auteurs discutent de la portée opérationnelle des résultats et ont élaboré des recommandations pour favoriser l'installation des ectomycorhizes qui améliorent la qualité morphophysiological et la tolérance aux stress environnementaux des plants, tant en pépinière qu'en site de reboisement, dans un contexte de changements climatiques.

Mots-clés : croissance, ectomycorhize, nutrition minérale, physicochimie, pépinière forestière, *Picea glauca*, substrat tourbeux

## Abstract

*The acidity and variable physicochemical properties of peat-based substrates used in forest nurseries limit seedling mineral nutrition and growth as well as the activity of microorganisms. Several studies have examined whether incorporating various products (dolomitic or calcic lime) during substrate preparation could increase pH in the rhizosphere. However, to our knowledge, none has yet evaluated the use of calcite granules to cover container cavities. This practice would aim i) to stimulate the early colonization of roots by naturally present ectomycorrhizal fungi and the extension of their extramatricial phase; and ii) to enhance growth and mineral nutrition of 2+0 white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) seedlings in forest nurseries.*

*In this study, seedling cavities were covered either by silica (29 g/cavity; control treatment) or calcite (2 levels: 24 g/cavity and 31 g/cavity), for a total of 3 treatments. The experimental design, which included 5 randomized complete blocks, was installed at an operational scale.*

*In the Calcite and Calcite+ treatments, ectomycorrhizal fungi colonized a significantly higher proportion of the root plug exterior (61%) than in the Silica treatment (8%). Seedlings in the Calcite and Calcite+ treatments also showed significant gains in height (on average, 21.7%) and dry mass (20.6% for aerial parts and 18.3% for the whole plant) compared to the Silica treatment. Logistic models showed that covering cavities with calcite instead of silica significantly improved seedling growth and mineral nutrition.*

*The authors discuss how these results can be applied at an operational scale. They also recommend ways to favor the installation of ectomycorrhizal fungi, since these organisms improve seedling morphophysiological quality and stress resistance, both in the nursery and on the planting site, in a context of climate change.*

**Keywords:** *ectomycorrhizæ, forest nursery, growth, mineral nutrition, peat-based substrate, physicochemistry, *Picea glauca**

# Remerciements

Nous tenons sincèrement à remercier M<sup>me</sup> Chantal Pelletier, M<sup>me</sup> Sylvie Goulet 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) pour les analyses minérales des échantillons et les discussions enrichissantes avec les responsables du laboratoire (MM. Carol DeBlois et Denis Langlois).

Nous remercions M. Daniel Dumais, chercheur à la DRF, pour ses suggestions lors de la révision d'une version préliminaire de ce mémoire de recherche, ainsi que le responsable de la révision scientifique (M. Steve Bédard, chercheur à la DRF) et les deux réviseurs anonymes pour leurs commentaires effectués dans le cadre du processus de révision scientifique par les pairs. Nos remerciements s'adressent également à M<sup>mes</sup> Denise Tousignant et Viviane St-Arnaud ainsi qu'à M. Alexandre Dallaire-Théroux de l'équipe de diffusion et de transfert de connaissances de la DRF pour leur contribution lors la révision et l'édition de ce mémoire de recherche forestière, ainsi qu'à M<sup>mes</sup> Nathalie Langlois et Maripierre Jalbert pour la mise en page.

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.

Nous remercions les professeurs à la retraite J.-André Fortin et Yves Piché, ainsi que M. Jean Gagnon (chercheur à la DRF) pour leurs suggestions et pour les références bibliographiques mises à notre disposition.

Le financement de ce projet de recherche a été assuré par la DRF dans le cadre du projet n° 3321142332093 : Optimisation des principales pratiques culturales affectant l'insuffisance racinaire et la qualité morphophysologique des plants produits en pépinière forestière (titulaire : Mohammed S. Lamhamedi, ing.f., M. Sc., Ph. D.). Certains résultats de ce projet 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.



# Table des matières

<b>Résumé</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	vi
<b>Remerciements</b> .....	vii
<b>Liste des tableaux</b> .....	x
<b>Liste des figures</b> .....	xi
<b>Liste des annexes</b> .....	xii
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre 1 – Matériel et méthodes</b> .....	3
1.1 Matériel végétal, matériel de recouvrement et dispositif expérimental .....	3
1.2 Techniques et régies de production de plants .....	3
1.3 Granulométrie de la silice et de la calcite.....	4
1.4 Physicochimie du substrat, croissance et nutrition minérale des plants .....	4
1.5 Colonisation ectomycorhizienne superficielle des carottes racinaires des plants .....	5
1.6 Analyses statistiques et modélisation des variables de croissance.....	5
1.6.1. Analyse de la variance .....	5
1.6.2. Modélisation des variables de croissance .....	5
<b>Chapitre 2 – Résultats</b> .....	7
2.1 Granulométrie de la silice et de la calcite granulaire.....	7
2.2 Caractéristiques physicochimiques et de fertilité du substrat .....	7
2.3 Colonisation ectomycorhizienne superficielle des carottes racinaires des plants .....	8
2.4 Croissance des plants d'épinette blanche (2+0).....	9
2.5 Modèles logistiques de croissance .....	9
2.6 Nutrition minérale des plants .....	10
<b>Chapitre 3 – Discussion</b> .....	15
3.1 Stimulation du développement de la phase extramatrielle des champignons ectomycorhiziens.....	15
3.2 Amélioration de la croissance et de la qualité morphophysologique des plants .....	17
3.3 Synergie pour améliorer la tolérance des plants aux stress environnementaux .....	17
<b>Conclusion et portée opérationnelle des résultats</b> .....	21
<b>Références bibliographiques</b> .....	23
<b>Annexes</b> .....	31

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Probabilités observées (valeurs de $p$ ) et degrés de liberté des effets fixes associés à l'analyse de la variance des variables de fertilité et des variables physicochimiques du substrat pendant la deuxième saison (2+0) de croissance des plants d'épinette blanche en pépinière forestière .....	7
<b>Tableau 2.</b> Probabilités observées (valeurs de $p$ ) et degrés de liberté des effets fixes associés à l'analyse de la variance des variables de croissance des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière .....	9
<b>Tableau 3.</b> Probabilités observées (valeurs de $p$ ) et degrés de liberté des effets fixes associés à l'analyse de la variance pour le contenu et la concentration en éléments minéraux dans les parties aériennes des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière .....	12
<b>Tableau 4.</b> Probabilités observées (valeurs de $p$ ) et degrés de liberté des effets fixes associés à l'analyse de la variance du contenu et de la concentration en éléments minéraux des racines des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière .....	12

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b>	Granulométrie de la silice et de la calcite utilisées comme matériel de recouvrement lors de la production de plants d'épinette blanche (n = 3 échantillons de chaque matériel de recouvrement) .....	7
<b>Figure 2.</b>	Évolution du pH (CaCl <sub>2</sub> ) du substrat de croissance pendant la saison de croissance des plants d'épinette blanche (2+0), selon le matériel de recouvrement (Silice : 29 g/cavité, Calcite : 24 g/cavité et Calcite+ : 31 g/cavité) .....	8
<b>Figure 3.</b>	a) Pourcentage de colonisation externe du système racinaire des plants (n = 100 plants/traitement) d'épinette blanche (2+0) par la phase extramatricielle du champignon ectomycorhizien <i>Laccaria bicolor</i> en automne (28 septembre 2015); b) exemple de variabilité de la colonisation superficielle des carottes des racines des plants d'épinette blanche (2+0) par <i>L. bicolor</i> selon le matériel de recouvrement (Silice : 29 g/cavité, Calcite : 24 g/cavité et Calcite+ : 31 g/cavité).....	8
<b>Figure 4.</b>	Évolution des moyennes et modèles logistiques ajustés pour chacune des variables de croissance des plants d'épinette blanche (2+0), selon les traitements (Silice, Calcite et Calcite+) .....	10
<b>Figure 5.</b>	Photos prises à la fin de la première saison de croissance des plants d'épinette blanche (1+0, sous tunnel) .....	11
<b>Figure 6.</b>	Évolution des moyennes des contenus des parties aériennes des plants d'épinette blanche (2+0) en azote (N), en phosphore (P), en potassium (K), en calcium (Ca) et en magnésium (Mg), selon les traitements (Silice, Calcite et Calcite+) (n = 5 échantillons composites de 15 plants chacun) .....	13
<b>Figure 7.</b>	Principaux mécanismes par lesquels la calcite et les ectomycorhizes améliorent la physicochimie du substrat, la croissance et la physiologie des plants .....	16

## Liste des annexes

- Annexe 1.** Probabilités observées (valeurs de  $p$ ) des contrastes orthogonaux de l'interaction Date  $\times$  Traitement de l'analyse de la variance des variables de fertilité et physico-chimiques du substrat pendant la deuxième saison de croissance des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière ..... 31
- Annexe 2.** Probabilités observées (valeurs de  $p$ ) des contrastes orthogonaux de l'interaction Date  $\times$  Traitement de l'analyse de la variance des variables de croissance pendant la deuxième saison de croissance des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière .... 31
- Annexe 3.** Estimation des paramètres des modèles logistiques de l'évolution de la hauteur, du diamètre, de la masse sèche des parties aériennes, de la masse sèche des racines et de la masse sèche totale des plants d'épinette blanche au cours de la saison 2+0 en pépinière forestière ..... 32
- Annexe 4.** Probabilités observées (valeurs de  $p$ ) des contrastes de l'interaction Date  $\times$  Traitement de l'analyse de la variance du contenu, de la concentration et de l'efficacité des éléments minéraux des parties aériennes des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière ..... 33
- Annexe 5.** Probabilités observées (valeurs de  $p$ ) des contrastes de l'interaction Date  $\times$  Traitement de l'analyse de la variance du contenu, de la concentration et de l'efficacité des éléments minéraux des racines des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière .... 34

# Introduction

Dans les pépinières forestières du Québec, la production de plants des essences de la forêt boréale dans les substrats tourbeux constitue un défi de taille à cause de l'acidité et des variations des propriétés physiques de ces substrats au cours d'un cycle de production. Ces facteurs limitent la disponibilité d'oxygène et la cinétique d'absorption des éléments minéraux, l'activité des micro-organismes ainsi que la croissance des racines et des parties aériennes des plants (Caron 2001, Heiskanen 1993, Lamhamedi *et al.* 2011a, Landis *et al.* 1990). Les cavités des plants produits en récipients sont généralement recouvertes de silice. Afin d'augmenter le pH des substrats tourbeux acides, certaines pépinières forestières du Québec et d'ailleurs ont eu recours à l'ajout de la chaux calcique ( $\text{CaCO}_3$ ) ou dolomitique ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) en poudre lors de la confection des substrats. L'augmentation du pH a pour objectif d'améliorer la disponibilité et l'absorption des éléments minéraux ainsi que la croissance des plants en pépinière forestière (Caron 2001, Lamhamedi *et al.* 2011a, Rikala et Jozefek 1990, South 2017, South *et al.* 2017). Cependant, les pH générés par l'ajout de la chaux n'étaient ni stables ni optimaux pour la nutrition minérale et la croissance des plants (Lamhamedi et Renaud 2005, Rippy 2005). En effet, les augmentations rapides et non contrôlées du pH du substrat tourbeux (jusqu'à des valeurs au-dessus de 7) ont entraîné l'apparition de symptômes de carence en éléments minéraux (ex. : fer, bore) et un retard accentué de la croissance des plants d'espèces résineuses et feuillues, de sorte que ceux-ci n'ont pas atteint les normes de qualité morphophysiological (Lamhamedi et Renaud 2005, Lamhamedi *et al.* 2011a, Rikala et Jozefek 1990).

Nos travaux antérieurs sur les propriétés physiques des substrats tourbeux pour la production de plants d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) en pépinière forestière visaient l'optimisation de la texture, de l'aération, de la diffusion des gaz de la rhizosphère, de la fertilité et de la capacité de rétention en eau (Boudreault *et al.* 2014, Pépin *et al.* 2011). D'autres travaux ont permis d'améliorer la croissance des plants et la cohésion des racines pour plusieurs espèces, grâce à l'optimisation de différentes techniques culturales à l'échelle opérationnelle : caractéristiques des récipients, imposition de stress hydriques, traitement de jours courts (Lamhamedi *et al.* 2013a, 2013b), gestion de l'intensité lumineuse cumulée en relation

avec les caractéristiques optiques du tunnel et en fonction du stade de croissance (Lamhamedi *et al.* 2011b), régies d'irrigation (Lamhamedi *et al.* 2001, 2006, Stowe *et al.* 2010) et de fertilisation (Gagnon et DeBlois 2017, Girard *et al.* 2001, Landis *et al.* 1989a).

Pour améliorer davantage la croissance et la performance des plants en pépinière et en site de reboisement, une attention particulière a été accordée au développement des techniques d'inoculation des plants en pépinière par des champignons ectomycorhiziens à l'aide de spores ou d'inoculum (liquide et solide) de souches sélectionnées ou de génotypes obtenus par croisement dirigé entre monocytons compatibles de champignons ectomycorhiziens (Gagnon 2016, Gagnon et Lamhamedi 2011, Lamhamedi *et al.* 2009, Marx *et al.* 1982). Pour réussir l'inoculation des plants en pépinière, le défi consistait à optimiser la fertilisation et les paramètres physicochimiques du substrat et à utiliser des souches performantes, capables de coloniser rapidement les racines et de faire concurrence aux souches naturelles. Plusieurs travaux ont été réalisés au laboratoire afin d'optimiser le pH pour la croissance des champignons en milieu gélosé en absence (Dennis 1985) ou en présence de la plante hôte, dans les substrats tourbeux ou en milieu hydroponique (Choi *et al.* 2008, Erland *et al.* 1990, Gagnon *et al.* 1987, 1988). Toutefois, à notre connaissance, aucune étude n'a encore évalué la possibilité d'utiliser la calcite granulaire comme matériel de recouvrement pour améliorer la chimie de la rhizosphère (pH, concentrations en calcium et en  $\text{CO}_2$  etc.). De plus, l'utilisation de ce recouvrement à base de calcite vise en premier lieu à améliorer la chimie de la rhizosphère, de manière à stimuler la colonisation précoce des racines par les champignons ectomycorhiziens présents naturellement en pépinière, l'extension de leur phase extramatricielle et la croissance des plants en pépinière forestière. À l'inverse des souches sélectionnées pour les inoculations artificielles (qui ne comprennent qu'un ou quelques génotypes), les champignons ectomycorhiziens présents naturellement en pépinière sont très diversifiés génétiquement, adaptés aux différents stress environnementaux et compatibles avec les essences forestières et les conditions climatiques de la forêt boréale (Gagnon et Lamhamedi 2011, Lamhamedi et Renaud 2017).

Afin d'améliorer la qualité morphophysiolgique des plants et de diminuer les coûts associés à l'inoculation ectomycorhizienne artificielle en pépinière tout en favorisant la mycorhization naturelle des racines par des champignons ectomycorhiziens, notre approche consiste à remplacer la silice, actuellement utilisée comme matériel de recouvrement, par la calcite granulaire. Ainsi, notre hypothèse est que la calcite améliore le pH du substrat, la colonisation précoce des racines par les champignons ectomycorhiziens, la croissance et la nutrition minérale des plants par rapport à la silice. Dans les pépinières forestières du Québec, la saison de croissance est très courte. La fertilisation des plants se fait pendant toute la saison de croissance active afin de faciliter l'atteinte par les plants des normes et critères de qualité morphophysiolgique (hauteur, concentration foliaire en azote, etc.). Dans un tel contexte, il est souhaitable de favoriser la mycorhization naturelle en automne par les « pluies de spores » de champignons ectomycorhiziens provenant des peuplements forestiers situés aux abords de ces pépinières (Gagnon et Lamhamedi 2011). Une meilleure qualité morphophysiolgique et l'ectomycorhization des plants contribueront à favoriser leur survie et à améliorer leur tolérance aux stress environnementaux après leur mise en terre en site de reboisement (Lamhamedi *et al.* 2009, Lehto et Zwiazek 2011). En effet, avec les changements

climatiques en forêt boréale, les plants forestiers mis en terre seront soumis à des stress environnementaux plus sévères et plus fréquents (sécheresse, gel, agents pathogènes, etc.).

Ainsi, les principaux objectifs de cette étude sont :

- i) de comparer les effets de la calcite granulaire et de la silice sur les principales caractéristiques physicochimiques du substrat, sur l'extension précoce de la phase extramatrielle des champignons ectomycorhiziens et sur la croissance et la nutrition minérale des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière;
- ii) d'ajuster des modèles logistiques de croissance des plants selon le matériel de recouvrement (silice, calcite) afin que les pépiniéristes puissent les utiliser comme standards de croissance pour le suivi des cultures en pépinière;
- iii) d'élaborer des recommandations à caractère opérationnel pour favoriser la mycorhization naturelle et artificielle et ainsi améliorer la qualité morphophysiolgique des plants et leur tolérance aux stress environnementaux, tant en pépinière qu'en site de reboisement.

# Chapitre 1

## Matériel et méthodes

### 1.1 Matériel végétal, matériel de recouvrement et dispositif expérimental

Les graines d'épinette blanche (lot de semences : EPB-V3-EST-2-0; code de culture GP35EPB14-P85) ont été ensemencées dans des récipients 25-310 (IPL, Saint-Damien, Québec, Canada; 25 cavités, 310 cm<sup>3</sup>/cavité; 206 plants/m<sup>2</sup>) et mis en tunnel le 7 mai 2014. Les récipients ont été empotés avec un substrat composé de tourbe et de vermiculite (80 % : 20 %, volume/volume) à une densité moyenne ajustée à 0,10 g/cm<sup>3</sup>. Le pH<sub>eau</sub> du substrat initial avant l'ensemencement des graines était de 3,4. Dans la tourbe, les fibres grosses (celles retenues sur les tamis de 2 mm), grosses et moyennes (fraction retenue supérieure à 0,850 mm), courtes (celles retenues sur les tamis de 0,075 mm) et fines (celles non retenues sur les tamis de 0,075 mm) représentaient respectivement des proportions de 24,5 %, 43,3 %, 55,4 % et 1,3 %.

Après l'opération d'ensemencement, les graines ont été recouvertes par un de trois types de matériaux, correspondant aux traitements : Silice (29 g/cavité; traitement témoin), Calcite (24 g/cavité) et Calcite+ (31 g/cavité). La quantité de silice utilisée dans le cadre de ce projet correspond à la quantité appliquée couramment à l'échelle opérationnelle. Les quantités de calcite, quant à elles, ont été déterminées à la lumière des résultats de nos travaux antérieurs (Lamhamedi 2015) tout en tenant compte de la volumétrie de la cavité et de l'effet de la calcite sur le pH du substrat. Après l'empotage et l'ensemencement, les quantités précises des matériaux de recouvrement ont été appliquées sur chaque récipient par un épandeur automatique. La silice et la calcite utilisées étaient de bonne qualité physicochimique et elles n'ont eu aucun effet négatif sur la croissance des racines et des parties aériennes.

Les 3 traitements (Silice, Calcite et Calcite+) ont été distribués aléatoirement à l'intérieur de chacun des 5 blocs complets composant le dispositif expérimental. Chaque traitement comprenait 27 récipients 25-310 par bloc, pour un total de 10125 plants dans l'ensemble du dispositif (excluant les zones tampons). Afin d'éliminer les effets de bordure, des zones tampons (27 récipients/zone) ont été ajoutées entre les traitements et entre les blocs.

Les récipients ont été 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). Pendant la première saison de croissance, ce tunnel a été couvert d'une toile de polyéthylène laiteux (blanc) de 4 mm d'épaisseur avec un facteur d'extinction de la lumière incidente de 50 à 55 % (Ginegar Plastic Products Ltd., multi-layer greenhouse cover film, type UVA/White 45 %). Cette toile est rétractable sur les deux côtés du tunnel afin de faciliter l'aération et le contrôle des températures de l'air à l'intérieur. La toile a été enlevée vers le 6 octobre 2014, de sorte que les plants ont été exposés aux conditions extérieures pendant leur premier hiver et leur deuxième saison de croissance.

La germination a été évaluée 3 fois par semaine (les lundis, mercredis et vendredis) dans 60 récipients (4 récipients × 5 blocs × 3 traitements) pendant les 31 premiers jours après l'ensemencement. Cette évaluation a démontré que le taux d'occupation moyen des cavités pour les 3 traitements était de 99,33 %. Une fois la germination terminée, les plants ont été éclaircis pour ne conserver qu'un semis par cavité, et ce, sans faire de repiquage pour remplir les rares cavités vides.

### 1.2 Techniques et régies de production de plants

Les plants ont été produits selon les techniques culturales standard utilisées au Québec pour la production de plants d'épinette blanche produits en récipients (Lamhamedi *et al.* 2001, 2006).

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'éliminer les effets de 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 a été ajustée selon les stades de croissance des plants au cours de la première saison (1+0; Lamhamedi *et al.* 2001), puis maintenue entre 40 et 45 % (volume/volume) durant la deuxième saison (2+0; Lamhamedi *et al.* 2006). 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.* 2013b).

Le régime de fertilisation a été ajusté toutes les deux semaines pendant les deux saisons (1+0 et 2+0) à l'aide du logiciel PLANTEC, selon les stades de croissance (Girard *et al.* 2001). À la fin de la saison 1+0, chaque plant avait reçu 47,3 mg d'azote (N : 25,0 mg N-NH<sub>4</sub>, 22,3 mg N-NO<sub>3</sub>), 10,6 mg de phosphore (P), 15,2 mg de potassium (K) et 0,1 mg de magnésium (Mg) ainsi qu'un apport en oligo-éléments (manganèse, cuivre, fer et bore). Ensuite, au cours de la saison 2+0 (soit du 30 avril 2015 au 9 octobre 2015), chaque plant avait reçu 250,3 mg de N (99,4 mg N-NH<sub>4</sub>, 111,8 mg N-NO<sub>3</sub>, 39,1 mg N-Urée), 41 mg de P, 83 mg de K et 0,6 mg de Mg, en plus des oligo-éléments. Pour qu'ils ne dépassent pas la hauteur maximale exigée par les normes de qualité morphophysiological, les plants 2+0 n'ont pas reçu de fertilisants entre le 25 juin et le 13 août 2015.

### 1.3 Granulométrie de la silice et de la calcite

L'analyse granulométrique de la silice et de la calcite a été effectuée par tamisage pour caractériser la distribution statistique de la taille des grains (Fournier *et al.* 2012). L'échantillonnage de la silice et de la calcite a été réalisé en pépinière avant l'emportage des récipients à partir des tas de chaque matériel de recouvrement. Ainsi, 3 échantillons composites de 500 g chacun ont été utilisés pour chaque type de matériel de recouvrement (silice ou calcite).

### 1.4 Physicochimie du substrat, croissance et nutrition minérale des plants

Pendant la deuxième saison de croissance, les variables physicochimiques associées à la fertilité du substrat ainsi que les variables morphophysiological des plants (croissance, nutrition minérale) ont été déterminées lors de 7 échantillonnages destructifs réalisés aux 3 semaines environ, du 25 mai au 28 septembre 2015. Les analyses minérales des plants et du substrat ont été réalisées au laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière, selon les méthodes décrites par Gagnon et DeBlois (2017), Kalra et Maynard (1992) et Lamhamedi *et al.* (2013b).

À chaque échantillonnage, un récipient par traitement a été sélectionné aléatoirement dans chaque bloc expérimental. Dans chacun de ces récipients, 15 plants parmi les 25 ont été choisis aléatoirement, pour un total de 225 plants par date d'échantillonnage (ou 75 plants/traitement). La position du récipient et les 15 positions de cavités ont été choisies aléatoirement à chaque date d'échantillonnage. La même position de récipients et les mêmes positions de cavités ont été utilisées pour toutes les combinaisons bloc-traitement à une date donnée.

Les caractéristiques physicochimiques et la fertilité du substrat ont été évaluées sur 1 échantillon composite de 15 carottes de substrat par bloc et par traitement (carottes récoltées avec les plants échantillonnés pour les mesures de croissance et de nutrition minérale). Les variables physicochimiques du substrat englobent le pH<sub>eau</sub>, le pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>, la conductivité électrique ainsi que les concentrations et contenus en éléments minéraux (azote minéral, phosphore, potassium, calcium et magnésium). En plus du pH<sub>eau</sub> couramment utilisé par les pépinières forestières, le pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub> a été également déterminé pour mieux caractériser et se rapprocher des variations réelles de la physicochimie de la mycorrhizosphère après hydrolyse de la calcite. Le pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub> offre aussi plusieurs autres avantages : c'est une mesure indépendante de la dilution dans une large gamme de rapports du sol au CaCl<sub>2</sub>; elle donne une bonne approximation du pH du substrat dans les conditions naturelles; les résultats sont plus reproductibles et dépendent moins de la position de l'électrode; la solution de CaCl<sub>2</sub> possède une composition électrolytique semblable à celle des solutions du substrat; et finalement, la solution de CaCl<sub>2</sub> masque la variabilité de la teneur en sels et élimine l'effet de la suspension (Kalra et Maynard 1992).

Plusieurs variables morphophysiological ont été mesurées sur les plants prélevés à chaque date d'échantillonnage : la hauteur et le diamètre au collet (15 plants/bloc/traitement), les masses sèches des parties aériennes et des racines (3 échantillons composites de 5 plants/bloc/traitement) ainsi que la nutrition minérale des plants (1 échantillon composite de 15 plants/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.

En ce qui concerne la nutrition minérale des plants, la concentration totale en azote des tissus a été déterminée par combustion de l'échantillon à haute température en mesurant la conductibilité thermique à partir de l'analyseur LECO Trumac N (Leco Corporation, St-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 contenu en éléments minéraux a été calculé pour chaque élément en multipliant la concentration par la masse sèche, afin de refléter la quantité d'éléments minéraux contenus dans une quantité de matériel végétal (Timmer *et al.* 1991).

L'efficacité d'utilisation des éléments minéraux majeurs, notamment pour l'azote (NUE), le phosphore (PUE) et le potassium (KUE) a ensuite été

calculée comme le rapport entre la masse sèche des parties aériennes (ou des racines) et le contenu de cet élément dans les parties aériennes (ou les racines) (ÅGREN 1985).

### 1.5 Colonisation ectomycorhizienne superficielle des carottes racinaires des plants

La mycorhization naturelle des racines des plants 2+0 a été évaluée une seule fois, à la fin de la deuxième saison de croissance. Rappelons qu'au Québec, les plants d'épinette blanche sont produits sous tunnel pendant la première saison de croissance, et qu'ils sont transférés à l'extérieur pour leur deuxième année. Le tunnel constitue une barrière aux pluies de spores, de sorte que la colonisation ectomycorhizienne des racines est presque inexistante au stade 1+0.

À la fin de la deuxième saison de croissance, nous avons donc évalué de façon visuelle le pourcentage de l'extension superficielle du mycélium extraracinaire (phase extramatricielle) des champignons ectomycorhiziens à l'extérieur de chaque carotte de substrat. Pour ce faire, nous avons aléatoirement échantillonné 300 plants, à raison de 20 plants par récipient pour chaque traitement dans chaque bloc.

### 1.6 Analyses statistiques et modélisation des variables de croissance

#### 1.6.1. Analyse de la variance

Afin d'évaluer les effets du traitement de recouvrement et de la date d'échantillonnage sur les variables de fertilité du substrat et les variables morphophysiologiques des plants (croissance, nutrition minérale, etc.) mesurées lors de la deuxième saison de croissance, des analyses de la variance ont été effectuées à l'aide de modèles linéaires mixtes avec la procédure MIXED de SAS/STAT version 14.1 (SAS Institute Inc. 2015) en utilisant la moyenne des échantillons par bloc/traitement. Le traitement, la date d'échantillonnage et leur interaction ont été considérés comme des effets fixes, tandis que le bloc de même que l'interaction entre le bloc et le traitement ont été considérés comme des effets aléatoires. Un modèle avec un effet fixe (traitement) et un effet aléatoire de bloc a été utilisé pour l'analyse du pourcentage de colonisation ectomycorhizienne. Dans tous les modèles, les degrés de liberté au dénominateur pour les tests des effets fixes ont été calculés avec la méthode de Satterthwaite. Le nombre de degrés de liberté au dénominateur est donc propre à chaque variable analysée.

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

L'effet du traitement a été décomposé en deux contrastes : la moyenne Calcite/Calcite+ vs Silice, d'une part, et Calcite vs Calcite+, d'autre part. Si l'interaction entre la date et le traitement était significative, les contrastes sur les traitements étaient effectués pour chacune des dates. L'effet du temps a été décomposé en deux contrastes : linéaire et quadratique. Lorsque l'interaction entre le traitement et la date était significative, l'évolution temporelle a été comparée entre les traitements à l'aide de ces deux contrastes. Ainsi, l'effet linéaire et l'effet quadratique du temps ont été comparés pour les traitements Calcite/Calcite+ vs Silice, de même que pour les traitements Calcite vs Calcite+. Les tests statistiques des contrastes ont été basés sur une méthode de simulation avec l'option Adjust=Simulate de la procédure MIXED dans SAS/STAT (version 14.1).

Les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances ont été vérifiées graphiquement. Lorsque nécessaire, une variance résiduelle par date a été estimée pour tenir compte de l'hétérogénéité des variances. Des analyses préliminaires ont montré que les dates d'échantillonnage n'occasionnaient pas de corrélation temporelle entre les données.

Des coefficients de corrélation de Pearson ont été calculés entre les différentes variables physico-chimiques du substrat.

#### 1.6.2. Modélisation des variables de croissance

L'évolution temporelle de chacune des variables de croissance ( $y$ ) a été modélisée avec la fonction logistique à l'aide d'un modèle non linéaire mixte et la procédure NLMIXED de SAS/STAT version 14.1 (SAS Institute Inc. 2015) :

$$y = \frac{a + u}{1 + e^{-c(\text{jour}-b)}}$$

où les paramètres  $a$ ,  $b$ , et  $c$  sont respectivement l'asymptote, le point d'inflexion et le taux de croissance. Le paramètre  $u$  est l'effet aléatoire de l'interaction entre le bloc et le traitement.

Afin de vérifier s'il existe des différences en matière de cinétique des variables de croissance entre les trois traitements pendant la saison de croissance, des variables indicatrices ont été ajoutées au modèle. Ces variables sont définies comme étant  $i_1 = 1$  si (traitement = Calcite) et  $i_1 = 0$  sinon, et  $i_2 = 1$  si (traitement = Calcite+) et  $i_2 = 0$  sinon :

$$y = \frac{a_0 + a_1 i_1 + a_2 i_2 + u}{1 + e^{-(c_0 + c_1 i_1 + c_2 i_2)(\text{jour} - (b_0 + b_1 i_1 + b_2 i_2))}}$$

Lorsqu'il n'y avait pas de différence significative entre les traitements Calcite et Calcite+ pour un paramètre donné, un seul paramètre commun aux deux traitements ( $a_{12}$ ,  $b_{12}$ ,  $c_{12}$ ) a été utilisé. Le modèle a ensuite été simplifié en supprimant les variables indicatrices qui n'étaient pas significatives au seuil de 5 %. Les modèles ont été ajustés sur l'ensemble des données des différentes dates d'échantillonnage.

Les hypothèses de normalité des résidus et d'homogénéité de la variance ont été vérifiées graphiquement. Pour tenir compte de

l'hétérogénéité des variances, la variance résiduelle a été pondérée en fonction de la variance observée à chaque date. L'ajustement du modèle logistique a été vérifié graphiquement en comparant les valeurs prédites aux moyennes observées à chaque temps par traitement. Un coefficient de détermination ( $R^2$ ) a été calculé comme suit :

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \right]$$

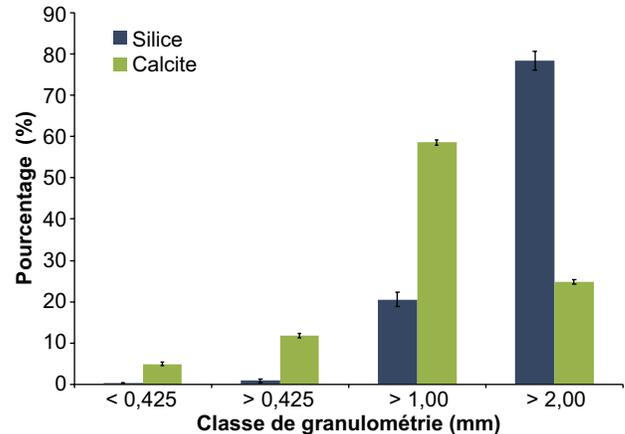
où  $\hat{y}$  est la valeur prédite par le modèle et  $\bar{y}$  est la moyenne des  $y$ .

# Chapitre 2

## Résultats

### 2.1 Granulométrie de la silice et de la calcite granulaire

L'analyse granulométrique montre que la silice et la calcite se différencient par les pourcentages de particules dans chaque classe de grosseur (figure 1), et que ces deux matériaux n'ont pas la même distribution selon les 4 classes granulométriques observées (très fine :  $\leq 0,425$  mm; fine :  $> 0,425$  mm; moyenne :  $> 1,00$  mm; grossière :  $> 2,00$  mm). La calcite comprend une part beaucoup plus importante de particules très fines et fines (16,7 %) ainsi que moyennes (58,6 %) que la silice (1,1 % et 20,5 %; figure 1), alors que la silice contient beaucoup plus de particules grossières (78,3 %) que la calcite (24,7 %).



**Figure 1.** Granulométrie de la silice et de la calcite utilisées comme matériel de recouvrement lors de la production de plants d'épinette blanche (n = 3 échantillons de chaque matériel de recouvrement. Les barres d'erreur représentent l'erreur type).

### 2.2 Caractéristiques physicochimiques et de fertilité du substrat

Les effets de l'interaction Date  $\times$  Traitement, de la date (effet linéaire et effet quadratique) et du traitement étaient significatifs pour la majorité des variables physicochimiques et de fertilité du substrat ( $\text{pH}_{\text{eau}}$ ,  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ ,  $\text{N}_{\text{min}}$ , P, K, Ca et Mg) mesurées pendant la deuxième saison (2+0) de croissance des plants (tableau 1). Dans tous les cas, il n'y avait pas de différences significatives entre les deux

traitements à base de calcite (Calcite vs Calcite+ :  $p \geq 0,5398$ ). Cependant, pour toutes les variables physicochimiques et de fertilité du substrat sauf la conductivité, la moyenne des deux traitements de calcite (Calcite/Calcite+) était significativement différente de celle du traitement Silice.

**Tableau 1.** Probabilités observées (valeurs de  $p$ ) et degrés de liberté des effets fixes associés à l'analyse de la variance des variables de fertilité et des variables physicochimiques du substrat pendant la deuxième saison (2+0) de croissance des plants d'épinette blanche en pépinière forestière. Une valeur de  $p$  en gras indique une interaction Date  $\times$  Traitement significative à  $p < 0,05$ .

Source de variation	Degrés de liberté*		Valeur de $p$							
	dln	dld	$\text{pH}_{\text{eau}}$	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	Cond <sup>†</sup> ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\text{N}_{\text{min}}^{\dagger}$ (mg/kg)	P <sup>†</sup> (mg/kg)	K <sup>†</sup> (mg/kg)	Ca <sup>†</sup> (mg/kg)	Mg <sup>†</sup> (mg/kg)
Traitement	2	8	< 0,0001	0,0051	0,2459	0,0029	< 0,0001	0,0012	< 0,0001	0,0003
Calcite/Calcite+ vs Silice	(1)	8	< 0,0001	0,0017	0,0990	0,0008	< 0,0001	0,0003	< 0,0001	0,0001
Calcite vs Calcite+	(1)	8	0,6844	0,5398	0,9562	0,5734	0,9970	0,7603	0,5976	0,7471
Date	6	70	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Date (effet linéaire)	(1)	70	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Date (effet quadratique)	(1)	70	0,0213	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Date $\times$ Traitement	12	70	< 0,0001	0,0001	< 0,0001	0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

\* dln = degrés de liberté au numérateur; dld = degrés de liberté au dénominateur selon la correction de Satterthwaite. Les dld présentés sont ceux pour  $\text{pH}_{\text{eau}}$  et  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ . Ils varient de 13 à 30 pour les autres variables.

† Cond. = conductivité électrique;  $\text{N}_{\text{min}}$  = azote minéral; P = phosphore; K = potassium; Ca = calcium et Mg = magnésium.

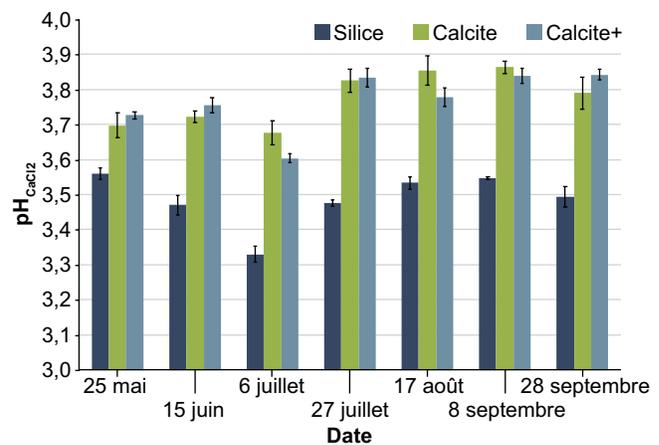
Les contrastes orthogonaux montrent que le pH moyen des substrats était significativement plus élevé dans les traitements Calcite et Calcite+ que dans le traitement Silice pendant la deuxième saison de croissance, et ce, tant pour le  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  (tableau 1, figure 2) que le  $\text{pH}_{\text{eau}}$  (tableau 1). À la fin de la deuxième saison de croissance (28 septembre 2015), les deux types de pH du substrat avaient des valeurs plus élevées dans les traitements Calcite/Calcite+ ( $\text{pH}_{\text{eau}} = 4,9$  et  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 3,8$ ) que dans le traitement Silice ( $\text{pH}_{\text{eau}} = 4,4$  et  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 3,4$ ; annexe 1).

À toutes les dates d'échantillonnage, la concentration en Ca était significativement plus élevée dans les substrats recouverts de calcite que dans ceux recouverts de silice (annexe 1). Par exemple, à la dernière date d'échantillonnage, la concentration en Ca du substrat était significativement plus grande dans les traitements Calcite/Calcite+ ( $125,5 \pm 10$  ppm) que dans le traitement Silice ( $43 \pm 13$  ppm). Les pH du substrat étaient d'ailleurs significativement corrélés aux concentrations en Ca ( $\text{pH}_{\text{eau}} : r = -0,60, p < 0,001$ ;  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} : r = 0,30, p = 0,002$ ).

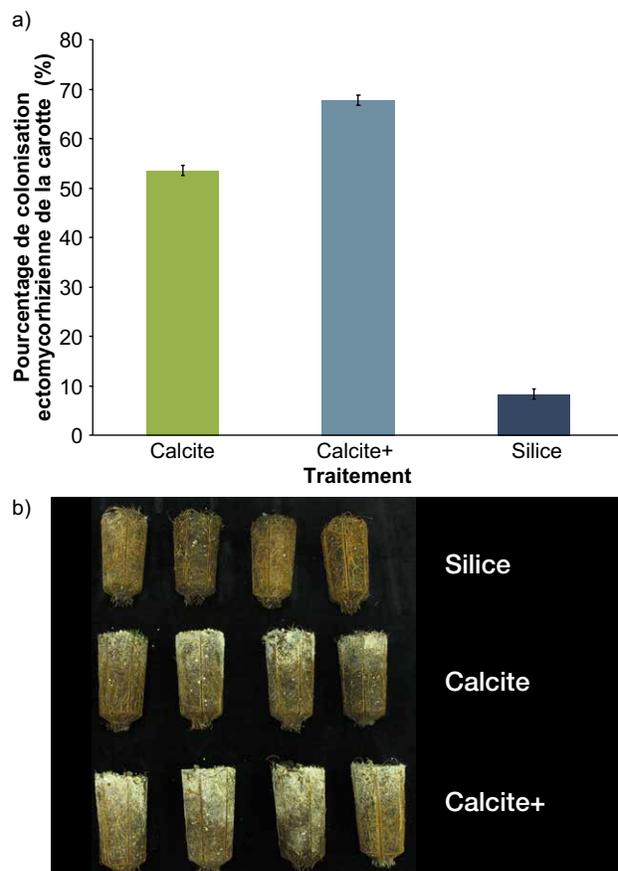
### 2.3 Colonisation ectomycorhizienne superficielle des carottes racinaires des plants

À la fin de la deuxième saison de croissance en pépinière, le pourcentage de colonisation superficielle de la surface externe des carottes racinaires des plants d'épinette blanche par le mycélium extraracinaire (p. ex. la phase extramatrielle) du champignon ectomycorhizien variait significativement selon le matériel de recouvrement ( $p < 0,0001$ ). En effet, les contrastes orthogonaux ont montré que la moyenne du degré de colonisation externe des carottes par les champignons ectomycorhiziens était significativement plus grande ( $p < 0,0001$ ) dans les traitements Calcite/Calcite+ (61 %) que dans le traitement Silice (8 %) (figure 3). Par contre, l'écart n'était pas significatif ( $p = 0,1045$ ) entre les traitements Calcite (54 %) et Calcite+ (68 %). Sur toutes les carottes racinaires examinées, la colonisation par la phase extramatrielle des ectomycorhizes s'est toujours faite selon le même gradient, soit du haut (où le matériel de recouvrement était présent) vers le bas du substrat (figure 3b).

Presque tous les plants étaient colonisés par *Laccaria bicolor* (Maire) P. D.Orton, le champignon ectomycorhizien le plus abondant dans les pépinières forestières du Québec. Les fructifications de ce champignon sont très abondantes dans les pépinières forestières du Québec, en association avec différentes essences forestières (épinette blanche,



**Figure 2.** Évolution du  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  du substrat de croissance pendant la saison de croissance des plants d'épinette blanche (2+0), selon le matériel de recouvrement (Silice : 29 g/cavité, Calcite : 24 g/cavité et Calcite+ : 31 g/cavité). Les barres d'erreur représentent l'erreur type.



**Figure 3.** a) Pourcentage de colonisation externe du système racinaire des plants ( $n = 100$  plants/traitement) d'épinette blanche (2+0) par la phase extramatrielle du champignon ectomycorhizien *Laccaria bicolor* en automne (28 septembre 2015; les barres d'erreur représentent l'erreur type). b) Exemple exemple de variabilité de la colonisation superficielle des carottes des racines des plants d'épinette blanche (2+0) par *L. bicolor* selon le matériel de recouvrement (Silice : 29 g/cavité, Calcite : 24 g/cavité et Calcite+ : 31 g/cavité).

épinette noire [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.], pin gris [*Pinus banksiana* Lamb.], pin blanc [*Pinus strobus* L.], etc.). Le champignon *L. bicolor* est facilement identifiable par son odeur de caoutchouc, son pied à base lilacée, sa sporée blanche et ses spores échinulées, subglobuleuses à ellipsoïdes (Rolland Labbé, Mycoquébec). Parmi les 300 plants que nous avons examinés, un seul plant avait les racines colonisées de façon superficielle par *Telephora terrestris* Ehrhenberg Pl. Crypt. Linn. Exsicc., et ce, seulement sur une faible portion de la carotte.

## 2.4 Croissance des plants d'épinette blanche (2+0)

L'interaction Date × Traitement était significative ( $p \leq 0,0433$ ) pour toutes les variables de croissance à l'exception du diamètre et de la masse sèche des racines (tableau 2). Les effets simples du traitement et de la date étaient significatifs ( $p \leq 0,0005$ ) pour toutes les variables de croissance.

Le diamètre moyen des plants du traitement Calcite n'était pas significativement différent de celui des plants du traitement Calcite+ ( $p = 0,2906$ ), mais celui des plants de ces deux traitements pris ensemble était significativement supérieur à celui des plants du traitement Silice ( $p = 0,0001$ ; tableau 2). La masse sèche moyenne des racines, quant à elle, différait significativement entre les traitements Calcite et Calcite+ ( $p = 0,0293$ ) de même qu'entre les traitements Calcite/Calcite+ et Silice ( $p = 0,0007$ ).

Pour les quatre autres variables de croissance (hauteur [H], rapport hauteur/diamètre [H/D], masse des parties aériennes et masse sèche totale), les différences entre les traitements Calcite et Calcite+ n'étaient significatives à aucune des dates d'échantillonnage (annexe 2). En même temps, à la plupart de ces dates, la moyenne des traitements Calcite/Calcite+ était significativement supérieure à celle du traitement Silice.

À la fin de la deuxième saison de croissance, les plants des traitements Calcite et Calcite+ montraient des gains significatifs en hauteur (21,7 % en moyenne), en diamètre (9,1% en moyenne), en masse sèche des parties aériennes (20,6 %) et en masse sèche totale (18,3 %) par rapport à ceux du traitement Silice (figure 4).

Lors des deux premières saisons de croissance des plants (1+0 et 2+0), nous n'avons observé aucun développement apparent de mousse ou d'algues à la surface de la calcite ou de la silice (figure 5).

## 2.5 Modèles logistiques de croissance

La cinétique des différentes variables de croissance s'ajuste bien à des modèles logistiques ( $R^2$  variant de 0,733 à 0,895, figure 4). Plusieurs des paramètres de ces modèles diffèrent significativement entre le traitement Silice et les deux traitements à base de calcite (Calcite/Calcite+) (figure 4, annexe 3), mais ceux des modèles des traitements Calcite et Calcite+ ne diffèrent pas significativement

**Tableau 2.** Probabilités observées (valeurs de  $p$ ) et degrés de liberté des effets fixes associés à l'analyse de la variance des variables de croissance des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière. Les valeurs de  $p$  en gras indiquent les effets significatifs ( $p < 0,05$ ) les plus importants.

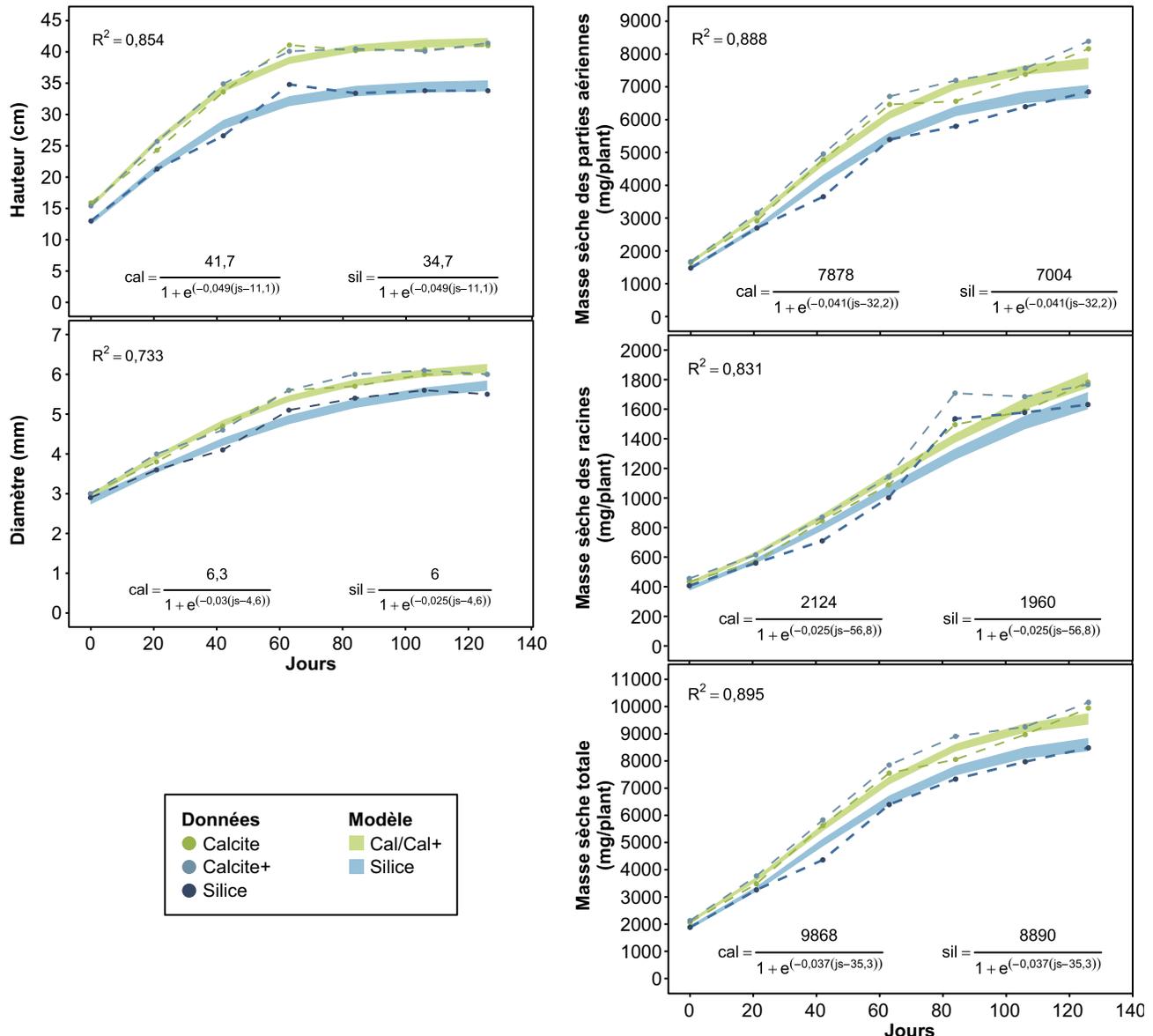
Source de variation	Degrés de liberté*		Valeurs de $p$					
	dln	dld	Hauteur (H) (cm)	Diamètre (D) (mm)	H/D	Masses sèches		
						Parties aériennes (mg)	Racines (mg)	Totale (mg)
Traitement	2	12	< 0,0001	<b>0,0002</b>	< 0,0001	< 0,0001	<b>0,0005</b>	< 0,0001
Calcite/Calcite+ vs Silice	(1)	12	< 0,0001	0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0007	< 0,0001
Calcite vs Calcite+	(1)	12	0,6702	0,2906	0,3109	0,0408	0,0293	0,0310
Date	6	70	< 0,0001	<b>&lt; 0,0001</b>	< 0,0001	< 0,0001	<b>&lt; 0,0001</b>	< 0,0001
Date (effet linéaire)	(1)	71	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Date (effet quadratique)	(1)	71	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0192	< 0,0001
Date × Traitement	12	70	<b>&lt; 0,0001</b>	0,0527	<b>0,0433</b>	<b>0,0003</b>	0,2998	<b>0,0008</b>

Note : dln = degrés de liberté au numérateur; dld = degrés de liberté au dénominateur. Les dld présentés sont ceux pour la hauteur et le diamètre. Ils varient de 18 à 26 pour la masse sèche des parties aériennes, de 20 à 48 pour la masse sèche des racines et de 19 à 26 pour la masse sèche totale.

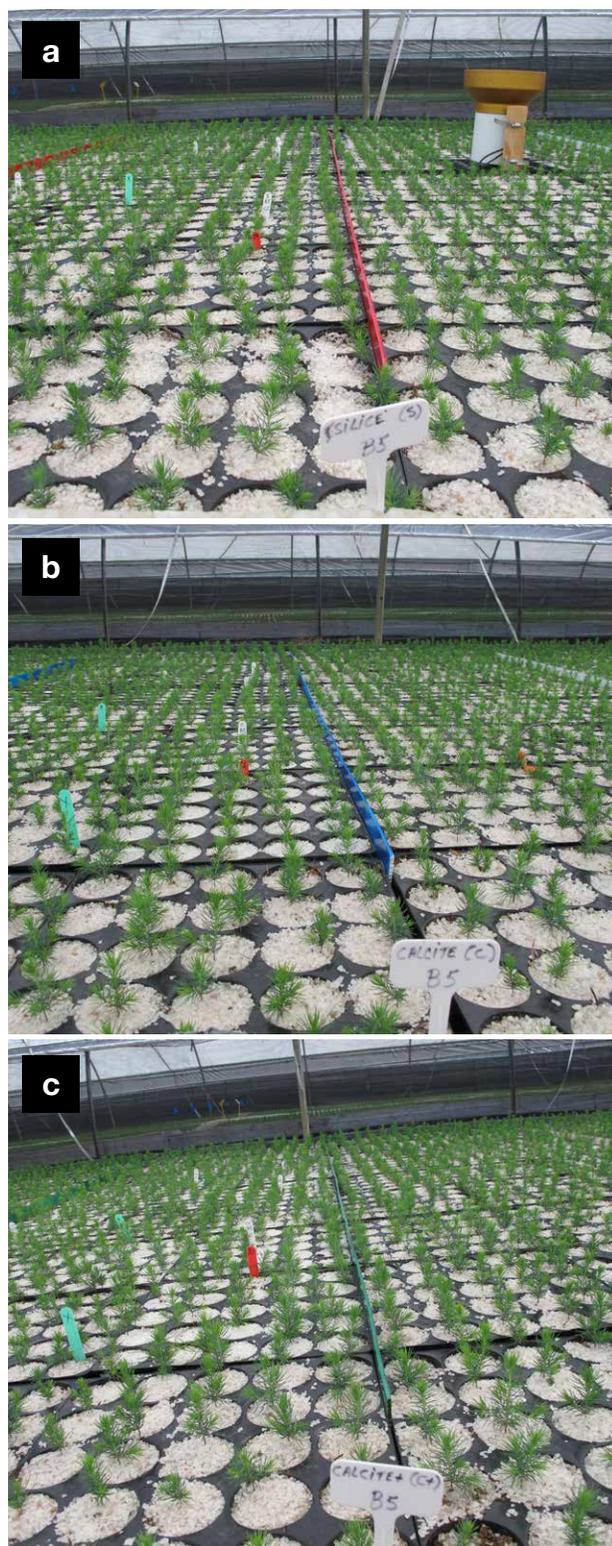
les uns des autres. Ces résultats montrent que les plants d'épinette blanche (2+0) dont les cavités sont recouvertes de calcite ont des gains significatifs en hauteur, en diamètre et en masse sèche (tant pour les parties aériennes et les racines que pour le plant entier) (figure 4). Par exemple, l'asymptote de la hauteur moyenne des plants à la fin de la deuxième saison de croissance était de 41,7 cm dans les traitements Calcite/Calcite+, mais de seulement 34,7 cm dans le traitement Silice.

## 2.6 Nutrition minérale des plants

L'interaction Date × Traitement était significative pour la plupart des variables de contenu, de concentration et d'efficacité d'utilisation des éléments minéraux dans les parties aériennes (tableau 3) et les racines (tableau 4). Les seules exceptions sont la concentration en Ca dans les parties aériennes (tableau 3), de même les contenus en N et en P ainsi que la concentration en Mg dans les racines (tableau 4).



**Figure 4.** Évolution des moyennes et modèles logistiques ajustés pour chacune des variables de croissance des plants d'épinette blanche (2+0), selon les traitements (Silice, Calcite et Calcite+). La largeur de chaque bande correspond à l'intervalle de confiance à 95 %. Comme les paramètres des deux traitements Calcite et Calcite+ ne différaient pas significativement les uns des autres, un seul modèle logistique a été généré en combinant les données de ces deux traitements. Les modèles ont été ajustés en utilisant l'ensemble des données (n = 525 plants/traitement pour la hauteur et le diamètre, et n = 105 échantillons composites de 5 plants/traitement pour les masses sèches des parties aériennes, des racines et totales).



**Figure 5.** Photos prises à la fin de la première saison de croissance des plants d'épinette blanche (1+0, sous tunnel). Aucune mousse ni algue ne s'était développée à la surface des cavités, quel que soit le traitement : a) Silice; b) Calcite; c) Calcite+. Les mousses et les algues sont demeurées absentes par la suite pendant la saison de croissance 2+0 (Photos : M. S. Lamhamedi, 6 août 2014).

Les effets simples du traitement et de la date d'échantillonnage étaient significatifs pour toutes les variables de nutrition minérale (contenus, concentrations et efficacité d'utilisation des éléments minéraux) des parties aériennes et des racines, à l'exception du contenu en Mg dans les racines et de l'efficacité d'utilisation du K dans les parties aériennes et les racines (tableaux 3 et 4). L'effet linéaire et l'effet quadratique de la date étaient significatifs pour plusieurs variables de concentration et de contenu en éléments minéraux.

Dans le cas du contenu en Ca des parties aériennes, les contrastes orthogonaux ne montrent aucune différence significative entre les traitements Calcite et Calcite+, et ce, peu importe la date d'échantillonnage ( $p > 0,0530$ ; annexe 4). Par contre, le contenu moyen en Ca des parties aériennes des plants était significativement plus élevé dans les traitements Calcite/Calcite+ pris ensemble que dans le traitement Silice (tableau 3). L'écart était significatif à toutes les dates d'échantillonnage (annexe 4) et s'est même accru au cours de la saison (figure 6). À la dernière date d'échantillonnage, les parties aériennes des plants des traitements Calcite/Calcite+ avaient aussi des contenus plus élevés en N, P, K et Mg que les plants du traitement Silice.

En ce qui concerne la concentration et le contenu du Ca dans les racines, la supériorité significative des traitements Calcite/Calcite+ par rapport au traitement Silice s'est maintenue pendant la saison de croissance (annexe 5), de sorte qu'à la dernière date d'échantillonnage, la concentration (Calcite/Calcite+ :  $0,36 \pm 0,01$  %; Silice :  $0,21 \pm 0,01$  %) et le contenu en Ca (Calcite/Calcite+ :  $6,34 \pm 0,20$  mg; Silice :  $3,46 \pm 0,26$  mg) pour les traitements Calcite/Calcite+ étaient presque le double de ceux du traitement Silice.

L'efficacité de l'utilisation des trois éléments minéraux dans les parties aériennes et aux racines n'a pas varié de manière significative entre les traitements Calcite et Calcite+ (annexes 4 et 5). Cependant, l'efficacité de l'utilisation de l'azote était plus grande, en moyenne, dans les plants des traitements Calcite/Calcite+ pris ensemble que dans ceux du traitement Silice pour plusieurs dates (écarts moyens de 8 % dans les parties aériennes et de 16,5 % dans les racines, sur l'ensemble des dates d'échantillonnage).

**Tableau 3.** Probabilités observées (valeurs de *p*) et degrés de liberté des effets fixes associés à l'analyse de la variance pour le contenu et la concentration en éléments minéraux dans les parties aériennes des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière. Les valeurs de *p* en gras indiquent les effets significatifs (*p* < 0,05) les plus importants.

Source de variation	Degrés de liberté*		Valeurs de <i>p</i>													
	dln	dld	Contenu (mg/plant)					Concentration (%)					Efficacité d'utilisation†			
			N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	NUE	PUE	KUE	
Traitement	2	12	0,0014	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0016	< 0,0001	0,0036	0,0532	<b>&lt; 0,0001</b>	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0003	0,0707
Calcite/Calcite+ vs Silice	(1)	12	0,0006	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0007	< 0,0001	0,0028	0,2478	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0002	0,2603
Calcite vs Calcite+	(1)	12	0,1630	0,2809	0,5552	0,0133	0,1294	0,4172	0,0327	0,0299	0,3098	0,3520	0,3871	0,0623	0,0623	0,0404
Date	6	70	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	<b>&lt; 0,0001</b>	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Date (effet linéaire)	(1)	70	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0121	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Date (effet quadratique)	(1)	70	0,0133	< 0,0001	< 0,0001	0,0378	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,8715	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,7859
Date x Traitement	12	70	<b>0,0182</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0032</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,0262</b>	<b>0,0203</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0262</b>	0,0742	<b>0,0162</b>	<b>0,0011</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,0056</b>	

\* dln = degrés de liberté au numérateur, dld = degrés de liberté au dénominateur. Les dld présentés sont ceux pour les contenus. Les dld variant de 7 à 78 pour les autres variables.

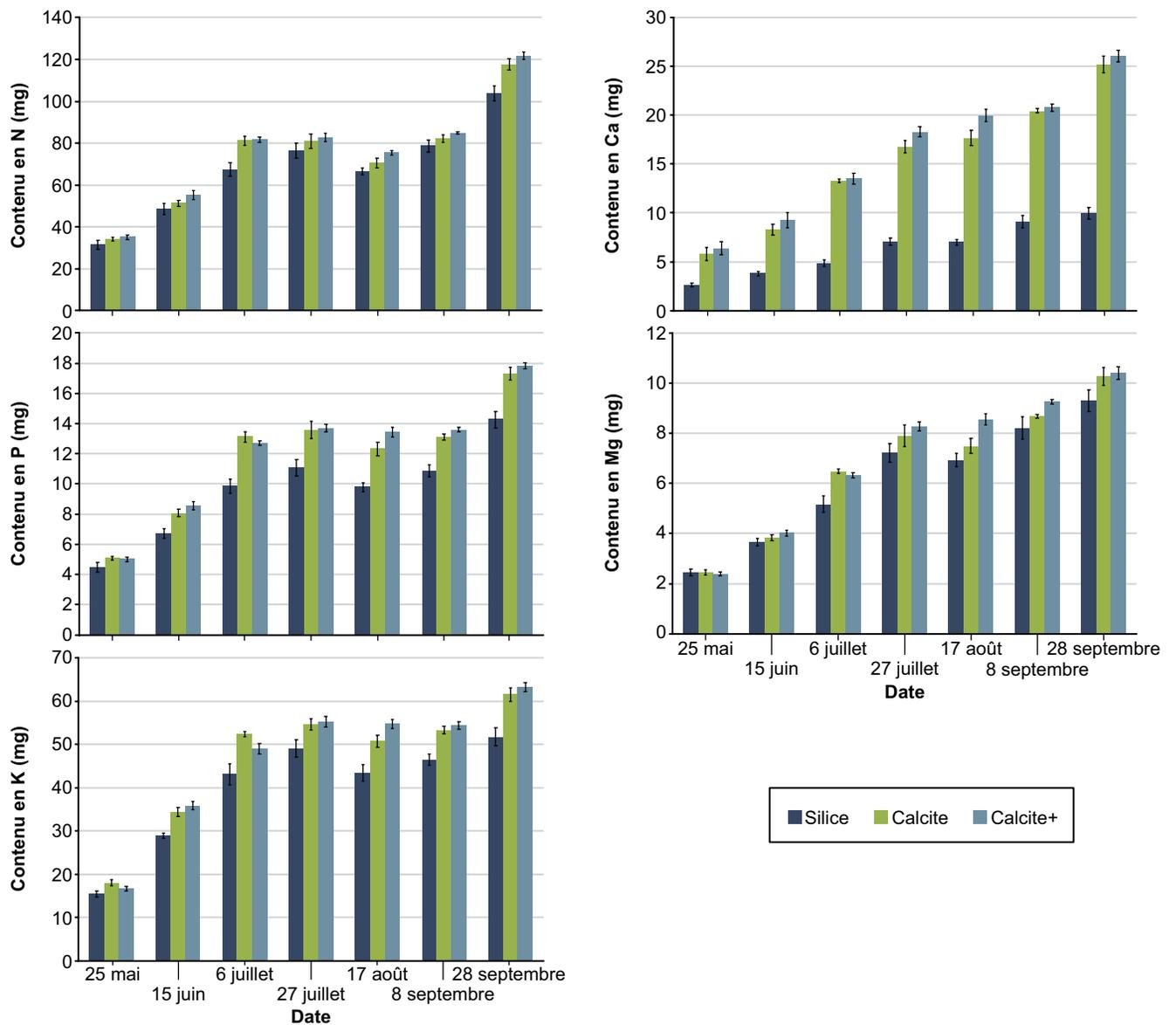
† NUE = efficacité d'utilisation de l'azote; PUE = efficacité d'utilisation du phosphore; KUE = efficacité d'utilisation du potassium.

**Tableau 4.** Probabilités observées (valeurs de *p*) et degrés de liberté des effets fixes associés à l'analyse de la variance du contenu et de la concentration en éléments minéraux des racines des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière. Les valeurs de *p* en gras indiquent les effets significatifs (*p* < 0,05) les plus importants.

Source de variation	Degrés de liberté*		Valeurs de <i>p</i>												
	dln	dld	Contenu (mg/plant)					Concentration (%)					Efficacité d'utilisation†		
			N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	NUE	PUE	KUE
Traitement	2	46	<b>0,0009</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	< 0,0001	< 0,0001	0,0775	< 0,0001	0,0014	< 0,0001	< 0,0001	<b>0,0005</b>	< 0,0001	0,0321	0,0227
Calcite/Calcite+ vs Silice	1	48	0,0011	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,5620	< 0,0001	0,0017	< 0,0001	< 0,0001	0,0001	< 0,0001	0,0359	0,0078
Calcite vs Calcite+	1	45	0,0479	0,0052	0,0231	0,0031	0,0296	0,5714	0,0568	0,7952	0,2339	0,4506	0,7614	0,1039	0,7131
Date	6	18	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	<b>&lt; 0,0001</b>	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Date (effet linéaire)	1	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0136	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Date (effet quadratique)	1	23	0,5104	0,3732	0,2114	0,0012	0,0239	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,2353	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Date x Traitement	12	18	0,2820	0,1563	<b>0,0019</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,0300</b>	<b>0,0029</b>	<b>0,0034</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,0124</b>	0,1472	<b>0,0266</b>	<b>0,0035</b>	<b>&lt; 0,0001</b>

\* dln = degrés de liberté au numérateur, dld = degrés de liberté au dénominateur. Les dld présentés sont ceux pour le contenu en N. Les dld variant de 8 à 78 pour les autres variables.

† NUE = efficacité d'utilisation de l'azote; PUE = efficacité d'utilisation du phosphore; KUE = efficacité d'utilisation du potassium.



**Figure 6.** Évolution des moyennes des contenus des parties aériennes des plants d'épinette blanche (2+0) en azote (N), en phosphore (P), en potassium (K), en calcium (Ca) et en magnésium (Mg), selon les traitements (Silice, Calcite et Calcite+) (n = 5 échantillons composites de 15 plants chacun. Les barres d'erreur représentent l'erreur type).



# Chapitre 3

## Discussion

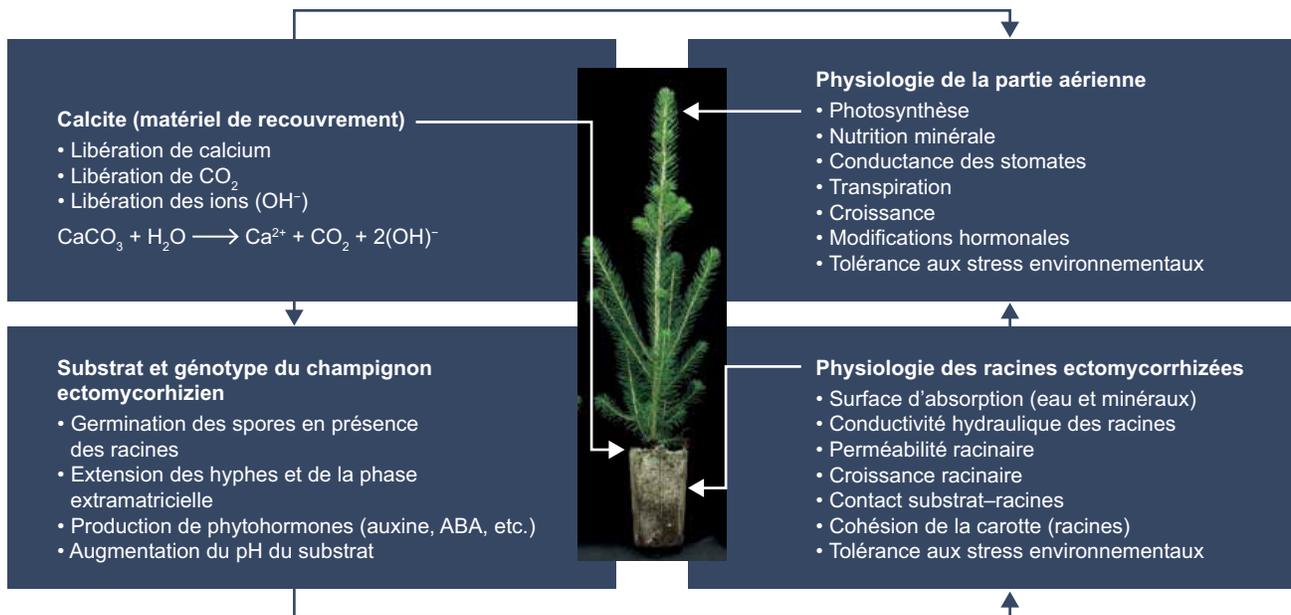
L'utilisation de la calcite plutôt que de la silice comme matériel de recouvrement a significativement amélioré les propriétés chimiques du substrat tourbeux (pH et concentration en Ca), la nutrition minérale et les différentes variables de croissance des plants d'épinette blanche (2+0) produits à une échelle opérationnelle. La calcite a également augmenté de façon significative la mycorhization et la colonisation superficielle des carottes des plants d'épinette blanche (2+0) par le mycélium extraracinaire du champignon ectomycorhizien *L. bicolor*, ce qui n'a pas été observé avec la silice.

### 3.1 Stimulation du développement de la phase extramatricielle des champignons ectomycorhiziens

La colonisation ectomycorhizienne précoce et l'extension rapide du mycélium extraracinaire à l'extérieur des carottes des racines des plants d'épinette blanche (2+0) recouverts par la calcite (figure 3) sont stimulées de façon synergique par plusieurs facteurs, notamment l'amélioration du pH du substrat tourbeux, la libération du Ca et du CO<sub>2</sub> par la calcite dans la rhizosphère (figure 7) et probablement la présence de micro-organismes auxiliaires dans le manteau fongique des ectomycorhizes (Garbaye et Bowen 1989). En effet, Gagnon (1996) a montré que l'inoculation des plants du pin gris avec une combinaison du champignon *Laccaria bicolor* et de la bactérie *Pseudomonas fluorescens* a augmenté significativement la croissance des plants par rapport aux effets de l'un ou l'autre de ces traitements (champignon ou bactérie) appliqué seul. La calcite (CaCO<sub>3</sub>) utilisée comme matériel de recouvrement libère du CO<sub>2</sub> (De Klein *et al.* 2006) qui s'ajoute à celui généré dans la rhizosphère par l'activité des micro-organismes (y compris les ectomycorhizes) et la respiration des racines (Bekele *et al.* 2007, Leake *et al.* 2004). Ce CO<sub>2</sub> supplémentaire stimule la germination des spores, la croissance et le développement des hyphes des champignons (Bécard et Piché 1989, Tabak et Cooke 1968), ainsi que la biomasse et la fructification des champignons ectomycorhiziens (Andrew et Lilleskov 2009, Pickles *et al.* 2012). De plus, après germination des spores, la présence du Ca libéré dans la rhizosphère par la calcite stimule à son tour la croissance et l'extension des hyphes des champignons (Jackson

et Heath 1993). Ceci explique pourquoi la phase extramatricielle de *L. bicolor* s'étend et se développe rapidement en suivant le gradient croissant de la concentration du Ca et du pH (résultats non présentés), soit du haut de la carotte (où le matériel de recouvrement était présent) vers le bas (figure 3b). Il est fort probable que la germination des spores de *L. bicolor*, en présence obligatoire des racines des plants d'épinette blanche 2+0 (Kope et Fortin 1990), nécessite une concentration minimale de CO<sub>2</sub>, et que celle-ci soit atteinte plus vite en présence de la calcite que de la silice. En effet, la calcite a un facteur d'émission de CO<sub>2</sub> élevé (Bekele *et al.* 2007), alors que la silice ne libère pas de CO<sub>2</sub>. Ceci explique en partie l'excellent développement des hyphes de la phase extramatricielle de *L. bicolor* en présence de la calcite. Chez certains champignons endomycorhiziens (p. ex. *Gigaspora margarita* Becker & Hall), le développement des hyphes était optimal à une concentration de CO<sub>2</sub> de 2,5 % (Poulin *et al.* 1993). Quelle que soit la quantité de plants forestiers produits en pépinière, les quantités de CO<sub>2</sub> comme gaz à effet de serre libérées par la calcite en pépinière forestière restent inférieures à celles libérées par la chaux dolomitique (facteur d'émission : 13 %) utilisée en agriculture et dans les érablières (Bekele *et al.* 2007, Moore *et al.* 2012, Rock Ouimet, comm. pers.).

La colonisation ectomycorhizienne a amélioré l'architecture des racines et la cohésion des carottes des plants d'épinette blanche (figure 3). Ces observations concordent avec celles décrites par Gagnon et Lamhamedi (2011) et par Lamhamedi (2006, 2011). En effet, les caractéristiques anatomiques des ectomycorhizes et la densité très forte du mycélium extraracinaire dans la phase extramatricielle du *L. bicolor* augmentent de façon significative la longueur des racines et facilitent l'exploration du volume du substrat. Ce mycélium extraracinaire du *L. bicolor* est directement connecté aux racines des plants d'épinette blanche et constitue une extension fonctionnelle du système racinaire. Par exemple, la longueur mesurée des hyphes du champignon ectomycorhizien en conditions contrôlées peut représenter de 10 à 80 m par cm de racines (Read et Boyd 1986). D'autres travaux (Lamhamedi *et al.* 1990, 1992) ont montré que l'extension de la surface du mycélium extraracinaire (hyphes et



**Figure 7.** Principaux mécanismes par lesquels la calcite et les ectomycorhizes améliorent la physicochimie du substrat, la croissance et la physiologie des plants.

cordons mycéliens) de *Pisolithus* sp. (Pers.) Coker & Couch améliore significativement l'architecture racinaire et la surface d'absorption des racines des plants de *Pinus pinaster* (Ait) dans un sol sableux. L'extension mesurée de la surface de la phase extramatrielle était de 1 à 3 cm<sup>2</sup>/jour selon le génotype du champignon.

Le développement de la phase extramatrielle des champignons ectomycorhiziens améliore aussi la structure du sol ou du substrat, plus particulièrement le mode d'arrangement et de cohésion des agrégats par les hyphes et par les sécrétions de polysaccharides extracellulaires (Perry *et al.* 1987, Rillig et Mummey 2006). Pour certains champignons ectomycorhiziens, Read (1992) estime que la longueur des hyphes de la phase extramatrielle peut atteindre 200 m/g de sol sec ou 2000 m/cm<sup>3</sup> de sol frais et que la densité des hyphes dans la zone active d'extension du mycélium peut atteindre 250 filaments individuels par millimètre linéaire.

La phase extramatrielle des champignons ectomycorhiziens augmente la surface d'absorption des racines des plants (eau et éléments minéraux). Dans le cas des plants d'épinette blanche produits en récipients (350 cm<sup>3</sup>/cavité) dans un substrat tourbeux, la longueur totale moyenne de toutes les racines mesurée par analyse d'image (n = 36 plants), pendant toute une saison de croissance (1+0) à une échelle opérationnelle, n'a pas dépassé 834 cm sous une régie d'irrigation optimale (45 %, v/v), soit 0,02 m/cm<sup>3</sup> de substrat frais (Lamhamedi *et al.* 2001). La présence de ces hyphes fins, de faible

diamètre par rapport aux racines, permet aux plants d'explorer tout le volume du substrat et de pénétrer entre les particules du substrat où les racines ne peuvent pas accéder.

La colonisation mycorhizienne contribue aussi à diminuer le lessivage des éléments minéraux, en retenant et en immobilisant ces éléments dans ses différentes structures (hyphes, manteau fongique, etc.; Näsholm *et al.* 2013). Par exemple, une portion du Ca est absorbée à la surface des hyphes du champignon ectomycorhizien sous forme de cristaux d'oxalate de calcium (CaOx) (Montford-Salvador *et al.* 2015). La formation de CaOx est augmentée de façon significative par la présence des bicarbonates libérés par la calcite et les nitrates issus de la fertilisation (Lapeyrie *et al.* 1987). À cet égard, Arocena *et al.* (2001) ont montré que la surface des hyphes de *Piloderma* en association avec les racines de *Picea glauca* (Moench) Voss x *Picea engelmannii* Parry est recouverte d'incrustations riches en Ca (p. ex., CaOx) dont le contenu en Ca peut atteindre 17 %. Ces hyphes stockent des quantités importantes d'éléments minéraux et contribuent à réduire le lessivage et la pollution de la nappe phréatique. Après la mort des hyphes, le Ca est libéré dans la solution du sol pour être ensuite absorbé par les racines (Montford-Salvador *et al.* 2015).

La calcite augmente le pH à un niveau optimal (pH<sub>eau</sub> entre 4 et 5) pour la croissance et la nutrition minérale des plants forestiers résineux produits dans les substrats tourbeux (Rikala et Jozefek

1990), ainsi que pour la croissance et le développement des champignons ectomycorhiziens de la forêt boréale (Dennis 1985). D'autres facteurs et différentes interactions entre le pH et le Ca contribuent aussi à améliorer la physicochimie du substrat, la croissance et la physiologie des plants (figure 7).

Nos résultats et nos observations antérieurs sur les principales essences de la forêt boréale (épinette noire, épinette blanche, pin gris et mélèze) produites dans les pépinières forestières du Québec ont montré que la colonisation des racines par la phase extramatricielle de *L. bicolor* confère une bonne cohésion des carottes et contribue à diminuer l'insuffisance racinaire des plants (critère 01 de rejet des plants au Québec) (Gagnon et Lamhamedi 2011, Lamhamedi 2006, 2011, Lamhamedi *et al.* 2011d), qui figure parmi les critères importants de rejet des plants au Québec (Lamhamedi *et al.* 2013b). Ainsi, le *L. bicolor* se distingue par sa production d'une phase extramatricielle extrêmement dense (figure 3b), ce qui assure une bonne cohésion entre les particules du substrat et les racines (Allen 2007). L'amélioration de la cohésion des carottes par la phase extramatricielle dense du *L. bicolor* a été également rapportée chez les boutures d'épinette blanche (B+2) (Lamhamedi 2011). Le maintien de cette cohésion est primordial lors de la qualification des plants en pépinière et des différentes étapes de manutention des plants entre la pépinière et le site de plantation, jusqu'à leur mise en terre.

### 3.2 Amélioration de la croissance et de la qualité morphophysologique des plants

L'utilisation de la calcite plutôt que la silice comme matériel de recouvrement n'a pas affecté le taux de germination des semences ou le taux d'occupation des cavités, qui était en moyenne de 99,33 % pour les trois traitements.

À la dernière date d'échantillonnage de la deuxième saison de croissance des plants d'épinette blanche, les plants des traitements Calcite et Calcite+ montraient des gains significatifs par rapport à ceux du traitement Silice pour la hauteur (écart moyen de 21,7 %), la masse sèche des parties aériennes (20,6 %) et la masse totale (18,3 %). Les asymptotes des modèles de croissance (figure 4) démontrent clairement une supériorité significative de la calcite par rapport à la silice. En ce qui concerne la masse sèche des racines, l'écart de 9 % entre les traitements Calcite/Calcite+ et Silice n'était pas significatif, peut-être parce que la croissance des racines a été restreinte par le volume des cavités (310 cm<sup>3</sup>) au cours de la deuxième saison de croissance. Par contre, à la fin de la première saison

de croissance et lorsque le volume de la cavité (espace vital des racines) n'était pas un facteur limitant, la masse des racines était significativement supérieure dans le traitement Calcite+ par rapport au traitement Silice (écart de 31 %; Calcite+ : 562,0 ± 15,0 mg; Silice : 427,0 ± 12,0 mg; résultats non présentés).

Sur le plan de la nutrition minérale, le contenu moyen en éléments minéraux (N, P, K, Ca et Mg) des parties aériennes des plants dans les cavités recouvertes de calcite était significativement supérieur à celui des plants du traitement Silice (figure 6). Il en était de même pour le contenu en K, Ca et Mg des parties aériennes (tableau 4). La calcite a également augmenté de façon significative l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE) dans les parties aériennes et les racines des plants (écarts de 8 % et de 16,5 %, respectivement, pour les traitements Calcite/Calcite+ par rapport au traitement Silice).

Le Ca, à lui seul ou de façon synergique avec d'autres facteurs (ectomycorhizes, CO<sub>2</sub>, etc.), a augmenté de façon significative la croissance des plants grâce à ses effets positifs sur différents processus physiologiques. En effet, cet élément active la division et l'élongation cellulaire, régule la perméabilité membranaire des cellules, renforce la rigidité des parois cellulaires et agit comme régulateur de la photosynthèse en synergie avec l'acide abscissique lors de l'ouverture des stomates (White et Broadley 2003, Hochmal *et al.* 2015, Desilva *et al.* 1985). En même temps, le Ca stimule la photosynthèse et l'absorption de l'azote, du phosphore et du potassium (Feagly et Fenn, 1998, Yang *et al.* 2016). Pour d'autres cultures, par exemple, le tabac, l'ajout de Ca améliore l'absorption des oligo-éléments, notamment le fer, le manganèse, le zinc et le bore (Lopez-Lefebvre *et al.* 2001).

### 3.3 Synergie pour améliorer la tolérance des plants aux stress environnementaux

Lors des dernières années, les pépiniéristes ont subi d'importantes pertes de plants en raison des conditions climatiques extrêmes caractérisées par un retard dans le cumul du nombre d'heures de froid en automne et par l'absence d'une couverture de neige suffisante au début d'hiver (Lamhamedi *et al.* 2011c). À cet effet, l'utilisation de la calcite comme matériel de recouvrement et une meilleure inoculation naturelle des plants par des champignons ectomycorhiziens pourraient contribuer à améliorer l'endurcissement et l'acquisition de la tolérance au gel des plants. En effet, certains travaux ont montré que l'endurcissement et la tolérance au gel sont améliorés par le calcium chez les plants forestiers

en pépinière (Landis 1996) et chez les arbres fruitiers et forestiers au champ, notamment le pommier, le chêne vert et l'épinette rouge (Palta 1996, Halman *et al.* 2008, Percival et Barnes 2008), et par la présence des ectomycorhizes chez le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) (Korhonen *et al.* 2015, Otgonsuren et Lee 2013). À notre avis, la combinaison du Ca et des ectomycorhizes, objet de notre étude, permettrait une synergie entre les effets simples déjà observés de ces deux facteurs et augmenterait la tolérance des plants à d'autres stress environnementaux, biotiques (salinité, excès d'eau, sécheresse, hautes températures; Lamhamedi *et al.* 1992, Palta 1996, Percival et Barnes 2008, Yang *et al.* 2016, Zhao et Tan 2005) et abiotiques (attaques par les agents pathogènes; Whipps 2004).

Après la mise en terre des plants en site de reboisement, la phase extramatricielle des champignons ectomycorhiziens à la surface des racines des racines aide à maintenir le contact sol-racines et facilite l'exploration rapide d'un grand volume de sol. Lors d'une sécheresse, qui accentue la présence de poches d'air dans la rhizosphère, les plants mycorrhizés peuvent alors mieux accéder à l'eau interstitielle, généralement non accessible aux racines (Lamhamedi *et al.* 1992, Lehto et Zwiazek 2011). Tant en conditions contrôlées qu'en site de reboisement, les ectomycorhizes confèrent aux plants des essences boréales (épinette blanche, épinette noire, pin gris) une tolérance accrue aux stress environnementaux en améliorant la conductivité hydraulique des racines, la nutrition minérale et en diminuant les pertes d'eau par transpiration grâce au contrôle des stomates (Boyle et Hellenbrand 1991, Grossnickle 2000, Lehto et Zwiazek 2011, Onwuchekwa *et al.* 2014). Dans une expérience sur la restauration et la réhabilitation des sites de schistes bitumineux en Alberta (Canada), les plants d'épinette blanche inoculés par des champignons ectomycorhiziens avaient un taux de survie, après deux saisons de croissance, jusqu'à 75 % supérieur à celui des plants non inoculés (Onwuchekwa *et al.* 2014).

Certains projets de reboisement ou de migration assistée ont pour objectif d'atténuer les effets des changements climatiques sur les plantations futures d'épinette blanche (Benomar *et al.* 2018, Lamhamedi *et al.* 2017). Dans ce contexte, afin de faciliter l'adaptation et améliorer la croissance et la survie des plants mis en terre dans les sites de reboisement, il serait souhaitable de favoriser l'inoculation naturelle ou artificielle des plants en pépinière par des champignons ectomycorhiziens. L'inoculation des plants à l'aide de spores est une technique à la portée des pépiniéristes, facile à maîtriser et peu coûteuse, qui a été utilisée avec

succès en pépinière forestière au Québec (Gagnon et Lamhamedi 2011, Lamhamedi 2006) et ailleurs dans le monde (Brundrett *et al.* 1996, Lamhamedi *et al.* 2009, Landis *et al.* 1989b). Les spores peuvent être collectées à partir des fructifications de champignons ectomycorhiziens présentes dans les cultures en récipients en pépinière ou dans les peuplements forestiers situés près de la pépinière de la zone écologique du site de reboisement où les plants seront mis en terre. À cet effet, ces spores peuvent être considérées d'origine locale à l'échelle d'une région écologique. Brundrett *et al.* (2005) ont comparé, dans le cadre d'un vaste programme d'inoculation des plants en pépinière en Chine et en Australie, les effets de l'inoculation des plants avec des spores et du mycélium végétatif de 90 isolats issus de 28 genres de champignons ectomycorhiziens. Après deux ans en pépinière, le succès de la mycorrhization des plants était meilleur avec les spores qu'avec le mycélium végétatif.

Les souches utilisées doivent être compatibles avec les essences forestières et adaptées aux sites (Kranabetter *et al.* 2015, Perry *et al.* 1987). Certains champignons sont compatibles avec une ou certaines essences, d'autres avec plusieurs. L'utilisation de spores d'une seule espèce ou d'un cocktail d'espèces de champignons ectomycorhiziens compatibles avec les essences produites contribuera à favoriser le maintien d'une population de champignons ectomycorhiziens génétiquement diversifiée et dotée d'un potentiel d'adaptation. Le choix de l'espèce du champignon doit répondre à certains critères, notamment quant au pouvoir mycorrhizogène, au potentiel de survie et de croissance sous les régies de culture en pépinière, à la compatibilité avec plusieurs essences forestières, à la compétitivité avec la population fongique locale en pépinière et à l'adaptation écologique à différents sites de reboisement après la mise en terre des plants (Marx et Cordell 1989).

Parmi les champignons ectomycorhiziens évalués et recommandés, le *L. bicolor* figure parmi les plus prometteurs (Kropp et Langlois 1990) et répond parfaitement aux critères ci-dessus. Différents travaux réalisés au Québec ont évalué la persistance, la compétitivité et la continuité de la colonisation des racines par le *L. bicolor* pendant la phase d'établissement des plants après leur mise en terre en site de reboisement. Le développement et l'extension de la phase extramatricielle du champignon ectomycorhizien permettent aux plants de s'établir rapidement en site de reboisement et facilitent leur accès aux différentes ressources (Kropp et Langlois 1990, Perry *et al.* 1987). McAfee et Fortin (1987) ont montré que le *L. bicolor* est

particulièrement compétitif avec la flore indigène et qu'il persiste 15 semaines après la mise en terre des plants. Dans une autre étude, McAfee et Fortin (1986) ont également montré qu'après deux mois, le *L. bicolor* s'est avéré le meilleur colonisateur et le meilleur compétiteur dans quatre stations représentatives de différentes conditions écologiques des écosystèmes forestiers du Québec. Dans leur étude de la mycorhization naturelle dans 10 plantations installées à l'échelle de la province du Québec, McAfee et Fortin (1989) ont montré que la croissance des plants d'épinette noire (p. ex. leur production de masse sèche) pendant la phase d'installation en site de reboisement était corrélée significativement au taux de mycorhization que les plants avaient lors de leur mise en terre.

Au Québec, l'inoculation artificielle par des spores locales du *L. bicolor* a donné d'excellents résultats à une échelle opérationnelle, en ce qui concerne la réussite de l'inoculation et la production de carpophores. Par exemple, un pépiniériste privé a inoculé des plants 1+0 et 2+0 de différentes essences

forestières (pin gris, sapin, épinette blanche, noire, rouge et de Norvège) dans 7 tunnels pour favoriser la cohésion des carottes et améliorer la croissance des racines des plants produits (Gagnon et Lamhamedi 2011, Lamhamedi 2006). Cette inoculation a amélioré la cohésion des racines et donné lieu à une densité de carpophores de *L. bicolor* de 1 à 14,5 carpophores par m<sup>2</sup>, soit une moyenne de 61 à 744 carpophores par tunnel après l'évaluation de 210 à 600 récipients par tunnel. D'autres résultats forts encourageants ont été obtenus récemment dans d'autres pépinières forestières du Québec à la suite d'inoculations artificielles (Marc Olivier Labrecque, comm. pers.).

La présence de champignons ectomycorhiziens contribue aussi à améliorer la plasticité des plants mis en terre et leurs traits fonctionnels, notamment l'acquisition, l'absorption et le transport de l'eau et des éléments minéraux, les échanges gazeux ainsi que la tolérance aux différents stress environnementaux (Lamhamedi *et al.* 1991, Leake *et al.* 2004, Lehto et Zwiazek 2011, Read *et al.* 2004).



## Conclusion et portée opérationnelle des résultats

La chaux calcique ou dolomitique sous forme de poudre a déjà été utilisée pour augmenter le pH des substrats (Bryan *et al.* 1989, Lamhamedi et Renaud 2005, 2011a, Rippey 2005) et pour étudier l'installation des champignons mycorhiziens (Choi *et al.* 2008, Lamhamedi et Renaud 2005, 2011a, Lehto 1994). Cependant, il s'agit de la première fois, à notre connaissance, que les effets de la calcite granulaire comme matériel de recouvrement sont évalués sur la physicochimie du substrat, la colonisation précoce des racines par les champignons ectomycorhiziens, la croissance et la nutrition minérale des plants (2+0) en pépinière forestière.

La calcite granulaire influence plusieurs processus physiologiques (figure 7). Elle améliore significativement la physicochimie du substrat, de même que la croissance et la nutrition minérale des plants produits en pépinière.

Afin d'éviter de créer des conditions propices au développement de mousses et d'algues à la surface de la calcite, nous recommandons au pépiniériste d'utiliser de la calcite granulaire dont les grains ont un diamètre de 1,2 à 3,2 mm (14 mesh 1/8) et de gérer adéquatement l'aération des tunnels et l'irrigation selon les stades de croissance (Lamhamedi *et al.* 2001). La quantité de calcite utilisée ne devrait pas dépasser 31 g/cavité de 310 cm<sup>3</sup> (soit 775 g par récipient 25-310). Pour les autres récipients, le pépiniériste devrait ajuster cette quantité à la volumétrie de la cavité, dans une proportion équivalente.

L'utilisation de la calcite granulaire, à la portée de tout pépiniériste, contribue à améliorer la qualité morphophysiologique des plants et favorise la colonisation précoce des racines par les champignons ectomycorhiziens, de même que le développement de leur phase extramatricielle. La meilleure cohésion des carottes des racines qui en résulte contribuera à réduire le nombre de plants rejetés à cause d'une insuffisance racinaire (Gagnon et Lamhamedi 2011, Lamhamedi 2006, 2011, Lamhamedi *et al.* 2011d). En même temps, le nombre de plants rejetés pour d'autres raisons pourrait aussi diminuer, car le Ca libéré par la calcite et les ectomycorhizes accroît la tolérance des plants aux stress environnementaux abiotiques et biotiques (gel, champignons pathogènes, etc.).

L'utilisation de la calcite permettra aux pépiniéristes de diminuer les applications automnales de fertilisant à base de nitrate de calcium CaNO<sub>3</sub>

nécessaire pour fournir le Ca indispensable à l'endurcissement des plants et leur tolérance au gel (Lamhamedi et Gagnon 2002, Landis *et al.* 1989). Cette diminution contribuera également à réduire le lessivage des nitrates (Lamhamedi *et al.* 2001) et le coût de fertilisants.

L'amélioration du pH des substrats tourbeux recouverts de calcite permettra d'améliorer l'absorption et l'efficacité de l'utilisation des éléments minéraux par les plants et favorisera la colonisation précoce des racines par les champignons ectomycorhiziens (figure 7). Cependant, la bonne colonisation des racines par ces champignons ne peut se maintenir que si la fertilité du substrat est faible. Considérant la contrainte de l'atteinte des normes et critères de qualité des plants en réceptifs (concentration foliaire en azote, etc.) et la très courte durée de la saison de croissance, l'inoculation naturelle et/ou artificielle des plants avec des spores devrait être privilégiée en automne, au moment où les apports en fertilisants sont réduits (fertilité faible du substrat en azote et en phosphore, etc.) et après que la croissance en hauteur soit terminée. Cette période coïncide avec la croissance active des racines, la translocation des produits de la photosynthèse courante vers les racines et la formation des bourgeons. Le développement de la phase extramatricielle et l'apparition des fructifications de champignons ectomycorhiziens (p. ex. *L. bicolor* et autres) en pépinière et en forêt coïncident avec la fin de la croissance en hauteur et le début de la phase de croissance active des racines des plants ainsi qu'avec le transfert des produits de la photosynthèse courante dans la mycorhizosphère (Fortin et Lamhamedi 2009).

L'inoculation naturelle ou artificielle des plants peut se faire à l'aide de spores locales. Celles-ci peuvent être issues des fructifications de champignons ectomycorhiziens présentes dans les cultures en réceptifs en pépinière ou dans les peuplements forestiers de la région écologique de la pépinière, car les spores sont transportées par le vent sur de longues distances. Chaque année, le croisement naturel entre les spores (monocaryons compatibles) contribue à rehausser la diversité génétique des champignons ectomycorhiziens (de la Bastide *et al.* 1995). Parmi les champignons recommandés (Kropp et Langlois 1990), le pépiniériste aura avantage à utiliser les spores du *L. bicolor*. Ce champignon est le plus commun au Québec, il produit

beaucoup de fructifications, est compatible avec plusieurs essences forestières et est facilement identifiable. Il abonde dans les pépinières forestières et dans les jeunes plantations de conifères. De plus, sa souplesse d'adaptation lui permet de bien croître dans les environnements changeants et hétérogènes des milieux écologiques de la forêt boréale.

L'inoculation artificielle pourra être utilisée comme complément à la mycorhization naturelle afin de pallier le degré variable de mycorhization entre les plants et de garantir la colonisation des racines de tous les plants de la production. Les techniques de mycorhization en pépinière à l'aide de spores sont décrites par Gagnon et Lamhamedi (2011).

Cette étude a permis de générer des modèles de croissance des plants d'épinette blanche 2+0

cultivés en utilisant deux types de matériel de recouvrement : la silice et la calcite granulaire. Ces modèles pourront être utilisés comme standards de croissance par les pépiniéristes désirant optimiser les différentes régies de culture et faciliter l'atteinte des normes de qualité morphophysique lors de la livraison des plants selon le gabarit recherché.

Nos résultats obtenus sur la calcite granulaire et le développement des ectomycorhizes en pépinière, combinés avec ceux obtenus en site de reboisement pendant la phase juvénile (McAfee et Fortin 1986, 1987, 1989, Onwuchekwa *et al.* 2014), peuvent contribuer à l'atteinte des objectifs des programmes de reboisement, notamment en améliorant la survie et la tolérance des plants aux différents stress environnementaux pendant leur phase d'établissement en site de reboisement.

## Références bibliographiques

- Ågren, G.I., 1985. *Theory for growth of plants derived from the nitrogen productivity concept*. *Physiol. Plant.* 64(1): 17-28. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1985.tb01207.x>
- Allen, M.F., 2007. *Mycorrhizal fungi: Highways for water and nutrients in arid soils*. *Vadose Zone J.* 6(2): 291-297. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0068>
- Andrew, C. et E.A. Lilleskov, 2009. *Productivity and community structure of ectomycorrhizal fungal sporocarps under increased atmospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>*. *Ecol. Lett.* 12(8): 813-822. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01334.x>
- Arocena, J.M., K.R. Glowa et H.B. Massicotte, 2001. *Calcium-rich hypha encrustations on Piloderma*. *Mycorrhiza* 10: 209-215. <https://doi.org/10.1007/s005720000082>
- Bécard, G. et Y. Piché, 1989. *Fungal growth stimulation by CO<sub>2</sub> and root exudates in vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis*. *Appl. Environ. Microbiol.* 55(9): 2320-2325. <https://doi.org/10.1128/AEM.55.9.2320-2325.1989>
- Bekele, A., L. Kellman et H. Beltrami, 2007. *Soil profile CO<sub>2</sub> concentrations in forested and clear cut sites in Nova Scotia, Canada*. *For. Ecol. Manage.* 242(2-3): 587-597. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.088>
- Benomar, L., M.S. Lamhamedi, S. Pépin, A. Rainville, M.-C. Lambert, H.A. Margolis, J. Bousquet et J. Beaulieu, 2018. *Thermal acclimation of photosynthesis and respiration of southern and northern white spruce seed sources tested along a regional climatic gradient indicates limited potential to cope with temperature warming*. *Ann. Bot.* 121(3): 443-457. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx174>
- Boudreault, S., S. Pepin, 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. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.05.0081>
- Boyle, C.D. et K.E. Hellenbrand, 1991. *Assessment of the effect of mycorrhizal fungi on drought tolerance of conifer seedlings*. *Can. J. Bot.* 69(8): 1764-1771. <https://doi.org/10.1139/b91-224>
- Brundrett, M., N. Bougher, B. Dell, T. Grove et N. Malajczuk, 1996. *Working with mycorrhizas in forestry and agriculture*. ACIAR Monograph 32, Pirie Printers. Canberra (Australie). 374 p.
- Brundrett, M., N. Malajczuk, G. Mingqin, X. Daping, S. Snelling et B. Dell, 2005. *Nursery inoculation of Eucalyptus seedlings in Western Australia and Southern China using spores and mycelial inoculum of diverse ectomycorrhizal fungi from different climatic regions*. *For. Ecol. Manage.* 209(3): 193-205. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.01.031>
- Bryan, J.A., J.R. Seiler et R.D. Wright, 1989. *Influence of growth medium pH on the growth of container-grown Fraser fir seedlings*. *J. Environ. Hort.* 7(2): 62-64.
- Caron, J., 2001. « *La tourbe et les milieux artificiels* ». Dans : Payette, S. et L. Rochefort (édit.). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presses de l'Université Laval. Québec, QC. p. 399-410.
- Choi, D.S., H.O. Jin, D.J. Chung, K. Sasa et T. Koike, 2008. *Growth and physiological activity in Larix kaempferi seedlings inoculated with ectomycorrhizae as affected by soil acidification*. *Trees* 22: 729-735. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0233-8>
- De Klein, C., R.S. A. Novoa, S. Ogle, K.A. Smith, P. Rochette et T.C. Wirth, 2006. « *Chapitre 11 — Émissions de N<sub>2</sub>O des sols gérés et émissions de CO<sub>2</sub> dues au chaulage et à l'application d'urée* ». Dans : Eggleston H.S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara et K. Tanabe (éds). *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, volume 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres*. Hayama. Kanagawa (Japon). 60 p. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4\\_Volume4/V4\\_11\\_Ch11\\_N2O&CO2.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf)
- de la Bastide, P.Y., B.R. Kropp et Y. Piché, 1995. *Population structure and mycelial phenotypic variability of the ectomycorrhizal basidiomycete Laccaria bicolor (Maire) Orton*. *Mycorrhiza* 5: 371-379. <https://doi.org/10.1007/BF00207409>

- Dennis, J.J., 1985. *Effect of pH and temperature on in vitro growth of ectomycorrhizal fungi*. Government of Canada, Canadian Forestry Service, Pacific Forestry Centre. Information Report BC-X-273. 19 p. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/2504.pdf>
- Desilva, D.L.R., A.M. Hetherington et T.A. Mansfield, 1985. *Synergism between calcium ions and abscisic acid in preventing stomatal opening*. *New Phytol.* 100(4): 473-482. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1985.tb02795.x>
- Erland, S., B. Söderström et S. Andersson, 1990. *Effects of liming on ectomycorrhizal fungi infecting Pinus sylvestris L. II. Growth rates in pure culture at different pH values compared to growth rates in symbiosis with the host plant*. *New Phytol.* 115(4): 683-688. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00500.x>
- Feagley, S.E. et L.B. Fenn, 1998. *Using soluble calcium to stimulate plant growth*. Texas Agricultural Extension Service. The Texas A&M University System. Publication n° L-5212. 4 p. <http://lubbock.tamu.edu/files/2011/10/calcium-plantgrowth.pdf>
- Fortin, J.A. et M.S. Lamhamedi, 2009. « Chapter 13 – Ecophysiology of sporocarp development of ectomycorrhizal basidiomycetes associated with boreal forest gymnosperms ». Dans : Khasa, D., Y. Piché et A.P. Coughlan (éds). *Advances in mycorrhizal science and technology*. NRC Research Press. Ottawa, ON. p. 161-173.
- Fournier, J., C. Bonnot-Courtois, R. Paris, O. Voltaire et M. Le Vot, 2012. *Analyses granulométriques, principes et méthodes*. CNRS, Dinard. 100 p.
- Gagnon, J., 1996. « Stimulation of mycorrhization and growth for containerized jack pine seedlings inoculated with *Laccaria bicolor* and *Pseudomonas fluorescens* ». Dans : Azcon-Aguilar, C. et J.M. Barea (éds.). *Mycorrhizas in integrated systems from genes to plant development: Proceedings of the fourth European Symposium on Mycorrhizas*. 11 au 14 juillet 1994. Grenade, Espagne. p. 634-637.
- Gagnon, J., 2016. *Performance de plants mycorrhizés après 4 à 21 ans de croissance dans 15 plantations établies dans plusieurs régions écologiques du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 178. 31p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Memoire178.pdf>
- 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. <https://rng.net/publications/tpn/60-1>
- Gagnon, J. et M.S. Lamhamedi, 2011. *L'inoculation des plants résineux en récipients par des spores de champignons ectomycorhiziens à l'automne pourrait-elle contribuer à réduire les problèmes d'insuffisance racinaire dans les pépinières forestières du Québec?* Dans : Colas, F. et M.S. Lamhamedi (éds). *Recueil des résumés - Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation*. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations. 4 au 6 octobre 2011. Québec, QC. p. 27-32. <http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Recueil-resume-concentrations-carrefour2011.pdf>
- Gagnon, J., C.-G. Langlois et J.A. Fortin, 1987. *Growth of containerized jack pine seedlings inoculated with different ectomycorrhizal fungi under a controlled fertilization schedule*. *Can. J. For. Res.* 17(8): 840-845. <https://doi.org/10.1139/x87-133>
- Gagnon, J., C.-G. Langlois et J.A. Fortin, 1988. *Growth and ectomycorrhiza formation of containerized black spruce seedlings as affected by nitrogen fertilization, inoculum type, and symbiont*. *Can. J. For. Res.* 18(7): 922-929. <https://doi.org/10.1139/x88-140>
- Garbaye, J. et G.D. Bowen, 1989. *Stimulation of ectomycorrhizal infection of Pinus radiata by some microorganisms associated with the mantle of ectomycorrhizas*. *New Phytol.* 112(3): 383-388. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1989.tb00327.x>
- 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>
- Grossnickle, S.C., 2000. *Ecophysiology of northern spruce species. The performance of planted seedlings*. NRC Research Press. Ottawa, ON. 407 p.

- Halman, J. M., P.G. Schaberg, G.J. Hawley et C. Eagar, 2008. *Calcium addition at the Hubbard Brook Experimental Forest increases sugar storage, antioxidant activity and cold tolerance in native spruce (Picea rubens)*. *Tree Physiol.* 28(6): 855-862. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.6.855>
- Heiskanen, J., 1993. *Favourable water and aeration conditions for growth media used in containerized tree seedling production: A review*. *Scand. J. For. Res.* 8(1-4): 337-358. <https://doi.org/10.1080/02827589309382782>
- Hochmal, A.K., S. Shulze, K. Trompelt et M. Hippler, 2015. *Calcium-dependent regulation of photosynthesis*. *Biochim. Biophys. Acta* 1847(9): 993-1003. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2015.02.010>
- Jackson, S.L. et I.B. Heath, 1993. *Roles of calcium ions in hyphal tip growth*. *Microbiol. Rev.* 57(2): 367-382. <https://doi.org/10.1128/membr.57.2.367-382.1993>
- Kalra, Y. P. et D. G. Maynard, 1992. *Méthodes d'analyses des sols forestiers et des tissus végétaux*. Forêts Canada, Région du Nord-Ouest, Centre de foresterie du Nord, Edmonton, AB. Rapport d'information NOR-X-319F. 129 p.
- Kope, H.H. et J. A. Fortin, 1990. *Germination and comparative morphology of basidiospores of Pisolithus arhizus*. *Mycologia.* 82(3): 350-357. <https://doi.org/10.2307/3759906>
- Korhonen, A., T. Lehto et T. Repo, 2015. *Frost hardiness of mycorrhizal and non-mycorrhizal Scots pine under two fertilization treatments*. *Mycorrhiza* 25: 377-386. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0618-z>
- Kranabetter, J.M., M. Stoehr et G.A. O'Neill, 2015. *Ectomycorrhizal fungal maladaptation and growth reductions associated with assisted migration of Douglas-fir*. *New Phytol.* 206(3): 1135-1144. <https://doi.org/10.1111/nph.13287>
- Kropp, B.R. et C.-G. Langlois, 1990. *Ectomycorrhizae in reforestation*. *Can. J. For. Res.* 20(4): 438-451. <https://doi.org/10.1139/x90-061>
- 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<sup>e</sup> atelier sur la production de plants forestiers du Québec. 15-16 mars 2006. Québec, QC. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune [CD-ROM].
- Lamhamedi, M.S., 2011. *La masse des racines pourrait-elle être utilisée comme un critère de qualité avant la livraison des plants en site de reboisement?* Dans : Colas, F. et Lamhamedi, M.S. (éds). Recueil des résumés - Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations. 4 au 6 octobre 2011. Québec, QC. p. 65-69. <http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Recueil-resume-prediction-carrefour2011.pdf>
- Lamhamedi, M.S., 2015. *Variabilité de la qualité de la silice et comparaison des effets de la silice et de la calcite sur la croissance et la nutrition minérale des plants en pépinière forestière*. Conférence présentée lors de la journée de transfert de connaissances de l'Office des producteurs de plants forestiers du Québec. 17 au 19 février 2015. Québec, QC. 66 p.
- Lamhamedi, M.S. et J. Gagnon, 2002. *Comment gérer la fertilisation et l'irrigation en vue d'améliorer la tolérance au gel des plants produits en réceptifs?* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Avis technique. 15 p.
- Lamhamedi, M.S. et M. Renaud, 2005. *Effets de l'ajout de la chaux dolomitique sur la croissance des plants d'épinette blanche (2+0) et les propriétés physico-chimiques du substrat de croissance*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis technique. 15 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Avis-techn-effets-ajout.pdf>
- Lamhamedi, M.S. et M. Renaud, 2017. *Les ectomycorhizes dans les pépinières forestières au Québec : éléments historiques et effets sur la qualité morphophysio-logique des plants*. Conférence présentée lors du Colloque Mycorrhizes 2017. 10 et 11 mai 2017. Québec, QC. 44 p. [http://www.cef-cfr.ca/uploads/Colloque/Mycorrhizes2017\\_MohammedSghirLamhamedi.pdf](http://www.cef-cfr.ca/uploads/Colloque/Mycorrhizes2017_MohammedSghirLamhamedi.pdf)
- Lamhamedi, M.S., J.A. Fortin, H.H. Kope et B.R. Kropp, 1990. *Genetic variation in ectomycorrhiza formation by Pisolithus arhizus on Pinus pinaster and Pinus banksiana*. *New Phytol.* 115(4) : 689-697. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00501.x>

- Lamhamedi, M.S., J.A. Fortin et P. Y. Bernier, 1991. *La génétique de Pisolithus sp. : une nouvelle approche de biotechnologie forestière pour assurer une meilleure survie des plants en conditions de sécheresse*. *Sécheresse* 2: 251-258.
- Lamhamedi, M.S., P. Y. Bernier et J.A. Fortin, 1992. *Hydraulic conductance and soil water potential at the soil-root interface of Pinus pinaster seedlings inoculated with different dikaryons of Pisolithus sp.* *Tree Physiol.* 10(3): 231-244. <https://doi.org/10.1093/treephys/10.3.231>
- Lamhamedi, M.S., G. Lambany, H.A. Margolis, M. Renaud, L. Veilleux 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., 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(1): 108-120. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0109>
- Lamhamedi, M.S., M. Abourouh et J.A. Fortin, 2009. « Chapter 11 – Technological transfer: the use of ectomycorrhizal fungi in conventional and modern forest tree nurseries in northern Africa ». Dans : Khasa, D., Y. Piché et A.P. Coughlan (éds.). *Advances in mycorrhizal science and technology*. NRC Research Press. Ottawa, ON. p. 139-152.
- Lamhamedi, M.S., M. Renaud, et L. Veilleux, 2011a. *Les effets de l'augmentation du pH des substrats sur la croissance des plants forestiers produits dans les pépinières forestières*. Dans : Colas, F. et M.S. Lamhamedi (éds). Recueil des résumés - Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations. 4 au 6 octobre 2011. Québec, QC. p. 33-45. <http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Recueil-resume-utilisation-carrefour2011.pdf>
- Lamhamedi, M.S., M. Renaud, P. Desjardins et L. Veilleux, 2011b. *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). Recueil des résumés - Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations. 4 au 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, 2011c. *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). Recueil des résumés - Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations. 4 au 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., M. Renaud, P. Desjardins et L. Veilleux. 2011d. *Évaluation de la qualité morphophysique du système racinaire des plants du mélèze laricin : les racines foncées ou noires peuvent-elles être considérées mortes?* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction de la recherche forestière. Avis technique SGRE-3. 33p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Avis-techn-SGRE-3.pdf>
- Lamhamedi, M.S., P. Desjardins, M. Renaud, et L. Veilleux, 2013a. *Techniques culturales de production pour améliorer la qualité morphophysique 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. 6 novembre 2013. Québec, QC. 130 p. <https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Journee-formation-pepiniere-for-fqcf.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(1): 35-46. <https://rngr.net/publications/tpn/56-1>
- Lamhamedi, M.S., A. Rainville, L. Benomar, I. Villeneuve, J. Beaulieu, J. Bousquet, H.A. Margolis, J. DeBlois et M.-C. Lambert, 2017. *L'écophysiole, un atout pour réussir la migration assistée de sources génétiques d'épinette blanche*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Avis de recherche forestière n° 89, 2 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Avis89.pdf>
- Landis, T. D. 1996. *Secondary nutrients – Calcium*. Forest Nursery Notes 8 (January 1996): 8-11. <https://rngr.net/publications/fnn/1996-winter/articles/secondary-nutrients2014calcium>
- Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett, 1989a. *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, 1989b. *The biological component: nursery pests and mycorrhizae. Vol. 5: Seedling nutrition and irrigation*. U.S.D.A., Forest Service. Washington, DC (États-Unis). Agric. Handbook n° 674. 171 p. <https://rngr.net/publications/ctnm/volume-5>
- 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://rngr.net/publications/ctnm/volume-2>
- Lapeyrie, F., G. A. Chilvers et C. A. Bhem, 1987. *Oxalic acid synthesis by the mycorrhizal fungus Paxillus involutus (Batsch. Ex Fr.) Fr*. New Phytol. 106(1): 139-146. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb04797.x>
- Leake, J., D. Johnson, D. Donnelly, G. Muckle, L. Boddy et D. Read, 2004. *Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning*. Can. J. Bot. 82(8): 1016-1045. <https://doi.org/10.1139/b04-060>
- Lehto, T., 1994. *Effects of soil pH and calcium on mycorrhiza of Picea abies*. Plant Soil 163: 69-75. <https://doi.org/10.1007/BF00033942>
- Lehto, T. et J. J. Zwiazek, 2011. *Ectomycorrhizas and water relations of trees: a review*. Mycorrhiza 21: 71-90. <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0348-9>
- Lopez-Lefebvre, L.R., R.M. Rivero, P.C. García, E. Sanchez, J.M. Ruiz et L. Romero, 2001. *Effect of calcium on mineral nutrient uptake and growth of tobacco*. J. Sci. Food Agric. 81(14): 1334-1338. <https://doi.org/10.1002/jsfa.948>
- Marx, D.H. et C.E. Cordell, 1989. « The use of specific ectomycorrhizas to improve artificial forestation practices ». Dans : Whipps, J.M. et R.D. Lumsden (éds.). *Biotechnology of fungi for improving plant growth*. Cambridge University Press. Cambridge (Royaume-Uni). p. 1-25.
- Marx, D.H., J.L. Ruehle, D.S. Kenney, C.E. Cordell, J.W. Riffle, R.J. Molina, W.H. Pawuk, S. Navratil, R.W. Tinus et O.C. Goodwin, 1982. *Commercial vegetative inoculum of Pisolithus tinctorius and inoculation techniques for development of ectomycorrhizae on container-grown tree seedlings*. For. Sci. 28(2): 373-400.
- McAfee, B. et J.A. Fortin, 1986. *Competitive interactions of ectomycorrhizal mycobionts under field conditions*. Can. J. Bot. 64(4): 848-852. <https://doi.org/10.1139/b86-110>
- McAfee, B. et J.A. Fortin, 1987. *The influence of pH on the competitive interactions of ectomycorrhizal mycobionts under field conditions*. Can. J. For. Res. 17(8): 859-864. <https://doi.org/10.1139/x87-136>
- McAfee, B. et J.A. Fortin, 1989. *Ectomycorrhizal colonization on black spruce and jack pine seedlings outplanted in reforestation sites*. Plant Soil 116: 9-17. <https://doi.org/10.1007/BF02327251>
- Monfort-Salvador, I., L.G. Garcia-Montero et M.A. Grande, 2015. *Impact of calcium associated to calcareous amendments on ectomycorrhizae in forests: A review*. J. Soil Sci. Plant Nut. 15(1): 217-231. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000018>
- Moore, J.-D., R. Ouimet et L. Duchesne, 2012. *Soil and sugar maple response 15 years after dolomitic lime application*. For. Ecol. Manage. 281: 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.026>

- Näsholm, T., P. Högborg, O. Franklin, D. Metcalfe, S.G. Keel, C. Campbell, V. Hurry, S. Linder et M.N. Högborg, 2013. *Are ectomycorrhizal fungi alleviating or aggravating nitrogen limitation of tree growth in boreal forests?* New Phytol. 198(1): 214-221. <https://doi.org/10.1111/nph.12139>
- Onwuchekwa, N.E., J.J. Zwiazek, A. Quoreshi et D.P. Khasa, 2014. *Growth of mycorrhizal jack pine (Pinus banksiana) and white spruce (Picea glauca) seedlings planted in oil sands reclaimed areas.* Mycorrhiza. 24: 431-441. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0555-x>
- Otgonsuren, B. et M.J. Lee, 2013. *Ectomycorrhiza enhanced the cold-acclimation growth and freeze tolerance of Scots pine (Pinus sylvestris L.).* Taiwan J. For. Sci. 28(2): 97-111.
- Palta, J.P., 1996. *Role of calcium in plant responses to stresses: Linking basic research to the solution of practical problems.* HortScience 31(1): 51-57. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.31.1.51>
- 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). Recueil des résumés - Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations. 4 au 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>
- Percival, G. et S. Barnes, 2008. *Calcium-induced freezing and salinity tolerance in evergreen oak and apple cv. 'Golden Crown.* Arboric. Urban For. 34(3): 191-199.
- Perry, D.A., R. Molina et M.P. Amaranthus, 1987. *Mycorrhizae, mycorrhizospheres, and reforestation: current knowledge and research needs.* Can. J. For. Res. 17(8): 929-940. <https://doi.org/10.1139/x87-145>
- Pickles, B.J., K.N. Egger, H.B. Massicotte et D.S. Green, 2012. *Ectomycorrhizas and climate change.* Fungal Ecol. 5(1): 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2011.08.009>
- Poulin M. J., R. Bel-Rhliid, Y. Piché et R. Chênevert, 1993. *Flavonoids released by carrot (Daucus carota) seedlings stimulate hyphal growth of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in the presence of optimal CO<sub>2</sub> enrichment.* J. Chem. Ecol. 19(10): 2317-2327.
- Read, D.J., 1992. « The mycorrhizal mycelium ». Dans : Allen, M. (éd.). *Mycorrhizal functioning: An integrative plant-fungal process.* Chapman and Hell, New York, NY (États-Unis). p. 102-133.
- Read, D.J. et R. Boyd, 1986. « Water relations of mycorrhizal fungi and their host plants ». Dans : Ayres, P. G. et L. Body (éds.). *Water, fungi and plants.* Cambridge University Press. Cambridge (Royaume-Uni). p. 287-304.
- Read, D.J., J.R. Leake et J. Perez-Moreno, 2004. *Mycorrhizal fungi as drivers of ecosystem processes in heathland and boreal forest biomes.* Can. J. Bot. 82(8): 1243-1263. <https://doi.org/10.1139/b04-123>
- Rikala, R. et H.J. Jozefek, 1990. *Effect of dolomite lime and wood ash on peat substrate and development of tree seedlings.* Silva Fen. 24(4): 323-334. <https://doi.org/10.14214/sf.a15586>
- Rillig, M.C. et D.L. Mummey, 2006. *Mycorrhizas and soil structure.* New Phytol. 171(1): 41-53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>
- Rippy, J.F.M., 2005. *Factors affecting pH establishment and maintenance in peat moss-based substrates.* Ph.D. thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC (États-Unis). 150 p. <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/5254>
- SAS Institute Inc. 2015. *SAS/STAT® 14.1 User's guide: high-performance procedures.* Cary, NC: SAS Institute Inc.
- South, D.B., 2017. *Optimum pH for growing pine seedlings.* TPN 60(2): 49-62. <https://rngr.net/publications/tpn/60-2>
- South, D.B., R.L. Nadel, S.A. Enebak et G. Bickerstaff, 2017. *Sulfur and lime affect soil pH and nutrients in a sandy Pinus taeda nursery.* Reforesta 4: 12-20. <https://doi.org/10.21750/refor.4.02.41>
- Stowe, D.C., M.S. Lamhamedi, S. Carles, B. Fecteau, H.A. Margolis, M. Renaud et P.Y. Bernier, 2010. *Managing irrigation to reduce nutrient leaching in containerized white spruce seedling production.* New For. 40: 185-204. <https://doi.org/10.1007/s11056-010-9193-0>

- Tabak, H.H. et W.B. Cooke, 1968. *The effects of gaseous environments on the growth and metabolism of fungi*. Bot. Rev. 34(2): 126-252.
- 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>
- White, P.J. et M.R. Broadley, 2003. *Calcium in plants*. Ann. Bot. 92(4): 487-511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Whipps, J.M., 2004. *Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens*. Can. J. Bot. 82(8): 1198-1227. <https://doi.org/10.1139/b04-082>
- Yang, B.Z., Z.B. Liu, S.D. Zhou, L.J. Ou, X.Z. Dai, Y.Q. Ma, Z.Q. Zhang, W.C. Chen, X.F. Li, C.L. Liang, S. Yang et X.X. Zou, 2016. *Exogenous Ca<sup>2+</sup> alleviates waterlogging-caused damages to pepper*. Photosynthetica 54: 620-629. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0200-3>
- Zhao, H.J. et J.-F. Tan, 2005. *Role of calcium ion in protection against heat and high irradiance stress-induced oxidative damage to photosynthesis of wheat leaves*. Photosynthetica 43: 473-476. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0076-0>



# Annexes

**Annexe 1.** Probabilités observées (valeurs de  $p$ ) des contrastes orthogonaux de l'interaction Date  $\times$  Traitement de l'analyse de la variance des variables de fertilité et physicochimiques du substrat pendant la deuxième saison de croissance des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière. Une valeur de  $p$  en gras indique un contraste significatif à  $p < 0,05$ .

Contraste	Valeur de $p$							
	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>CaCl2</sub>	Cond (µS/cm)	N <sub>min</sub> (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)
25MAI2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	0,9998	0,9114	0,8206	1,0000	<b>0,0155</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,0094</b>
25MAI2015 : Calcite vs Calcite+	0,9986	0,8847	0,9488	1,0000	1,0000	1,0000	0,9507	0,9999
15JUIN2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	1,0000	<b>0,0021</b>	0,7545	<b>0,0012</b>	0,7431	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>
15JUIN2015 : Calcite vs Calcite+	0,9887	0,9185	< <b>0,0001</b>	0,0642	0,9995	0,7230	0,8929	0,9107
06JUIL2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	1,0000	0,5497	<b>0,0117</b>	<b>0,0144</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0026</b>
06JUIL2015 : Calcite vs Calcite+	0,3536	1,0000	0,2155	1,0000	1,0000	1,0000	0,7331	0,9286
27JUIL2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	0,9998	0,9530	0,9945	< <b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	<b>0,0002</b>
27JUIL2015 : Calcite vs Calcite+	1,0000	1,0000	0,8031	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9986
17AOUT2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	0,4424	0,7288	1,0000	<b>0,0002</b>	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>
17 AOUT 2015 : Calcite vs Calcite+	0,2760	1,0000	0,7885	1,0000	0,6623	0,1943	1,0000	1,0000
08SEP2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	<b>0,0056</b>	<b>0,0325</b>	< <b>0,0001</b>	0,0729	< <b>0,0001</b>	<b>0,0144</b>	1,0000
08SEP2015 : Calcite vs Calcite+	0,9992	0,9997	< <b>0,0001</b>	<b>0,0129</b>	0,7753	0,1295	0,0562	0,9994
28SEP2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	0,2425	0,3075	<b>0,0045</b>	0,9786	<b>0,0027</b>	1,0000
28SEP2015 : Calcite vs Calcite+	0,9636	1,0000	0,0912	0,8372	0,6541	0,8328	0,7145	0,9280
Date (effet linéaire) $\times$ (Calcite vs Calcite+)	0,8823	0,8877	0,2398	0,9158	0,9884	0,9516	0,6785	0,8741
Date (effet linéaire) $\times$ (Calcite/Calcite+ vs Silice)	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	<b>0,0099</b>	0,2063	0,7940	0,1412	0,8263	0,0585
Date (effet quadratique) $\times$ (Calcite vs Calcite+)	0,0651	0,9994	0,2127	0,7946	0,5872	0,7699	0,7085	0,9183
Date (effet quadratique) $\times$ (Calcite/Calcite+ vs Silice)	<b>0,0078</b>	<b>0,0128</b>	0,1228	0,4860	<b>0,0035</b>	1,0000	<b>0,0109</b>	0,9875

Cond. = conductivité électrique; N<sub>min</sub> = azote minéral; P = phosphore; K = potassium; Ca = calcium et Mg = magnésium.

**Annexe 2.** Probabilités observées (valeurs de  $p$ ) des contrastes orthogonaux de l'interaction Date  $\times$  Traitement de l'analyse de la variance des variables de croissance pendant la deuxième saison de croissance des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière. Les contrastes ne sont présentés que lorsque l'interaction Date  $\times$  Traitement est significative à  $p < 0,05$  (voir tableau 2). Une valeur de  $p$  en gras indique un contraste significatif à  $p < 0,05$ .

Contraste	Valeur de $p$			
	Hauteur (H) (cm)	H/D	Masse sèche des parties aériennes (mg)	Masse sèche totale (g)
25MAI2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	<b>0,0159</b>	< <b>0,0001</b>	0,6109	0,6161
25MAI2015 : Calcite vs Calcite+	1,0000	0,9167	1,0000	1,0000
15JUIN2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	<b>0,0002</b>	<b>0,0124</b>	0,3228	0,3848
15JUIN2015 : Calcite vs Calcite+	0,8825	1,0000	0,8605	0,8386
06JUIL2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>
06JUIL2015 : Calcite vs Calcite+	0,8889	0,2347	0,9987	0,9975
27JUIL2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	0,2605	<b>0,0061</b>	<b>0,0095</b>
27JUIL2015 : Calcite vs Calcite+	0,9885	0,9990	0,9996	0,9980
17AOUT2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0036</b>	<b>0,0161</b>
17 AOUT 2015 : Calcite vs Calcite+	1,0000	0,7584	0,3605	0,2741
08SEP2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	<b>0,0009</b>	<b>0,0002</b>	<b>0,0017</b>
08SEP2015 : Calcite vs Calcite+	1,0000	0,9538	0,9988	0,9877
28SEP2015 : (Calcite/Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0062</b>	<b>0,0102</b>
28SEP2015 : Calcite vs Calcite+	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Date (effet linéaire) $\times$ (Calcite vs Calcite+)	1,0000	1,0000	0,9957	0,9952
Date (effet linéaire) $\times$ (Calcite/Calcite+ vs Silice)	< <b>0,0001</b>	0,9821	<b>0,0018</b>	<b>0,0054</b>
Date (effet quadratique) $\times$ (Calcite vs Calcite+)	1,0000	1,0000	0,9994	0,9929
Date (effet quadratique) $\times$ (Calcite, Calcite+ vs Silice)	0,1399	0,9948	0,7154	0,8191

**Annexe 3.** Estimation des paramètres des modèles logistiques de l'évolution de la hauteur, du diamètre, de la masse sèche des parties aériennes, de la masse sèche des racines et de la masse sèche totale des plants d'épinière blanche au cours de la saison 2+0 en pépinière forestière. Les paramètres en gras indiquent que la différence entre les traitements Silice et (Calcite/Calcite+) est significative.

Variable réponse	Paramètre*	Valeur estimée	Erreur type	Valeur de $p$
Hauteur (cm)	$a_0$	34,7	0,4	< 0,0001
	<b><math>a_{12}</math></b>	<b>7,0</b>	<b>0,5</b>	<b>&lt; 0,0001</b>
	$b$	11,1	0,3	< 0,0001
	$c$	0,049	0,001	< 0,0001
Diamètre (mm)	$a_0$	6,0	0,1	< 0,0001
	<b><math>a_{12}</math></b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0064</b>
	$b$	4,6	0,8	< 0,0001
	$c_0$	0,025	0,002	< 0,0001
Masse sèche des parties aériennes (mg)	<b><math>c_{12}</math></b>	<b>0,005</b>	<b>0,002</b>	<b>0,0091</b>
	$a_0$	7004	115	< 0,0001
	<b><math>a_{12}</math></b>	<b>874</b>	<b>103</b>	<b>&lt; 0,0001</b>
	$b$	32,2	1,0	< 0,0001
Masse sèche des racines (mg)	$c$	0,041	0,001	< 0,0001
	$a_0$	1960	64	< 0,0001
	<b><math>a_{12}</math></b>	<b>164</b>	<b>32</b>	<b>&lt; 0,0001</b>
	$b$	56,8	3,0	< 0,0001
Masse sèche totale (mg)	$c$	0,025	0,001	< 0,0001
	$a_0$	8891	151	< 0,0001
	<b><math>a_{12}</math></b>	<b>977</b>	<b>125</b>	<b>&lt; 0,0001</b>
	$b$	35,3	1,2	< 0,0001
	$c$	0,037	0,001	< 0,0001

\* Le paramètre  $a$  correspond à l'asymptote, le paramètre  $b$ , au point d'inflexion et le paramètre  $c$ , au taux de croissance. Les paramètres  $a_0$  et  $c_0$  sont associés au traitement Silice, alors que les paramètres  $a_{12}$  et  $c_{12}$  sont associés aux traitements Calcite/Calcite+; lorsque ces derniers sont différents de zéro (c'est-à-dire que  $p < 0,05$ ), l'évolution de la courbe des traitements Calcite/Calcite+ est significativement différente de celle du traitement Silice. Les paramètres  $b$  et  $c$  sont communs aux trois traitements.

**Annexe 4.** Probabilités observées (valeurs de  $p$ ) des contrastes de l'interaction Date  $\times$  Traitement de l'analyse de la variance du contenu, de la concentration et de l'efficacité des éléments minéraux des parties aériennes des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière. Les contrastes ne sont présentés que lorsque l'interaction Date  $\times$  Traitement est significative à  $p < 0,05$  (voir tableau 3). Une valeur de  $p$  en gras indique un contraste significatif à  $p < 0,05$ .

Contraste	Valeurs de $p$																
	Contenu en éléments minéraux (mg/plant)							Concentrations en éléments minéraux (%)							Efficacité d'utilisation		
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	Mg	K	Mg	NUE	PUE	KUE				
25MAI2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	0,9856	0,9382	0,9782	< 0,0001	1,0000	0,8578	1,0000	1,0000	< 0,0001	0,8848	1,0000	1,0000					
25MAI2015 : Calcite vs Calcite+	1,0000	1,0000	0,9998	0,9997	1,0000	1,0000	0,4198	0,3184	0,7556	1,0000	0,9683	0,2444					
15JUN2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	0,7232	<b>0,0054</b>	<b>0,0035</b>	< 0,0001	0,9990	0,8759	< 0,0001	0,6010	0,4562	0,5939	<b>0,0005</b>	0,5422					
15JUN2015 : Calcite vs Calcite+	0,9569	0,9953	0,9987	0,9598	1,0000	1,0000	0,9718	0,9987	0,9982	1,0000	0,9992	0,9997					
06JUIL2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	<b>0,0001</b>	< 0,0001	<b>0,0001</b>	< 0,0001	<b>0,0034</b>	< 0,0001	0,9893	0,1240	0,0768	< 0,0001	0,9987	<b>0,0257</b>					
06JUIL2015 : Calcite vs Calcite+	1,0000	0,9990	0,6355	1,0000	1,0000	0,9107	<b>0,0148</b>	0,5437	0,3910	0,7492	0,1430	0,1576					
27JUIL2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	0,5659	< 0,0001	<b>0,0071</b>	< 0,0001	0,0904	< 0,0001	1,0000	0,1221	<b>0,0198</b>	<b>0,0006</b>	1,0000	0,0712					
27JUIL2015 : Calcite vs Calcite+	0,9999	1,0000	1,0000	0,5311	0,9932	1,0000	0,9799	0,9994	1,0000	1,0000	0,9260	0,9983					
17AOÛT2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	0,2933	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	<b>0,0135</b>	<b>0,0424</b>	<b>0,0013</b>	0,9952	0,9994	<b>0,0148</b>	< 0,0001	0,9891					
17AOÛT2015 : Calcite vs Calcite+	0,8356	0,3495	0,4076	0,0530	0,0688	0,9994	1,0000	1,0000	0,9726	0,9849	1,0000	1,0000					
08SEP2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	0,6730	< 0,0001	<b>0,0001</b>	< 0,0001	0,2208	<b>0,0028</b>	0,5040	1,0000	0,2313	<b>0,0012</b>	<b>0,0179</b>	1,0000					
08SEP2015 : Calcite vs Calcite+	0,9993	0,9937	0,9999	1,0000	0,7982	1,0000	1,0000	1,0000	0,9617	1,0000	0,9999	1,0000					
28SEP2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	<b>0,0368</b>	0,1242	0,9999	1,0000	<b>0,0273</b>	0,5211	0,9977	1,0000					
28SEP2015 : Calcite vs Calcite+	0,9154	0,9506	0,9979	0,9918	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000					
Date (effet linéaire) $\times$ (Calcite vs Calcite+)	0,9964	0,9586	0,9943	1,0000	0,9464	1,0000	0,9721	0,9020	0,9574	1,0000	0,9998	0,9983					
Date (effet linéaire) $\times$ (Calcite/Calcite+ vs Silice)	0,0931	< 0,0001	<b>0,0008</b>	< 0,0001	0,0668	0,7944	0,3002	0,9684	<b>0,0162</b>	<b>0,0017</b>	1,0000	0,9857					
Date (effet quadratique) $\times$ (Calcite vs Calcite+)	1,0000	1,0000	1,0000	0,9982	0,9864	0,9705	0,9999	1,0000	0,9975	0,9698	0,9952	1,0000					
Date (effet quadratique) $\times$ (Calcite/Calcite+ vs Silice)	1,0000	0,0906	0,9947	0,9607	0,4382	<b>0,0175</b>	1,0000	0,4053	0,2148	<b>0,0064</b>	0,8860	0,6289					

**Annexe 5.** Probabilités observées (valeurs de  $p$ ) des contrastes de l'interaction Date  $\times$  Traitement de l'analyse de la variance du contenu, de la concentration et de l'efficacité des éléments minéraux des racines des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière. Les contrastes ne sont présentés que lorsque l'interaction Date  $\times$  Traitement est significative à  $p < 0,05$  (voir tableau 4). Une valeur de  $p$  en gras indique un contraste significatif à  $p < 0,05$ .

Contraste	Valeurs de $p$																
	Contenu en éléments minéraux (mg/plant)							Concentration en éléments minéraux (%)							Efficacité d'utilisation		
	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	NUE	PUE	KUE							
25MAI2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	<b>0,0003</b>	< <b>0,0001</b>	0,9215	< <b>0,0001</b>	<b>0,0163</b>	<b>0,0008</b>	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	<b>0,0195</b>	< <b>0,0001</b>	<b>0,0195</b>	< <b>0,0001</b>	<b>0,0195</b>	< <b>0,0001</b>			
25MAI2015 : Calcite vs Calcite+	0,9049	0,9971	1,0000	1,0000	0,8608	1,0000	1,0000	1,0000	0,7873	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000			
15JUN2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	1,0000	<b>0,0001</b>	<b>0,0322</b>	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,0624</b>	<b>0,0624</b>	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>			
15JUN2015 : Calcite vs Calcite+	0,0172	0,9666	0,5088	0,8003	0,9997	0,9211	1,0000	1,0000	0,7526	0,9996	0,9996	0,9998	0,9998	0,9998			
06JUIL2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	<b>0,0036</b>	< <b>0,0001</b>	1,0000	0,0916	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	1,0000	1,0000	<b>0,0471</b>	1,0000	<b>0,0471</b>	<b>0,0471</b>			
06JUIL2015 : Calcite vs Calcite+	1,0000	0,6995	1,0000	0,8921	1,0000	0,9998	0,9845	0,9845	0,5768	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000			
27JUIL2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	0,7556	< <b>0,0001</b>	1,0000	< <b>0,0001</b>	0,6075	0,9999	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0017</b>	0,1481	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000			
27JUIL2015 : Calcite vs Calcite+	0,9865	<b>0,0038</b>	0,3607	0,9731	<b>0,0251</b>	1,0000	0,2563	0,2563	<b>0,0025</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000			
17AOÛT2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	0,9918	< <b>0,0001</b>	1,0000	<b>0,0010</b>	0,5308	1,0000	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	<b>0,0002</b>	0,2196	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000			
17AOÛT2015 : Calcite vs Calcite+	0,9990	0,9485	0,5967	0,9879	0,9939	0,3326	0,3239	0,3239	0,6775	0,9365	0,9365	0,0711	0,0711	0,0711			
08SEP2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	1,0000	< <b>0,0001</b>	0,6371	<b>0,0491</b>	1,0000	0,9999	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	<b>0,0267</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000			
08SEP2015 : Calcite vs Calcite+	0,9433	1,0000	0,3668	1,0000	1,0000	1,0000	0,9200	0,9200	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000			
28SEP2015 : (Calcite, Calcite+) vs Silice	0,5607	< <b>0,0001</b>	1,0000	0,0884	0,8739	1,0000	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	0,4871	0,9925	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000			
28SEP2015 : Calcite vs Calcite+	1,0000	0,9940	1,0000	0,9999	0,9998	0,9999	0,8872	0,8872	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000			
Date (effet linéaire) $\times$ (Calcite vs Calcite+)	1,0000	0,9992	1,0000	0,9999	0,9984	0,9957	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9993	0,9993	0,9993			
Date (effet linéaire) $\times$ (Calcite/Calcite+ vs Silice)	0,5328	< <b>0,0001</b>	0,9980	< <b>0,0001</b>	1,0000	<b>0,0001</b>	<b>0,0182</b>	<b>0,0182</b>	0,4317	0,6224	0,6224	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>			
Date (effet quadratique) $\times$ (Calcite vs Calcite+)	1,0000	0,9927	0,6808	0,9999	1,0000	0,9369	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,8478			
Date (effet quadratique) $\times$ (Calcite/Calcite+ vs Silice)	1,0000	0,9630	1,0000	0,9980	0,1253	0,4290	0,9213	0,9213	0,2227	0,4352	0,4352	0,3827	0,3827	0,3827			





Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) du Québec veille à ce que tout soit mis en œuvre pour atteindre les objectifs de reboisement et assurer l'aménagement durable des forêts. Ainsi, les chercheurs et leurs partenaires innovent pour produire des semences et des plants de différentes sources génétiques (vergers, familles et clones) et de haute qualité morphophysologique dans le respect des considérations environnementales et financières. Depuis plus de 50 ans, le MFFP réalise des projets de recherche-développement sur la production de semences et de plants en vue de faire avancer les connaissances scientifiques et les techniques culturales en pépinière forestière. Pour faciliter l'intégration rapide des avancées innovantes à l'échelle opérationnelle, les chercheurs accompagnent et assurent en continu le transfert de connaissances, d'expertise et du savoir-faire vers l'ensemble des pépinières forestières privées (13) et gouvernementales (6) du Québec.

Cette étude compare les effets de l'utilisation de la calcite granulaire et de la silice comme matériel de recouvrement des récipients de culture pour l'épinette blanche. Les résultats montrent que les plants cultivés avec de la calcite granulaire ont des gains significatifs pour plusieurs variables de croissance, une meilleure qualité morphophysologique, et que l'extérieur de leurs carottes racinaires est davantage colonisé par le mycélium extraracinaire des champignons ectomycorhiziens. L'utilisation de la calcite granulaire pourra contribuer à améliorer la rentabilité des pépinières forestières en diminuant la quantité de plants rejetés et en augmentant leur taux de conformité. Les auteurs discutent de la portée opérationnelle des résultats et offrent des recommandations pour favoriser l'installation des ectomycorhizes, puisque celles-ci améliorent la qualité morphophysologique et la tolérance aux stress environnementaux des plants, tant en pépinière qu'en site de reboisement, ce qui revêt une importance particulière dans un contexte de changements climatiques.